

ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพีวีซี  
และเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัส และหญ้าแฝก)

POLYMER COMPOSITES AS ARTIFICIAL WOOD FROM PVC  
AND NATURAL FIBERS (EUCALYPTUS AND VETIVER GRASS)



เด่นศักดิ์ แสงพุทธเงินธนะ

DENSAK SAENGPUNGERNTANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

ฉ.พ.

บัณฑิตวิทยาลัย

๑๘๘๒๘

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๒๕๔๗

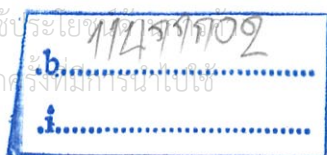
พ.ศ. ๒๕๔๗

ISBN 974-151-309-7

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 56639

วัน,เดือน,ปี..... 12 ก.ค. 2548



สงวนลิขสิทธิ์... ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้นี้

POLYMER COMPOSITES AS ARTIFICIAL WOOD FROM PVC  
AND NATURAL FIBERS (EUCALYPTUS AND VETIVER GRASS)



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

2004

ISBN 974-151-309-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในที่โรงเรียนซึ่งหน่วยงานนี้ ไม่สงวนสิทธิ์ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพีวีซีและ

เส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัส และหญ้าแฝก)

นักศึกษา

นายเด่นศักดิ์ แสงพุทธเงินฐานะ

รหัสประจำตัว

44065611

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

พ.ศ.

2547

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

นายวรรณธรรม อุ่นจิตติชัย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติเพื่อใช้เป็นไม้เทียมที่เตรียมได้จากพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) กับเส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด คือ เส้นใยหญ้าแฝกและเส้นใยยูคาลิปตัส โดยผสมในเครื่องผสมความเร็วสูง แล้วนำไปผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความทนทานต่อปลวก และสัณฐานวิทยา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใย (0-70 phr) ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ คือ ไดออกทิลพทาเลต (DOP) (5.0-12.5 phr) ชนิดของเส้นใยที่ใช้ คือ เส้นใยหญ้าแฝก และเส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจาก 2 กระบวนการคือกระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulp; MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Pulp; TMP) ปริมาณของสารตัวเติม (0-40 phr) คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและทัลคัม และผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ จากการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมากขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตมากเกินไปเกินขีดความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพีวีซีเมตริกซ์กับเส้นใยไม้ ปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสมที่สุด คือ 30 phr เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้น ในการศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีค่าลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณ DOP ที่เหมาะสมในการผลิตพีวีซีคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ คือ 5 phr ในการศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดความร้อนเชิงกล (ETMP) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลสูงสุดเมื่อเทียบกับพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยอีก 3 ชนิด (EMP, VTMP และ VMP) ในการศึกษาผลของสารตัวเติม พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกาที่มีค่ามอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรง โค้งงอ และมอดุลัส โค้งงอมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมชนิดอื่น (แคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม) เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความ แข็งมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม) ปริมาณที่แนะนำคือ 10 phr ในการศึกษาผลของการรีไซเคิล พบว่าเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นทำให้ พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลลดลง ในการศึกษาความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิต พบว่า อัตราการเข้าทำลายมีค่าน้อยมาก มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับความพึงพอใจ จากการศึกษา สันฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ในพีวีซีคอมโพสิตทำให้การกระจายตัวของเส้นใยไม้ไม่สม่ำเสมอ พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP, VTMP และ EMP มีความแข็งแรงการยืดเกาะระหว่างพีวีซีเมตริกซ์กับเส้นใยดีพอสมควร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Polymer Composites as Artificial Wood from PVC and Natural Fibers (Eucalyptus and Vetiver Grass)
Student	Mr. Densak Saengputngerntana
Student ID.	44065611
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2004
Thesis advisor	Assoc. 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 two natural fibers (vetiver grass and eucalyptus fibers). 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 mechanical, physical, thermal, durability of subterranean termite attack, and morphological properties. Parameters affecting composite properties were studied including effects of fiber loading (0-70 phr), DOP (dioctyl phthalate) plasticizer loading (5-12.5 phr), calcium carbonate, silica and talcum filler loading (0-40 phr), fiber types (Vetiver Mechanical Pulp; VMP, Vetiver Thermomechanical Pulp; VTMP, Eucalyptus Mechanical Pulp; EMP and Eucalyptus Thermomechanical Pulp; ETMP) and numbers of recycling. It was found that tensile strength, modulus at 3% strain, impact strength, flexural strength and flexural modulus of the composites were improved by increasing fiber loadings. However, the mechanical properties were declined after fiber loading exceeded an optimum point (30 phr). As expected, the %water absorption of the composites were also increased as the fiber loading was increased. By adding the DOP plasticizer, mechanical properties of the composites were decreased including tensile strength, modulus at 3% strain, hardness, flexural strength and flexural modulus due to plasticization effect of the DOP. As expected, impact strength and %water absorption were increased with an increase in DOP. An optimum DOP loading in the composites was 5 phr. It was found that the

composites made from ETMP fibers had better mechanical properties than those made from other fibers (VMP, VTMP and EMP). It was found that the silica-loaded composites had better modulus at 3% strain, hardness, flexural strength and flexural modulus than those with other fillers ( $\text{CaCO}_3$  and talcum) due to strength of silica was more than other fillers ( $\text{CaCO}_3$  and talcum). An optimum filler loading in the composites was 10 phr. It was found that mechanical properties of the composites were decreased by increasing numbers of recycling. In the study of the durability of the composites to the attack of subterranean termites, it was found that attack of termites was very low. Efficiency of durability of the attack of subterranean was satisfactory. From SEM micrographs, poor fiber dispersion in polymer matrix was found at high fiber loadings. It was revealed that the composites of ETMP, VTMP and EMP had good interface bonding between the polymer matrix and the fibers.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ และ คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์จากคณะบุคคล และองค์กรต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำงานวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณวรรณม อุ่นจิตติชัย นักวิชาการกรมป่าไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้คำชี้แนะ และเอื้อเฟื้อเส้นใยไม้ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร. รัตน์วรรณ มกรพันธุ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทวีนิไทย จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อพีซีเรซิน (266GS) และบริษัทสยามซิลิกา จำกัด ที่เอื้อเฟื้อซิลิกา เพื่อใช้ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณ พ่อ แม่ และเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้จัดทำวิทยานิพนธ์มิได้กล่าวถึง ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เด่นศักดิ์ แสงพุทธเงินธนะ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 คอมโพสิต.....	6
2.1.1 เมตริกซ์.....	7
2.1.2 ส่วนเสริมแรง.....	8
2.1.3 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต.....	8
2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต.....	9
2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์.....	10
2.2.1 พีวีซีคอมพาวด์.....	11
2.2.2 สารเติมแต่ง.....	11
2.2.2.1 สารเพิ่มเสถียรภาพ.....	11
2.2.2.2 พลาสติไซเซอร์.....	13
2.2.2.3 สารหล่อลื่น.....	14
2.2.2.4 สารตัวเติม.....	15
2.3 เส้นใยธรรมชาติ.....	16
2.3.1 เซลลูโลส.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 เอมิเซลลูโลส.....	18
2.3.3 ลิกนิน.....	19
2.4 ยูคาลิปตัส.....	20
2.5 หญ้าแฝก.....	22
2.5.1 การใช้ประโยชน์หญ้าแฝก.....	25
2.5.1.1 การใช้ประโยชน์จากใบหญ้าแฝกสำหรับงานศิลปหัตถกรรม....	25
2.5.1.2 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุเพาะเห็ด.....	26
2.5.1.3 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุคลุมหลังคา....	26
2.5.1.4 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นปุ๋ยหมักและพืชคลุมดิน.....	26
2.6 การเตรียมเส้นใยไม้.....	26
2.7 ปลวก.....	27
2.8 การนำกลับมาใช้ใหม่.....	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.3 วิธีการทดลอง.....	38
3.3.1 เส้นใยธรรมชาติ.....	38
3.3.1.1 การเตรียมเส้นใยธรรมชาติ.....	38
3.3.1.2 อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ	40
3.3.1.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ.....	40
3.3.2 ขั้นตอนการผลิตฟิวซี.....	40
3.4 การทดสอบ.....	42
3.4.1 สมบัติเชิงกล.....	43
3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด และเปอร์เซ็นต์การยืด	
3.4.1.2 ความต้านทานการฉีกขาด.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1.2 ความแข็งแรงกระแทก.....	44
3.4.1.3 ความแข็งแรงกด.....	44
3.4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ.....	44
3.4.2 สมบัติทางกายภาพ.....	45
3.4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ.....	45
3.4.2.2 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำ.....	46
3.4.3 สมบัติทางความร้อน.....	46
3.4.3.1 อุณหภูมิการเสีรูปทางความร้อน.....	46
3.4.3.2 อุณหภูมิการสลายตัว.....	46
3.4.3.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า $\tan \delta$ .....	47
3.4.4 ความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิต.....	47
3.4.5 สัณฐานวิทยา.....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>49</b>
4.1 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก).....	49
4.1.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก).....	49
4.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก)...	51
4.2 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต.....	52
4.2.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้.....	52
4.2.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้.....	57
4.2.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้.....	58
4.2.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.5 สันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้.....	62
4.3 การศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต.....	64
4.3.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP	64
4.3.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP.....	68
4.3.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP.....	70
4.3.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP.....	72
4.3.5 สันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP	73
4.4 การศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต.....	75
4.4.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้	75
4.4.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้.....	79
4.4.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้.....	81
4.4.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้.....	84
4.4.5 สันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้	84
4.5 การศึกษาผลของสารตัวเติมในพีวีซีคอมโพสิต.....	87
4.5.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม.....	88
4.5.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม.....	93
4.5.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลง สารตัวเติม.....	99
4.5.5 สันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม....	100
4.6 การศึกษาผลของการรีไซเคิลของพีวีซีคอมโพสิต.....	103
4.6.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการ รีไซเคิล.....	103
4.6.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งใน การรีไซเคิล.....	104
4.6.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งใน การรีไซเคิล.....	105
4.6.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งใน การรีไซเคิล.....	107
4.6.5 สันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการ รีไซเคิล.....	108
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของพีวีซีคอมโพสิต .....	110
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	111
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	113
เอกสารอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก. อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ.....	118
ภาคผนวก ข. กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA.....	120
ภาคผนวก ค. ไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานกรมป่าไม้.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของไนลอน 6,6 เทียบกับพอลิเมอริกคอมโพสิต.....	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซีส.....	21
2.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของหญ้าแฝกหอมและหญ้าแฝกดอน.....	24
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	39
3.2 สูตรการผสมพีวีซีคอมพาวด์.....	41
3.3 มาตรฐานในการทดสอบความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิต.....	48
4.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	49
4.2 ค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta$ จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้.....	60
4.3 ค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta$ จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP.....	72
4.4 ค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta$ จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้.....	83
4.5 ค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta$ จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติม.....	98
4.6 อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม	99
4.7 สมบัติต่าง ๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล.....	103
4.8 ค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta$ จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล.....	106
4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพีวีซีคอมโพสิต.....	110
ค1 ไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานกรมป่าไม้.....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน.....	8
2.2	ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์.....	10
2.3	สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส.....	17
2.4	ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส.....	17
2.5	สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	18
2.6	หน่วยที่ซ้ำกันของลิกนิน.....	19
2.7	โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน.....	19
2.8	การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้.....	20
2.9	ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส.....	20
2.10	ลักษณะของหญ้าแฝก.....	23
2.11	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ศิลปะหัตถกรรมจากหญ้าแฝก.....	25
2.12	ลักษณะของปลวก <i>Coptotermes gestroi</i> Wasmann .....	28
3.1	ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การ ยืด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด.....	43
3.2	ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก.....	44
3.3	ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ.....	45
3.4	การทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทดสอบแบบบังคับ.....	47
4.1	สัณฐานวิทยาของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด (ก) เส้นใย VMP (ข) เส้นใย VTMP (ค) เส้นใย EMP และ (ง) เส้นใย ETMP ที่กำลังขยาย 10 เท่า.....	50
4.2	กราฟ TGA ของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด (VMP, VTMP, EMP และ ETMP).....	51
4.3	ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	52
4.4	ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	53
4.5	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	53
4.6	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr หรือศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา 54

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	ค่าความแข็งกตของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	54
4.8	ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	55
4.9	ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	55
4.10	ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	57
4.11	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	58
4.12	ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	59
4.13	กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0 30 และ 70 phr.....	60
4.14	กราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr.....	61
4.15	ลักษณะวิทยาของพีวีซีที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	62
4.16	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	63
4.17	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 70 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	63
4.18	ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	64
4.19	ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	65
4.20	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	66
4.22	ค่าความแข็งแรงกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	66
4.23	ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	67
4.24	ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	67
4.25	ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	69
4.26	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	69
4.27	ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr .....	70
4.28	กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 และ 12.5 phr.....	71
4.29	กราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr.....	73
4.30	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	74
4.31	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 12.5 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	74
4.32	ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	75
4.33	ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.34	ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	76
4.35	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	77
4.36	ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	77
4.37	ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	78
4.38	ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	78
4.39	ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	80
4.40	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	81
4.41	ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	82
4.42	กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	83
4.43	กราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	84
4.44	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า	85
4.45	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย VTMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า	85
4.46	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย EMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า	86
4.47	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพลิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารฉบับร่าง 5 phr และ CaCO<sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า หน้า 86

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.48	สัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	87
4.49	สัณฐานวิทยาของทัลคัม (ก) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า	87
4.50	สัณฐานวิทยาของซิลิกา (ก) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า	88
4.51	ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	88
4.52	ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	89
4.53	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	89
4.54	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	90
4.55	ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	90
4.56	ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	91
4.57	ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	91
4.58	ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr.....	94
4.59	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 0-40 phr .....	94
4.60	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมทัลคัม 0-40 phr.....	95
4.61	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมซิลิกา 0-40 phr.....	95
4.62	ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr	

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา 97

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.63	กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0 และ 40 phr.....	98
4.64	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติม CaCO <sub>3</sub> 40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	100
4.65	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมทัลคัม 40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	101
4.66	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมซิลิกา 40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	102
4.67	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล.....	104
4.68	กราฟ TGA พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล.....	106
4.69	กราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล	107
4.70	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อไม่มีการรีไซเคิล (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	108
4.71	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 1 ครั้ง (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	109
4.72	ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 2 ครั้ง (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย VMP ขนาด 20-50 mesh.....	118
ก-2 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย VTMP ขนาด 20-50 mesh.....	118
ก-3 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย EMP ขนาด 20-50 mesh.....	119
ก-4 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ETMP ขนาด 20-50 mesh.....	119
ข-1 กราฟ DMTA ของพีวีซีที่เติม DOP 5.0 phr และ CaCO <sub>3</sub> 40 phr .....	120
ข-2 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	120
ข-3 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 70 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	121
ข-4 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติมซิลิกา 40 phr.....	121
ข-5 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 12.5 phr โดยเติมซิลิกา 40 phr.....	122
ข-6 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VTMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	122
ข-7 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย EMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	123
ข-8 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO <sub>3</sub> 40 phr.....	123
ข-9 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยไม่มีการเติมสารตัวเติม.....	124
ข-10 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติมทัลคัม 40 phr.....	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข-11	กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยใส่ DOP 5.0 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อไม่มีการรีไซเคิล.....	125
ข-12	กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยใส่ DOP 5.0 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 1 ครั้ง.....	125
ข-13	กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยใส่ DOP 5.0 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 2 ครั้ง.....	126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก ซึ่งมนุษย์ได้ดัดแปลงแล้วนำมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุในการก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องมือและเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น บานประตู หน้าต่าง ติ้ะ แก้วอี้ โครงสร้างของบ้าน ทำให้ไม้เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากชนิดหนึ่ง ในปัจจุบันป่าไม้ในประเทศไทยมีจำนวนลดน้อยลงอย่างรวดเร็ว แต่ความต้องการในการใช้ไม้กลับเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากจำนวนประชากรของประเทศที่เพิ่มขึ้นและความต้องการผลิตภัณฑ์ไม้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณไม้ที่มีอยู่ในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ ก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่า ปัญหาการแย่งชิงทรัพยากรไม้และผลผลิตจากป่าไม้ระหว่างประชาชนและเจ้าหน้าที่ของรัฐผู้ปกป้องป่าไม้ และปัญหาอื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุจากการตัดต้นไม้ทำลายป่า เช่น ปัญหาการขาดแคลนน้ำ ฝนไม่ตกตามฤดูกาล และปัญหาน้ำท่วม ฯลฯ

วิธีการแก้ปัญหาวิธีหนึ่ง คือการผลิตไม้เทียม (Artificial woods) จากวัสดุอื่นเพื่อใช้ทดแทนไม้ ทำให้ลดปัญหาดังกล่าวได้ เช่น ปัญหาจากการตัดไม้ทำลายป่า “ไม้เทียม” คือวัสดุใด ๆ ที่มีลักษณะภายนอกเหมือน หรือคล้ายกับวัสดุไม้ ไม้เทียมที่ดีควรมีสมบัติคล้ายวัสดุไม้ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง เหนียว ความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี สามารถดกด้วยตะปู ตัดด้วยเลื่อย และอายุการใช้งานยาวนาน ฯลฯ สามารถใช้วัสดุไม้เทียมประกอบสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ได้ วัสดุหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นไม้เทียม ได้แก่ “คอมโพสิต” (Composites) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ เมตริกซ์และส่วนเสริมแรง คอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering materials) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ เนื่องจากพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ [1] คือ

- น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
- มีอายุการใช้งานยาวนาน ไม่ผุกร่อนง่าย และไม่ถูกทำลายโดยแมลง เช่น ปลวก
- มีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เช่น มีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ ดังนั้นคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งนิยามเท่ากับความแข็งแรงต่อความหนาแน่น ( $\sigma/\rho$ ) สูง และมีค่ามอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus,  $E/\rho$ ) สูง
- คอมโพสิตยังมีสมบัติที่กว้าง เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะกับการใช้งาน
- สามารถขึ้นรูปได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย และง่ายต่อการใส่ประกอบกับวัสดุอื่น (Insertion)

พอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เพื่อให้มีสมบัติดีขึ้นและต้นทุนการผลิตต่ำ แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงพอลิเมอร์ให้สมบัติดีขึ้น คือการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้เป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตอาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermosets) เช่น พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester) อีพอกซี (Epoxy) ฯลฯ เส้นใยเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) ฯลฯ

ปัจจุบันได้มีความสนใจในการใช้เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) มาเป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีราคาแพง ในประเทศไทยมีเส้นใยธรรมชาติมากมาย บางชนิดเป็นเศษเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เช่น เส้นใย้อ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล เส้นใยมะพร้าวจากอุตสาหกรรมกะทิ ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้อื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ ฯลฯ เส้นใยธรรมชาติมีข้อดีหลายประการดังนี้ [2]

- หาง่าย และมีให้เลือกมากมายหลายชนิด
- เส้นใยบางชนิดเป็นของเหลือทิ้ง หรือเป็นวัชพืชมีราคาถูก ทำให้สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต
- เส้นใยมีสมบัติเชิงกลดี บางชนิดมีความแข็งแรง และมีมอดุลัสสูง
- ความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา
- สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นปัญหาในการกำจัด
- ช่วยกำจัด และลดกากของเสียจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติเพื่อทำวัสดุคอมโพสิตยังไม่ประสบความสำเร็จในเชิงอุตสาหกรรมเท่าที่ควร เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องทำการปรับปรุง คือ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการยืดเกาะกับเมตริกซ์ต่ำ เป็นสาเหตุให้สมบัติบางประการของคอมโพสิตต่ำ เช่น สมบัติเชิงกล
- เส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำสูงกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยสังเคราะห์
- เส้นใยธรรมชาติขาดความสม่ำเสมอของเส้นใย

งานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในโครงการเพื่อสนองพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยเสนอที่จะศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ และเส้นใยธรรมชาติ เพื่อใช้งานเป็นวัสดุไม้เทียมและวัสดุขึ้นรูปแบบพลาสติก โดยเน้นที่งานวิจัยที่การเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติที่ดี เช่น สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ฯลฯ โดยทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) ให้สามารถประยุกต์ใช้งานไม้เทียมในรูปวัสดุเฟอร์นิเจอร์ เช่น ไม้ปาร์เกต์ แผ่นไม้กรอบหน้าต่าง ประตู หรือวัสดุฝ้าเพดาน ฯลฯ ทั้งนี้เสนอที่จะใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าพีวีซี (PVC) เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์

ข้อดีของการใช้พีวีซีเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ มีดังนี้ [3]

- พีวีซีมีความสามารถในการดับไฟด้วยตัวเอง
- มีความคงรูปสูง
- มีราคาถูก
- ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ
- พีวีซีมีสมบัติหลากหลายสามารถปรับความแข็ง-อ่อนได้ง่าย โดยการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์
- พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติก สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยเทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ฯลฯ และสามารถหลอมเหลวขึ้นรูปใหม่ได้หลายครั้ง ไม่มีปัญหาการกำจัดเศษเหลือในกระบวนการผลิต และการนำกลับมาใช้ใหม่
- เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว (จากคลอรีนอะตอมในโครงสร้าง) จึงมีความสามารถในการเข้ากันได้และยึดเกาะดีกับเส้นใยธรรมชาติที่มีขั้ว เนื่องจากมีเซลล์โลสเป็นองค์ประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผลของปริมาณเส้นใยไม้ ผลของปริมาณไดออกทิลพทาเลต (DOP) ผลของชนิดเส้นใย ผลของสารตัวเติม และผลของการรีไซเคิล
2. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพีวีซีคอมโพสิตคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความทนทานต่อปลวก และสิ่งแวดล้อมวิทยา

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต โดยใช้ปริมาณเส้นใยไม้ 0-70 phr
2. ศึกษาผลของปริมาณไดออกทิลพทาเลต (DOP) ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต โดยใช้ปริมาณ DOP 5.0-12.5 phr
3. ศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต โดยใช้เส้นใยยูคาลิปตัสและหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล และกระบวนการความร้อนเชิงกล
4. ศึกษาผลของสารตัวเติมที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต โดยสารตัวเติมที่ใช้ คือแคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัม และซิลิกา ในปริมาณ 0-40 phr
5. ศึกษาผลการรีไซเคิลของพีวีซีคอมโพสิต โดยทำการรีไซเคิลพีวีซีคอมโพสิต 2 ครั้ง
6. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความทนทานต่อปลวก และสิ่งแวดล้อมวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตไม้เทียมที่มีสมบัติที่ดีจากพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติ เพื่อทดแทนไม้จากธรรมชาติ และทดแทนวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยสังเคราะห์ ประยุกต์ใช้งานเป็นไม้เทียมได้ เช่น วัสดุเฟอร์นิเจอร์ ไม้ปาร์เกต์ แผ่นไม้กรอบหน้าต่าง ต่าง หรือวัสดุฝ้าเพดาน ฯลฯ
2. เป็นบริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
3. สามารถใช้ความรู้ที่ได้เป็นพื้นฐานความรู้การวิจัย ในการประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ ได้
4. สามารถเพิ่มประโยชน์การใช้สอยจากยุคาลิปตัสและหญ้าแฝกได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 คอมโพสิต [1]

คอมโพสิต (Composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต คือ เมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

สมบัติของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

1. การยึดติดระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรง
2. สมบัติของเมทริกซ์และสารเสริมแรง
3. ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรง
4. ปริมาณสารเสริมแรง
5. กระบวนการผลิต
6. การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารเสริมแรง
7. ตำหนิ (Flaws) หรือช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุคอมโพสิต

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของไนลอน 6,6 เทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิต [1]

วัสดุ	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Modulus (E), GPa	Strength ( $\sigma$ ), MPa	E/ $\rho$ , 10 <sup>6</sup> N.m/kg	$\sigma/\rho$ , 10 <sup>3</sup> N.m/kg
Nylon 6,6	1.14	2.0	70	1.75	61.4
Unidirectional carbon fiber/epoxy	1.55	137.8	1550	88.90	1000.0
Unidirectional E-glass fiber/epoxy	1.85	39.3	965	21.20	522.0
Unidirectional Kevlar <sup>®</sup> 49 fiber/epoxy	1.38	75.8	1378	54.90	999.0
Quasi-isotropic carbon fiber/epoxy	1.55	45.5	579	29.30	374.0
Random glass fiber/epoxy	1.55	8.5	110	5.48	71.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่น (Density) ค่ามอดุลัส (Modulus) ค่าความแข็งแรง (Strength) ค่าความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength,  $\sigma/\rho$ ) และค่ามอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus,  $E/\rho$ ) ของไนลอน 6,6 เทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิต จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีสมบัติต่อน้ำหนัก หรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio) สูงกว่า

### 2.1.1 เมตริกซ์ [1]

เมตริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่ง และการจัดเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรง และมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยทั่วไปเมตริกซ์ทำหน้าที่

1. รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุคอมโพสิต
2. ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปยังส่วนเสริมแรง และถ่ายเทแรงระหว่างเส้นใย
3. ทำหน้าที่เป็นเกราะ (Barrier) กับสภาวะแวดล้อมใด ๆ
4. ทำหน้าที่ป้องกันเส้นใยจากการขัดถูเสียดสี (Abrasion)

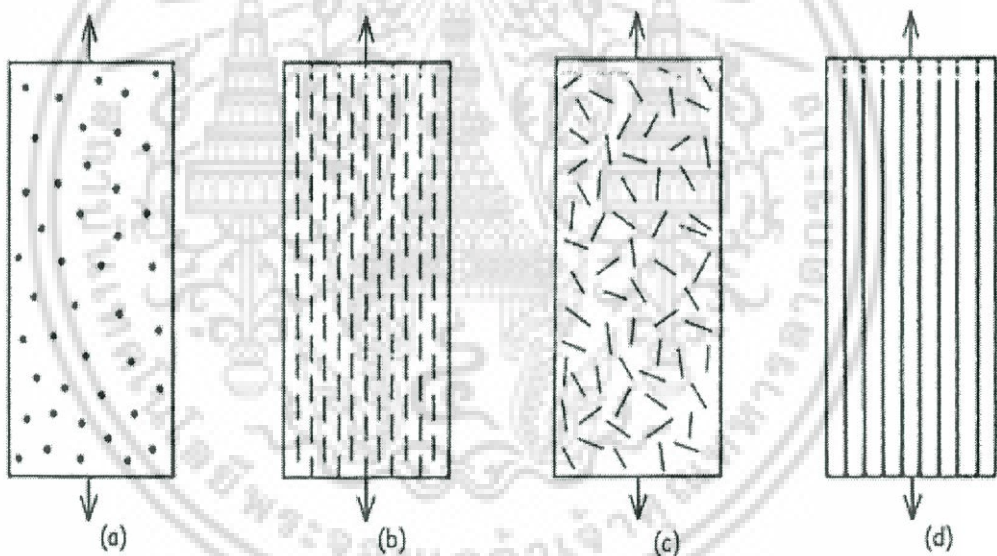
เมตริกซ์ทำหน้าที่เพียงเล็กน้อยในการรับแรง (Load-carrying) เทียบกับเส้นใยเสริมแรง แต่เมตริกซ์ที่ดีจะมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับเส้นใย ช่วยป้องกันการเสียดสีของคอมโพสิตจากแรงเฉือน (Shear stress) ของเส้นใยกับเมตริกซ์ หรือระหว่างวัฏภาค (Interfaces) หรือเสียดสีสภาพเนื่องจากเส้นใยยุบ (Buckling) เนื่องจากแรงกดอัด (Compression loading) อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อสมบัติของคอมโพสิต นอกจากนี้ความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) และรอยตำหนิ (Defects) ของคอมโพสิตยังขึ้นกับสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของเมตริกซ์ เช่น ความหนืด (Viscosity) และจุดหลอมเหลวผลึก (Crystalline melting point) เป็นต้น เมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งชนิดของเมตริกซ์แบ่งได้ 3 ชนิด คือ

1. พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตว่า Polymer matrix composites
2. โลหะ เรียกคอมโพสิตว่า Metal matrix composites
3. เซรามิกซ์ เรียกคอมโพสิตว่า Ceramic matrix composites

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ส่วนเสริมแรง [1]

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่คอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกัน หรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.1 ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle loading-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [4]

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

### 2.1.3 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต [1]

การแบ่งชนิดของคอมโพสิตมีได้หลายแบบ อาจแบ่งชนิดของคอมโพสิตตามลักษณะของส่วนเสริมแรง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวทางเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่น (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้น หรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแซนวิช (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Bead) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1  $\mu\text{m}$ )

#### 2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต [1]

จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิด และมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้เรายังสามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนัก หรือความหนาแน่นสูง (Properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยืนยาว มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติรับแรง และแดมปีง (Damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion; CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

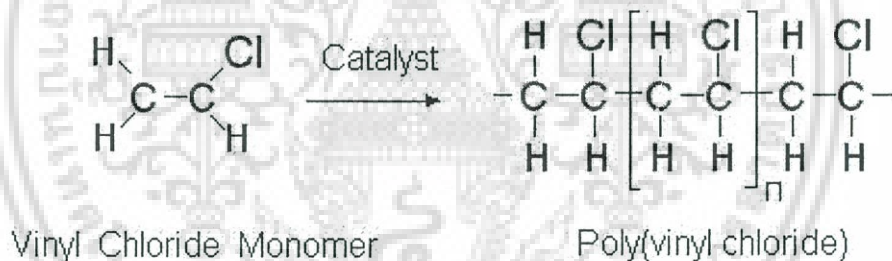
แต่อย่างไรก็ดี ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต
- มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับการเรียงตัว (Transverse direction)
- ยากในการต่อ หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ยากในการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต
- ยากในการทำลาย และนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle)

## 2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ [3, 5, 6]

พอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ในน้ำ (Water dispersion) โดยผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์ [5]

พีวีซี 90% อยู่ในรูปโซโมพอลิเมอร์ กลุ่มพอลิเมอร์อัสตุนฐาน (90-95%) จัดเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ ( $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ ) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นโซ่ตรง (Linear chain structure) แบบซินดิโอแทคติก (Syndiotactic) อะตอมคลอรีนจับแบบหัวต่อหาง

ข้อดี : ราคาถูก น้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า และไม่ไหม้หรือลุกติดไฟ เนื่องจากมีอะตอมคลอรีนในโมเลกุล เมื่อติดไฟสามารถดับได้ด้วยตัวเอง มีขี้เขม่าเล็กน้อย ไม่ดูดกลืนน้ำ ใสไม่มีสี ความหนาแน่น  $1.40 \text{ g/cm}^3$  อุณหภูมิเริ่มอ่อนตัวประมาณ  $80^\circ\text{C}$  และทนทานต่อสารเคมี (High chemical resistance) เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $80^\circ\text{C}$

ข้อเสีย : เพราะที่อุณหภูมิต่ำ ไม่ทนสภาวะอากาศ ความร้อน และแสง UV เช่น การเสียสภาพทางความร้อนและแสง มีพลังงานที่จะทำให้พันธะ  $\text{C}-\text{C}$   $\text{C}-\text{Cl}$   $\text{C}=\text{C}$  ทำให้อะตอม Cl หลุดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น HCl เกิดการเปลี่ยนแปลงสีและมีสมบัติต่าง ๆ ด้อยลงอย่างรวดเร็ว สังเกตจากการเปลี่ยนสีจากเหลือง น้ำตาล น้ำตาลเข้ม น้ำตาลแดง และดำ

พีวีซีสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ [7]

1. Suspension PVC (SPVC) เป็นผงสีขาวและมีขนาดอนุภาคประมาณ 125  $\mu\text{m}$  ซึ่งขนาดอนุภาคใหญ่กว่า EPVC มีรูปทรงสูงกว่าทำให้ดูดซับพลาสติกไซเซออร์ได้ดีกว่าลักษณะเป็นก้อน
2. Emulsion PVC (EPVC) เป็นผงเนื้อละเอียดและมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.2-1.5  $\mu\text{m}$  ซึ่งขนาดอนุภาคเล็กกว่า SPVC มีรูปทรงต่ำทำให้ดูดซับพลาสติกไซเซออร์ได้น้อย เป็นของเหลวเหนียวข้นขาว เรียกว่า Plastisol
3. Bulk PVC (MPVC) มีลักษณะใสบริสุทธิ์ น้ำหนักโมเลกุลสูง ผิวแข็ง มีความหนาแน่นที่ดี มีความสามารถในการดูดซับสารเติมแต่งไม่ดี

### 2.2.1 พีวีซีคอมพาวด์ [8]

พีวีซีคอมพาวด์ (PVC compound) เป็นการผสมพีวีซีกับสารเติมแต่งให้เข้ากันก่อนนำพีวีซีไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าพีวีซีมีสมบัติการทนต่อความร้อนน้อย มีความเหนียวสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผสมพีวีซีกับสารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงพีวีซีให้มีสมบัติความทนทานต่อความร้อนและสมบัติอื่น ๆ ให้ดีขึ้นเพื่อสามารถนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการ สารเติมแต่งที่ผสมในพีวีซีที่สำคัญมีดังนี้

- สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers)
- พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers)
- สารหล่อลื่น (Lubricants)
- สารตัวเติม (Fillers)

### 2.2.2 สารเติมแต่ง [9]

#### 2.2.2.1 สารเพิ่มเสถียรภาพ

ในกระบวนการแปรรูปพอลิไวนิลคลอไรด์จะต้องใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมตัวเพื่อที่จะสามารถแปรรูปด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้ตามต้องการ เนื่องจากเรซินพีวีซีเมื่อได้รับความร้อนสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ทำให้พีวีซีเปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้นจากสีขาว เป็นสีเหลือง เป็นสีส้ม เป็นสีแดง เป็นสีน้ำตาล และเป็นสีดำ ตามลำดับ ในบางสูตรที่เป็นแบบทึบแสงจะเปลี่ยนสีขาวเป็นสีน้ำตาล จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องมีการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer) ลงในพีวีซีคอมพาวด์ ซึ่งสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนสามารถจำแนกออกตามชนิดของสารประกอบเคมีได้ดังนี้

1. สารเพิ่มเสถียรภาพ Ba/Cd/Zn มีการนำไปใช้ในการป้องกันการสลายตัวของพีวีซีมากที่สุด มีทั้งชนิดที่เป็นของเหลว และของแข็ง ชนิดที่เป็นของเหลวจะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซีชนิดอ่อน และชนิดที่เป็นของแข็งจะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซีชนิดแข็ง ชนิดที่เป็นของเหลวเป็นเกลือ Ba/Cd/Zn ของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ออกโทเอต (Octoate) และเบนโซเอต (Benzoate) ส่วนชนิดที่เป็นของแข็งเป็นเกลือ Ba/Cd/Zn ของกรดไขมัน เช่น สเตียเรต (Stearate) ปาล์มมิเตต (Palmitate) และลอเรต (Laurate)

2. สารเสริมเสถียรภาพดีบุกอินทรีย์ เป็นสารที่ก่อให้เกิดเสถียรภาพสูงสุดสำหรับพีวีซี และโดยทั่วไปให้ความใส จัดเป็นสารที่มีราคาแพงที่สุด นิยมใช้กับพีวีซีชนิดแข็ง แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีกลิ่นเหม็นและมีเสถียรภาพทางแสงไม่ดี จึงใช้ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางแสง เช่น บิวทิลทินเมอร์แคปไทด์

3. สารเพิ่มเสถียรภาพฟอสไฟต์ มักใช้ร่วมกับสารเพิ่มเสถียรภาพ Ba/Cd/Zn เพื่อป้องกันการสลายตัวของพีวีซีเนื่องจากความร้อน สารเพิ่มเสถียรภาพฟอสไฟต์ที่ผ่านมาตรฐานคณะกรรมการอาหารและยา ได้แก่ ทริสโนนิลฟีนิลฟอสไฟต์ (TNPP)

4. สารเพิ่มเสถียรภาพตะกั่วอินทรีย์ ใช้เป็นสารป้องกันการสลายตัวของพีวีซีปฐมภูมิ ยกเว้นตะกั่วสเตียเรต จะใช้เป็นสารป้องกันการสลายตัวของพีวีซีทุติยภูมิ

5. สารเพิ่มเสถียรภาพอพิพอกซี ทำหน้าที่เป็นตัวจับและกำจัดกรดที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพีวีซีและสามารถทำปฏิกิริยาแทนที่อะตอมคลอรีนที่ตำแหน่ง Allylic เพื่อลดการสูญเสียอะตอมคลอรีน เช่น น้ำมันถั่วเหลืองอพิพอกซีไดซ์ เป็นสารป้องกันการสลายตัวของพีวีซีที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาไม่แพง นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นพลาสติกไฮเซอรัทที่ติดอีกด้วย

สารเพิ่มเสถียรภาพที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์
- ราคาไม่แพง
- ควรมีเสถียรภาพต่อการเสื่อมสภาพชนิดต่าง ๆ เช่น ความร้อน แสง ความชื้น ออกซิเจน โอโซน กรด-เบส และเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น
- ไม่ควรระเหยง่าย ไม่มีกลิ่น และไม่ทำให้เกิดตำหนิแก่ผลิตภัณฑ์ หรือเกิดสีเมื่อผสมเข้ากับพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้องสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ และต้องไม่เกิดการเคลื่อนย้ายออกมาที่ผิวของวัสดุ (Blooming)
- เมื่อผสมเข้ากับพอลิเมอร์แล้วจะต้องไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์และการนำไปประยุกต์ใช้งาน

### 2.2.2.2 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นของเหลวที่มีความสามารถในการระเหยต่ำ (Low volatility) ซึ่งเมื่อเติมลงในพอลิเมอร์แล้วทำให้อ่อนตัวและดัดโค้งได้ ลดความหนืดและสามารถขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม หน้าที่ของพลาสติไซเซอร์ คือช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล จึงมีพลังงานในการหมุนพันธะ (Bond rotation) ลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ทั้งนี้เพราะพลาสติไซเซอร์แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเท่ากับลดความแข็งแรงของพอลิเมอร์ — สิ่งที่สำคัญควรพิจารณา คือ ความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ประสิทธิภาพ (Efficiency) ความถาวร (Permanence) และอายุการใช้งาน (Aging)

พลาสติไซเซอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. พลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (Primary plasticizer) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่เติมในพอลิเมอร์ โดยไม่ต้องใช้ร่วมกับพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่น เช่น

- Phthalates เช่น Di-octyl phthalate (DOP)
- Adipates เช่น Di-isooctyl adipate (DIOA)
- Azelates เช่น Di-octyl azelate (DOA)
- Trimellitates เช่น Tri-octyl trimellitate (TOTM)
- Sebacates เช่น Di-isooctyl sebacate (DIOS)

2. พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) มีราคาถูกกว่าพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ มักใช้คู่กับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ เช่น

- Epoxydized soybean oil (EPO) ทำหน้าที่ทั้งพลาสติไซเซอร์และสารเพิ่มเสถียรภาพ เป็นการนำน้ำมันพืชที่ไม่อิ่มตัวและกรดไขมัน (ถั่วเหลือง) มาเติมออกซิเจน (Hydrogen peroxide) ทำให้รวมตัวกับพิวซีได้ดีและเมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวไปจับคลอรีนอะตอมที่หลุดจากพิวซี
- Cereclor<sup>®</sup> S52 เป็น Chlorinated hydrocarbon ซึ่งทำหน้าที่ทั้งสารช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากหน่วยงานที่ดูแลพลาสติไซเซอร์ สามารถรวมตัวกับพิวซีได้ดี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นสารที่เติมลงในพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พีวีซี เพื่อช่วยในกระบวนการแปรรูป โดยไปทำหน้าที่หล่อลื่นหรือลดความเสียดทานในระหว่างกระบวนการผลิต ช่วยให้ขึ้นรูปง่ายขึ้นและไหลง่ายขึ้น ควบคุมอัตราการไหลของพีวีซี ซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการอัดรีด (Extrusion) การเลือกใช้ควรพิจารณา

1. ชนิดของพอลิเมอร์
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป
3. ปริมาณที่ใช้ไม่ควรเกิน 1% ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้สารเติมแต่งอื่น ๆ ซึมออกมาระหว่างกระบวนการผลิต เช่น สี ซึมออกมาระหว่างการผลิต เมื่อมีแรงเฉือนและความดันสูง

สารหล่อลื่นของพอลิเมอร์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricant) สามารถละลายได้ดีในพอลิเมอร์ และทำหน้าที่ลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยจะหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะมีความแตกต่างจากพลาสติกไฮเซอรัทตรงที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์น้อยมาก
2. สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant) เป็นสารที่ละลายเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ค่อนข้างต่ำ และทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับผิวโลหะของเครื่องจักรเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวและผิวโลหะร้อนของเครื่องจักร ลดการติดของพอลิเมอร์กับเครื่องจักร

ตัวอย่างสารหล่อลื่นที่นิยมใช้ผสมกับพีวีซีมีดังนี้

- กรดสเตียริก และเมทัลลิกสเตียเรต (Stearic acid and metallic stearates)
- ไชพาราฟินส์ และไฮพอลิเอทิลีน (Paraffin waxes and Polyethylene waxes)
- พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight polyethylene)
- ไฮออกซิไดซ์พอลิเอทิลีน (Oxidized polyethylene waxes)
- ไชธรรมชาติ และสังเคราะห์ (Natural & Synthetic waxes)
- กรดไขมัน (Fatty acids)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.4 สารตัวเติม

สารตัวเติม (Fillers) เป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทำหน้าที่เพื่อลดต้นทุน ลดการหดตัวในแม่พิมพ์ ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้สารตัวเติม คือ

1. ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม ขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้มีสมบัติทนแรงดึงมอดุลัสและความแข็งแกร่งสูงกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่
2. รูปร่างของสารตัวเติม เช่น สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะให้สมบัติแอนไอโซโทรปิก ส่วนสารตัวเติมที่มีผิวเรียบยากที่จะยึดติดกับพอลิเมอร์
3. พื้นที่ผิวทางเคมีของสารตัวเติม เป็นสมบัติพื้นฐานของสารตัวเติม และเป็นข้อมูลในการเลือกสารตัวเติมให้เหมาะกับพอลิเมอร์ โดยพิจารณาจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารตัวเติม

สารตัวเติม สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. สารตัวเติมชนิดช่วยเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณ หรือลดต้นทุนการผลิตและช่วยเสริมแรง ทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น สารตัวเติมชนิดช่วยเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica)
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณ หรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์

ตัวอย่างสารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้ คือ

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonates) เตรียมได้จากหินปูน (Limestone) และหินอ่อน (Marble) โดยการบดแบบเปียกและแบบแห้ง ทำให้มีขนาดแตกต่างกัน (1-20  $\mu\text{m}$ ) สูตรโครงสร้าง คือ  $\text{CaCO}_3$  มีราคาถูก แต่ความหนาแน่นสูง (2.7  $\text{g/cm}^3$ ) นิยมใช้สารช่วยกระจายตัว เช่น กรดสเตียริก มาเคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว

2. ซิลิกา (Silica) เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงดีที่สุดในยางเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่น ๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก สูตรโครงสร้าง คือ  $\text{SiO}_2$  ความหนาแน่น 2.2  $\text{g/cm}^3$  ซิลิกาที่นำมาใช้อาจอยู่ในรูปที่พบในธรรมชาติ (Natural silica) หรือเป็นซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic silica)

3. ทัลคัม (Talcum) เป็นแร่ประเภทแมกนีเซียมซิลิเกต (Magnesium silicate) มีลักษณะเป็นแผ่นหรือเส้นใย โดยปกติมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เป็น 3 และราคาค่อนข้างต่ำ มีสูตรโครงสร้าง คือ  $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ความหนาแน่น 2.75  $\text{g/cm}^3$  ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

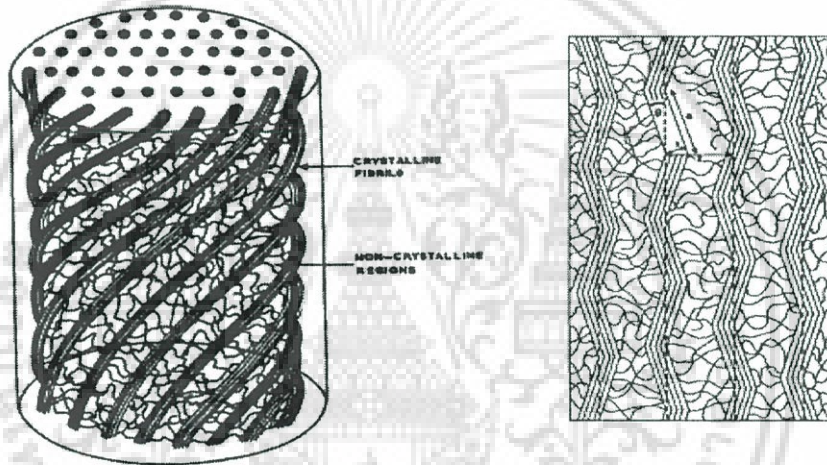
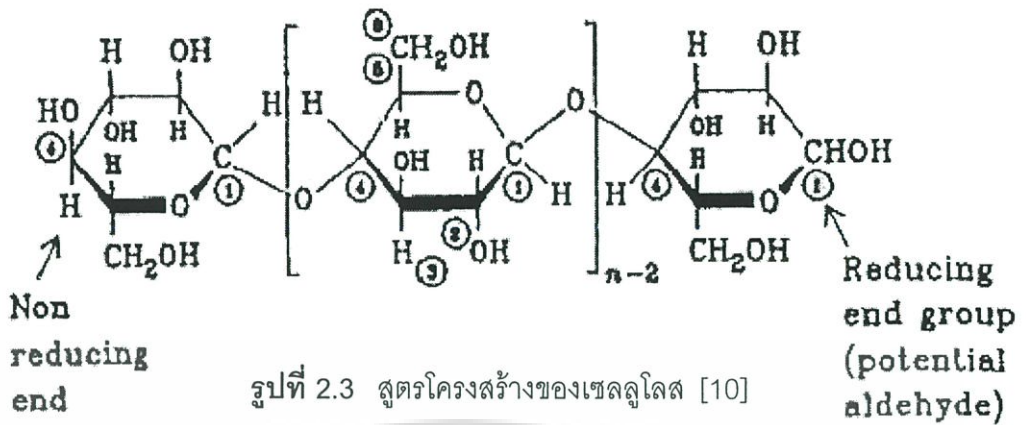
## 2.3 เส้นใยธรรมชาติ [10]

เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ฝ้าย (Cotton) ป่าน (Flax) ปอกระเจา (Jute) และป่านศรนารายณ์ (Sisal) เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ จึงนิยมใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นและเป็นการลดต้นทุนการผลิต โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่น ๆ เช่น ส่วนที่ละลายน้ำได้ และไข (Wax) เป็นต้น

### 2.3.1 เซลลูโลส [10]

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากที่สุดในโลกและพบโดยทั่วไปในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด ปริมาณของเซลลูโลสในพืชต่างชนิดกันมีปริมาณไม่เท่ากัน เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยกลูโคส (Glucose) เป็นหน่วยซ้ำ ๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  โดยสูตรโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.3 และลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.4

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส คือ  $Poly(\beta\text{-}1\rightarrow\text{4-D-anhydroglucopyranose})$  แต่ละหน่วยของเซลลูโลสเรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose,  $C_6H_{12}O_5$ ) เพราะเกิดการขจัดน้ำออกจากกลูโคส เซลลูโลสธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก ประกอบกับการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของหน่วยที่ซ้ำ ๆ กันในโมเลกุล ทำให้เซลลูโลสมีองศาความเป็นผลึกสูง (Degree of crystallinity) คือมีค่าประมาณร้อยละ 60-80 ทำให้คุณสมบัติการหลอมตัวสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ ทนต่อตัวทำละลาย และสารเคมี โดยมีสารเคมีที่มีความสามารถละลายเซลลูโลสได้ไม่กี่ชนิด เช่น กรดกำมะถัน (เข้มข้นมากกว่า 68%) กรดเกลือ (เข้มข้นมากกว่า 41%) สารประกอบแอมโมเนียมจัตราภูมิ (Quaternary ammonium compound) ถ้าเซลลูโลสอยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง รวมทั้งน้ำจะเกิดการบวมตัวเล็กน้อยเท่านั้นในบริเวณของโมเลกุลที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous regions)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส [10]

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส มีดังนี้

1. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ  $1.5 \text{ g/cm}^3$  ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอนจะแปรตามแหล่งที่มา และการปรับปรุงทางเคมี

2. การดูดความชื้น

เซลลูโลสเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบ ๆ จนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น เมื่อเส้นใยฝ้ายมีความชื้นสูงขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การละลาย และความหนืด

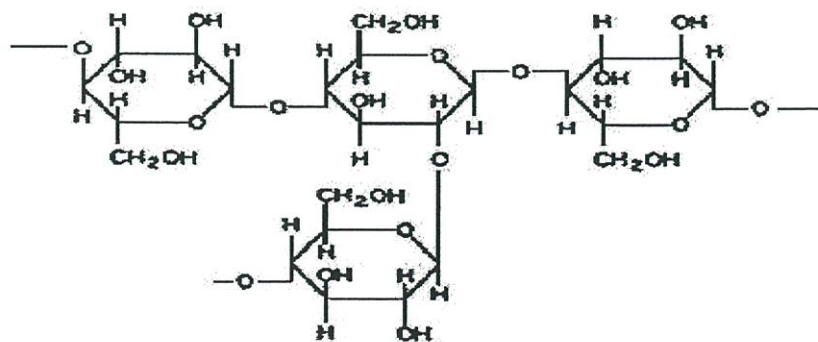
เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดแก่เข้มข้น เช่น 72% ของกรดซัลฟูริก 40% ของกรดไฮโดรคลอริก ในสารละลายกรดแก่ที่อุณหภูมิห้องเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วและปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำ สารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิดที่เข้มข้น เช่น 72% ของซิงค์คลอไรด์ และสารละลายอัลคาไลด์ไฮดรอกไซด์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงบวมตัว ส่วนเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ละลายได้ ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลสและอนุพันธ์ โดยที่ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

#### 2.3.2 เฮมิเซลลูโลส [10, 11]

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสพบร่วมกับเซลลูโลสและลิกนิน เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ สูตรทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสคือ  $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$  และโครงสร้างทางเคมีแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5

ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส มีดังนี้ คือ

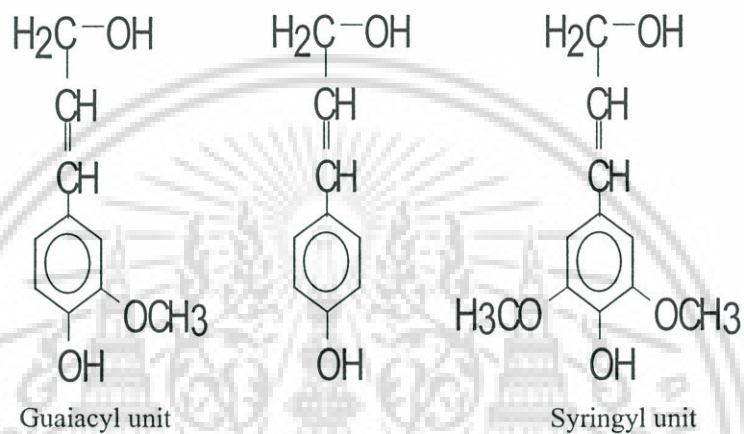
1. เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลคโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) อะราบินอส (Arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกาแลคทูโรนิก (Galacturonic acid) แต่เซลลูโลสจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นกลูโคสอย่างเดียว
2. เฮมิเซลลูโลสจะมีลักษณะสายไซโมเลกุลเป็นไซกิ่ง (Branch chain) แต่เซลลูโลสจะมีสายไซโมเลกุลเป็นเส้นตรง (Linear chain)
3. องศาของการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสจะมีค่าสูงกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10-100 เท่า



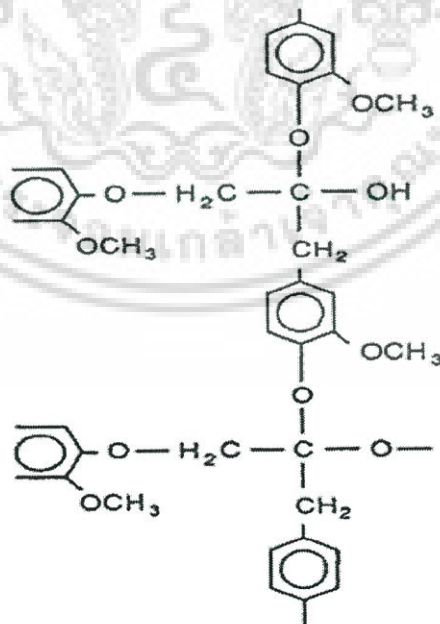
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [11]

### 2.3.3 ลิกนิน [10-12]

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อนของพอลิเมอร์ ซึ่งจะมีทั้งอะลิฟาติก (Aliphatic) และอะโรมาติก (Aromatic) เป็นองค์ประกอบ ทำให้ลิกนินไม่ละลายน้ำและมีความแข็งแรงสูง ลิกนินยังช่วยยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นพืชที่มีปริมาณลิกนินมาก จะมีความแข็งแรง หน่วยที่ซ้ำของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.6 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อนแสดงดังรูปที่ 2.7



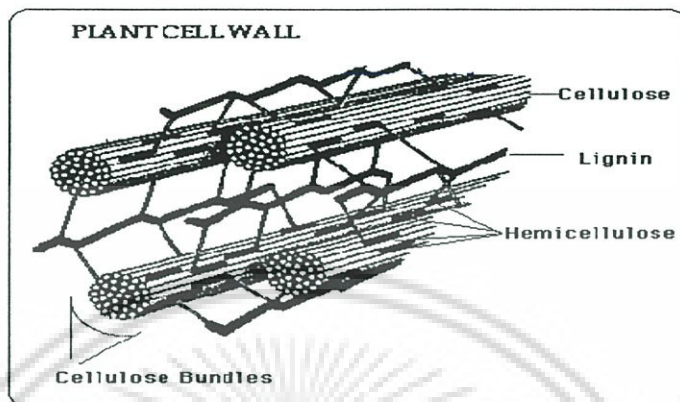
รูปที่ 2.6 หน่วยที่ซ้ำกันของลิกนิน [11]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

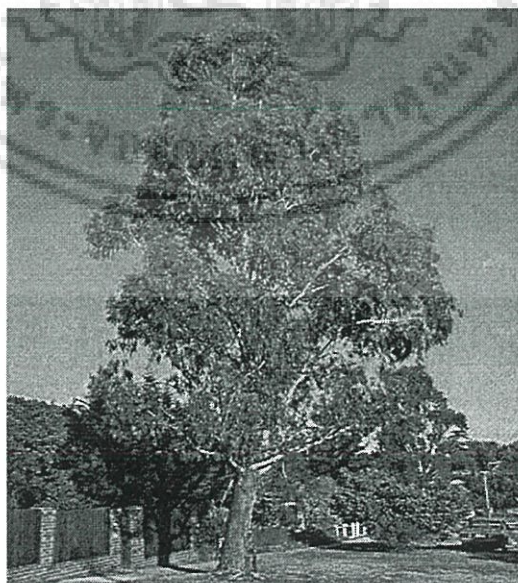
ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินไม่เท่ากันขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในไม้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ [12]

#### 2.4 ยูคาลิปตัส [13]

ยูคาลิปตัสเป็นไม้ที่มีสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมในประเทศ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ ต้นยูคาลิปตัสจะมีลักษณะสูง โตง่าย ปลูกได้ทุก ๆ พื้นที่ สามารถตัดได้ 2-3 ครั้งโดยไม่ต้องปลูกใหม่ จึงได้มีการปลูกต้นยูคาลิปตัสเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งลักษณะของต้นยูคาลิปตัสแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) เป็นต้นยูคาลิปตัสที่ปลูกได้ดีในประเทศไทย โดยลักษณะของไม้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนเปลือกจะเป็นส่วนนอกสุด มีสีซีดหรือสีครีม และจะมีเขตของเนื้อไม้ที่มีสีต่างออกไปมาก คือ ส่วนที่เรียกว่าแก่น (Heartwood) เป็นส่วนที่มีสีน้ำตาลเข้ม และด้านนอกแก่น จะมีสีขาวกว่าเรียกว่า กระจี (Sapwood) ส่วนนี้จะมีควมหนาขึ้นตามอายุของต้นไม้ ส่วนของกระจีสามารถถูกทำลายได้ง่ายโดยแมลง เห็ด และราต่าง ๆ ได้มากกว่าแก่น ถึงแม้ส่วนประกอบของเซลล์และโครงสร้างของทั้งกระจีและแก่นเหมือนกัน แต่การสะสมของสารเคมีโดยกระจีจะถูกซึมเข้าไปได้ง่ายกว่าแก่น และกระจีจะมีสภาวะที่จะถูกซึมซาบโดยสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเยื่อได้เป็นอย่างดี จึงเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมทำกระดาษได้ดี

องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิสที่มีอายุ 3 10 และ 15 ปี พบว่าไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 3 ปีมีปริมาณลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนตาซาน และซีเถ้ามากกว่าไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 10 และ 15 ปี แต่ไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 3 ปีมีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 10 และ 15 ปี ดังนั้นไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิสที่มีอายุ 3 ปี สามารถใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมทำกระดาษ อุตสาหกรรมไม้ปาร์เกต์ และอุตสาหกรรมไม้อัดซีเมนต์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส [13]

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
เพนตาซาน	19.45	17.01	17.15
ซีเถ้า	0.44	0.33	0.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หญ้าแฝก [14]

หญ้าแฝกจัดเป็นหญ้าเขตร้อนที่ขึ้นตามธรรมชาติ กระจายกระจายทั่วไปในสภาพแวดล้อมต่างๆ ซึ่งในประเทศไทยจะพบหญ้าแฝกขึ้นอยู่ตามธรรมชาติในพื้นที่ทั่วไปจากที่ลุ่มจนถึงที่ดอนสามารถขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิด มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria zizanioides* เป็นพืชตระกูลหญ้าขึ้นเป็นกอหนาแน่น เจริญเติบโตโดยการแตกกออย่างรวดเร็ว เส้นผ่านศูนย์กลางกอประมาณ 30 cm ความสูงจากยอดประมาณ 0.5 ถึง 1.5 m ลักษณะใบแคบยาวประมาณ 75 cm ความสูงจากยอดประมาณ 75 cm ความกว้างประมาณ 8 mm ค่อนข้างแข็ง หากนำมาปลูกติดต่อกันเป็นแนวยาวขวางแนวลาดเทของพื้นที่ กอซึ่งอยู่เหนือดินจะแตกกอติดต่อกันเหมือนรั้วต้นไม้ สามารถกรองเศษพืชและตะกอนดิน ซึ่งถูกน้ำชะล้างพัดพามาตกทับถมดินติดอยู่กับกอหญ้าเกิดเป็นคันดินตามธรรมชาติได้ หญ้าแฝกเป็นพืชที่มีระบบรากลึกเจริญเติบโตในแนวตั้งมากกว่าออกทางด้านข้างและมีจำนวนรากมากจึงเป็นพืชที่ทนแล้งได้ดี รากจะประสานติดต่อกันแน่นหนาเสมือนม่านหรือกำแพงใต้ดิน สามารถกักเก็บน้ำและความชื้นได้ ระบบรากแผ่ขยายกว้างเพียง 50 cm โดยรอบกอเท่านั้น ไม่เป็นอุปสรรคต่อพืชที่ปลูกข้างเคียง จัดเป็นมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้ดินมีความชื้นและรักษาหน้าดินเพื่อใช้สำหรับปลูกพืชเศรษฐกิจ ซึ่งการใช้หญ้าแฝกในการอนุรักษ์ดินและน้ำดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายมาก เป็นการนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเกษตรกรรมในเขตพื้นที่การเกษตรน้ำฝนให้มีความมั่นคงและยั่งยืน สามารถนำวิธีการนี้ไปใช้ในพื้นที่อื่น ๆ เพื่อรักษาสภาพแวดล้อมอนุรักษ์สภาพแวดล้อม และอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น พื้นที่สองข้างของทางคลองชลประทานอ่างเก็บน้ำ บ่อน้ำ ป่าไม้ ป้องกันขอบตลิ่ง คอสะพาน และไหล่ถนน เป็นต้น

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาหญ้าสกุล *Vetiveria* อย่างเป็นระบบทางอนุกรมวิธาน ผลการศึกษาปรากฏว่าหญ้าแฝกที่พบในประเทศไทยจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด คือหญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides* Nash) และแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) โดยลักษณะของหญ้าแฝกแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งความแตกต่างของหญ้าแฝกหอม และหญ้าแฝกดอนแสดงในตารางที่ 2.3

1. **หญ้าแฝกหอม หรือหญ้าแฝกลุ่ม หรือหญ้าแฝกบ้าน** (*Vetiveria zizanioides* Nash) พบขึ้นอยู่ทั่วไปในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ สามารถปรับตัวเข้ากับพื้นที่นั้นได้ดี หญ้าแฝกหอมมีใบยาว 45-100 cm กว้าง 0.6-1.2 cm มีหลังใบโค้งปลายใบแบนมีสีเขียวเข้ม เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้ดูมัน ท้องใบออกสีขาวซีดกว่าด้านหลังใบ และเมื่อนำใบส่องดูกับแดดจะเห็นรอยกันขวางในเนื้อใบ (Septum) ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะพื้นใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบ เส้นกลางใบ (Midrib) ฝังอยู่ในตัวแผ่นใบไม่โต หรือเด่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน นีไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจน หญ้าแฝกหอมที่อายุประมาณ 1 ปี จะมีรากที่ยังเล็กได้ประมาณกว่า 1 m ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพของดินและความสมบูรณ์ของพืชในสภาพธรรมชาติดินร่วนปนทรายที่มีการระบายน้ำได้ดี หญ้าแฝกจะให้รากยาวที่สุด

2. **หญ้าแฝกดอน หรือแฝกป่า (*Vetiveria nemoralis* A. Camus)** จะพบได้ทั่วไปในที่ค่อนข้างแล้ง หรือที่ดินระบายน้ำได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะในป่าเต็งรังแต่จะมีน้อยในภาคใต้ สามารถขึ้นได้ดีทั้งในที่แดดปานกลาง หญ้าแฝกดอนมีใบยาว 35-80 cm กว้าง 0.4-0.8 cm ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันสามเหลี่ยมเนื้อใบหยาบ มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูกร้านไม่เหลือบมัน ท้องใบสีเดียวกับหลังใบ แต่มีสีเขียวซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ เส้นกลางใบสังเกตเห็นได้ชัดเจนมีลักษณะแข็งเป็นแกนหนุนทางด้านหลัง โดยทั่วไปหญ้าแฝกที่มีอายุประมาณ 1 ปี จะมีรากเล็กประมาณ 80-100 cm



รูปที่ 2.10 ลักษณะหญ้าแฝก [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของหญ้าแฝกหอมและหญ้าแฝกดอน [14]

หญ้าแฝกหอม	หญ้าแฝกดอน
ถิ่นกำเนิด - ตอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย - มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์ทั่วไป	ถิ่นกำเนิด - เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศไทย ลาว เขมร และเวียดนาม - กระจายพันธุ์อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ไม่มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์
ลักษณะกอ - เป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง - สูงประมาณ 150-200 cm - มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำต้นได้	ลักษณะกอ - เป็นพุ่ม ใบยาวปลายจะแผ่โค้งลงคล้ายกอตะไคร้ ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม - สูง 100-150 cm - ปกติไม่มีการแตกตะเกียง และแขนงลำต้น
ใบ - ยาว 45-100 cm กว้าง 0.6-1.2 cm - ใบสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ท้องใบออกสีขาวมีรอยกั้นขวาง เนื้อใบส่องกับแดดเห็นชัดเจน - เนื้อใบค่อนข้างเนียนมีไขเคลือบมากทำให้ดูนุ่มมัน	ใบ - ยาว 35-80 cm กว้าง 0.4-0.8 cm - ใบสีเขียวซีดหลังใบพับเป็นสันแข็งสามเหลี่ยม ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบแต่ซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้น ในเนื้อใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ - เนื้อใบหยาบ มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูร่วนไม่เคลือบมัน
ช่อดอกและดอก - ช่อดอกสูง 150-250 cm - ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง - ดอกย่อยส่วนใหญ่ไม่มีระยางค์แข็ง	ช่อดอกและดอก - สูง 100-150 cm - มีได้หลายสีตั้งแต่สีขาวครีม สีม่วง - ดอกย่อยมีระยางค์แข็ง
เมล็ด - ขนาดโตกว่าหญ้าแฝกดอนเล็กน้อย	เมล็ด - ขนาดเล็กกว่าหญ้าแฝกหอม
ราก - มีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหย อยู่เฉลี่ย 1.4-1.6 % ของน้ำหนักแห้ง - โดยทั่วไปรากหยั่งลึกประมาณ 100-300 cm	ราก - ไม่มีความหอม - รากสั้นกว่า โดยทั่วไปรากหยั่งลึกประมาณ 80-100 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.1 การใช้ประโยชน์หญ้าแฝก [14]

จุดประสงค์หลักในการปลูกหญ้าแฝกก็เพื่อใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ แต่จริง ๆ แล้วใบ ลำต้น และรากของหญ้าแฝกยังสามารถที่จะนำไปใช้ทำอย่างอื่นได้อีก ดังนี้

### 2.5.1.1 การใช้ประโยชน์จากใบหญ้าแฝกสำหรับงานศิลปหัตถกรรม

หญ้าแฝกที่สามารถนำมาใช้ในงานหัตถกรรม ได้แก่ กลุ่มหญ้าแฝกหอม (*Vetiveria zizanioides* Nash) ซึ่งมีใบมันและยาว เมื่อโดนน้ำจะนิ่ม

งานหัตถกรรมที่ใช้หญ้าแฝกจะเป็นงานประเภทเครื่องจักรสาน เช่น

- ทำเป็นตะกร้า และภาชนะ ได้แก่ ตะกร้า กระจาด และภาชนะรองต่าง ๆ
- ทำเป็นเครื่องตกแต่งบ้าน ได้แก่ นาฬิกาแขวนกรอบรูป โป๊ะไฟ ของตั้งโชว์
- ทำเป็นเครื่องประดับ ได้แก่ กระเป๋า หมวก เข็มขัด เข็มกลัดติดเสื้อ
- ทำเป็นของใช้สำนักงาน ได้แก่ แฟ้มเอกสาร ปกไดอารี่



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ศิลปหัตถกรรมจากหญ้าแฝก [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุเพาะเห็ด

ใบของหญ้าแฝกมีองค์ประกอบทางเคมี พวกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และโปรตีน ทยาบ รวมทั้งแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เชื้อราบางชนิดสามารถเจริญเติบโตในกระบวนการของการหมักได้ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเพาะเห็ดได้ เห็ดที่ขึ้นได้ดีในวัสดุเพาะที่เตรียมจากต้นและใบแฝก ได้แก่ เห็ดนางรม เห็ดภูฐาน เห็ดนางฟ้า เห็ดเป๋าฮื้อ และเห็ดหอม

### 2.5.1.3 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุหมักหลังคั่ว

คนไทยใช้ส่วนต้น และใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุหมักหลังคั่วเช่นเดียวกับการใช้ใบจาก ก่อนที่จะเปลี่ยนมาใช้ใบหญ้าคาซึ่งหาซื้อได้ง่าย แต่หญ้าแฝกเป็นวัสดุหมักหลังคั่วที่มีคุณสมบัติดีกว่าการใช้หญ้าคามาก เพราะส่วนลำต้นและใบของหญ้าแฝกมีไขเคลือบ มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว และมักจะไม่ถูกแมลงทำลาย

### 2.5.1.4 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นปุ๋ยหมักและพืชคลุมดิน

ต้นและใบหญ้าแฝกจะย่อยสลายเป็นปุ๋ยหมักอย่างสมบูรณ์ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยุ่ย สีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ คำนวณได้ว่าปุ๋ยหมักจากใบหญ้าแฝก 1 ตันเทียบเท่ากับแอมโมเนียมซัลเฟตได้ 43 กิโลกรัม โดยมีแนวโน้มว่าปุ๋ยหญ้าแฝกหมักมีปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น (โดยมีค่าเฉลี่ย 0.86 0.29 1.12 0.55 และ 0.41% ตามลำดับ) และมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.0 นอกจากนี้ปุ๋ยหมักจากต้นและใบหญ้าแฝกยังให้สารปรับปรุงดินหรือกรดฮิวมิคอีกด้วย

## 2.6 การเตรียมเส้นใยไม้ [2, 15, 18, 22]

การเตรียมเส้นใยไม้เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในพีวีซีคอมโพสิตสามารถเตรียมได้ 3 วิธี คือ

1. กระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulp; MP) เป็นการใช้แรงทางกลเพื่อให้ได้เส้นใยไม้ที่มีขนาดต่าง ๆ กันตามที่ต้องการ เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการเชิงกล เช่น เครื่องบด (Grinding machine)

2. กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Pulp; TMP) เป็นกระบวนการที่ใช้ทั้งความร้อนและแรงทางกล เริ่มจากการนำชิ้นไม้เข้าไปในเครื่อง Defibrators หนึ่งไอน้ำภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันไอ จนอุณหภูมิไอน้ำสูงกว่า 140 °C ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ลิกนินอ่อนตัว เรียกว่า จุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition point) หรือ จุดอ่อนตัว (Softening point) แล้วจึงทำการบดชิ้นไม้ด้วยวิธีการเสียดสี (Attrition action) ของเครื่อง Defibrators ซึ่งประกอบด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นร่อง 2 จาน โดยจานหนึ่งหรือ 2 จาน หมุนสวนทางเสียดสีกันให้ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองแตกแยกออกเป็นเส้นใย หรือกลุ่มของเส้นใย ผลผลิตของเส้นใยได้ ประมาณ 90–95 % ขึ้นอยู่กับสภาวะในการแยก ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันไอน้ำ เวลาในการนึ่งชิ้นไม้ และเวลาในการบดเยื่อ จะมีความผันแปรไปขึ้นอยู่กับชนิดไม้ ความหนาแน่นของไม้ ความชื้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นไม้

3. กระบวนการทางเคมี (Chemical Pulp; CP) เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีในการเตรียมเส้นใย โดยนำชิ้นไม้เข้าไปในถังปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิ และความดันสูงประมาณ 125-180 °C ซึ่งไม่มีกระบวนการเชิงกลในการแยก แต่ใช้สารเคมีที่มีสภาวะเป็นด่าง เรียกว่า Alkaline process หรือ สารเคมีที่มีสภาวะเป็นกรด เรียกว่า Acidic (sulfite) process เข้าทำปฏิกิริยาละลายลิกนินที่อ่อนตัว (Delignification) ออกจากชิ้นไม้จนได้เป็นเส้นใย ได้ผลผลิตเพียง 40-60% ระยะเวลาที่ใช้มากกว่า 1–5 ชั่วโมง ต้นทุนสูง แต่เยื่อที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่าเนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะถูกแยกออกเกือบทั้งหมด ลักษณะของเส้นใยจะยุบและอ่อนตัวจากเดิมที่มีความแข็งกระด้าง รูปร่างทรงกลมกลายเป็นลักษณะคล้ายโบริบบิ้น มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเพื่อเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการของกระบวนการทำกระดาษ

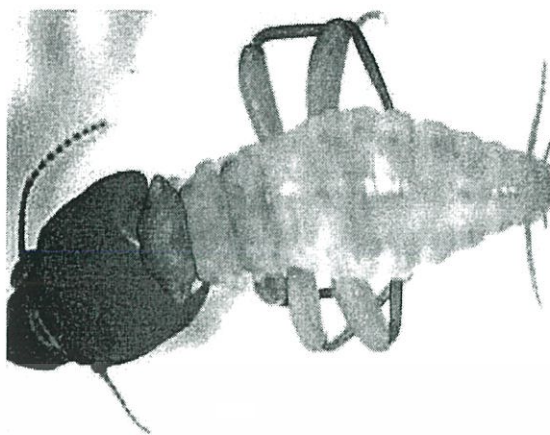
## 2.7 ปลวก [2]

ปลวกที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ หมายถึง ปลวกที่พบเข้าทำลายความเสียหายให้แก่ไม้ที่ใช้ประโยชน์ในอาคารบ้านเรือนทั้งในเขตเมือง และชนบท สำหรับเขตเมืองตามอาคารบ้านเรือน ที่อยู่อาศัย หรือตามหมู่บ้านจัดสรรต่าง ๆ พบว่า ปลวกที่เข้าทำลายความเสียหายมากที่สุดกว่า 90% ของที่อยู่อาศัยทั้งหมด ได้แก่ ปลวก *Coptotermes gestroi* Wasmann เป็นปลวกที่อยู่ในวงศ์ Rhinotermitidae

ปลวกที่ใช้ในการทดลอง คือ ปลวก *Coptotermes gestroi* Wasmann ซึ่งมีลักษณะเด่นดังนี้

- จะมีช่องเปิดบริเวณด้านหน้าขนาดใหญ่กว่าปลวกชนิดอื่น
- ปลวกผลิตสารเคมีที่เป็นของเหลวสีขาวพุ่งออกมาเพื่อป้องกันตัวเวลามีภัย
- เป็นปลวกที่ก่อความเสียหายต่อไม้ตามอาคารบ้านเรือนสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานราชการเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ลักษณะของปลวก *Coptotermes gestroi* Wasmann [2]

วิธีการศึกษาความทนทานต่อการเข้าทำลายของปลวกใต้ดินสามารถดำเนินการทดสอบได้ 2 วิธี คือ

1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการบังคับ โดยการนำชิ้นงานที่ทดสอบใส่ไว้กล่องพลาสติกที่มีปลวก *Coptotermes gestroi* อยู่เป็นระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 4 สัปดาห์
2. การทดสอบในภาคสนามโดยวิธีการทดสอบแบบเลือกอิสระ โดยชิ้นงานที่ทดสอบจะใส่ในบ่อซีเมนต์ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm สูง 60 cm รองพื้นด้วยทรายหยาบ ปลวกที่ใช้ในการทดสอบ คือ ปลวก *Coptotermes gestroi* Wasmann ระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน

การบันทึกผล และประเมินการทดสอบโดยการประเมินความเสียหายบนชิ้นงานทดสอบด้วยสายตา (Visual rating) บันทึกน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบและคำนวณอัตราการเข้าทำลาย

## 2.8 การนำกลับมาใช้ใหม่ [3]

ปัจจุบันของเสียจากพลาสติกมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถจัดประเภทของของเสียจากพลาสติกตามแหล่งต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. พลาสติกทิ้ง (Waste plastics) ประกอบด้วยเรซินหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องนำมาผ่านขั้นตอนอีกครั้งหนึ่ง หรือต้องทิ้ง

2. ของเสียจากภาคอุตสาหกรรมพลาสติก (Industrial waste plastics) ประกอบด้วยของเสียจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตตั้งแต่การผลิตเรซิน การตกแต่ง การผสม การประกอบจนถึงการจำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พลาสติกทิ้งจากผู้บริโภค (Postconsumer waste plastics) ซึ่งมีปริมาณ 90% ของของเสียทั้งหมดที่มาจากพลาสติก

4. พลาสติกที่ได้จากการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน (Nuisance plastics) เป็นของเสียพลาสติกที่ไม่สามารถนำไปแปรรูปใหม่ให้เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้

5. เศษพลาสติก (Scrap plastics) เป็นของเสียพลาสติกที่สามารถนำไปแปรรูปใหม่ให้เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นำมาใช้ประโยชน์ได้

การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) เป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะจากพลาสติกที่น่าสนใจที่สุดจนกลายเป็นอุตสาหกรรมใหม่ การนำกลับมาใช้ใหม่สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. การนำกลับมาใช้ใหม่ปฐมภูมิ (Primary recycling) เป็นการนำเอา Scrap plastics มาผ่านกระบวนการเช่นเดียวกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยใช้กรรมวิธีที่ได้มาตรฐาน ใช้เฉพาะเทอร์โมพลาสติกเท่านั้นที่นำกลับมาใช้ได้โดยตรง แต่ต้องสะอาด การกระทำแบบนี้จะทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนหรือบางกรณีมีการเกิดกิ่งสาขา และโครงสร้างร่างแห

2. การนำกลับมาใช้ใหม่ทุติยภูมิ (Secondary recycling) เป็นการนำเอาพลาสติกที่ผู้บริโภคใช้แล้วทิ้ง หรือขยะพลาสติกจากอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วยพลาสติกหลาย ๆ ชนิดมาหลอมรวมกันทำผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสมบัติที่ดีนัก เช่น ท่อระบายน้ำ กระดาษตันไม้ เป็นต้น

3. การนำกลับมาใช้ใหม่ตติยภูมิ (Tertiary recycling) เป็นการนำเอาขยะพลาสติกมาแยกสลายด้วยความร้อน ได้สารประกอบทางเคมีที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบง่าย ๆ กระบวนการนี้ไม่ก่อให้เกิดอากาศเป็นพิษและลดขยะพลาสติกได้สูงถึง 90% ทั้งยังได้สารเคมีที่นำมาใช้ประโยชน์ได้อีก ได้แก่ น้ำมันเบา ก๊าซ และสารประกอบอินทรีย์

4. การนำกลับมาใช้ใหม่จตุรภูมิ (Quaternary recycling) เป็นการมุ่งเอาพลังงานจากขยะพลาสติกมาใช้โดยการเผาพลาสติกให้เป็นขี้เถ้า (Incineration) หรือการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่จะพยายามประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยที่มีการศึกษา ได้แก่ หญ้าแฝก (Vetiver grass) [15] ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) [18, 22] สน (Pine wood) [23] และป่านศรนารายณ์ (Sisal) [24] เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยมีเอกสารนี้ ดั่งนี้ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นวภรณ์ อนันตธนวินิชย์ และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติเพื่อใช้เป็นไม้เทียม โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองตอน คือ พอลิพรอพิลีนกับผงหญ้าแฝกที่เตรียมด้วยวิธีทางเชิงกล (VMP) ซึ่งทำการศึกษาถึงผลของปริมาณผงหญ้าแฝก ขนาดของผงหญ้าแฝก และปริมาณสารช่วยผสม Maleic anhydride-graft-polypropylene (MAPP) และพีวีซีกับเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี (VCP) ซึ่งทำการศึกษาผลของปริมาณและขนาดของเส้นใยหญ้าแฝก ผลการทดลองของพอลิพรอพิลีนกับผงหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (VMP) พบว่าปริมาณการเติมผงหญ้าแฝก ขนาด 20-50 mesh ในปริมาณ 30 phr ให้สมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด แต่สมบัติเชิงกลที่ได้มีแนวโน้มไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากผงหญ้าแฝกทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) พบว่าการใส่สารช่วยผสม MAPP 3% ของน้ำหนักผงหญ้าแฝกทำให้มีการยึดติดกันระหว่างพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์กับผงหญ้าแฝกดีขึ้น และมีช่องว่างระหว่างวัฏภาคลดลง ส่วนผลการทดลองของพีวีซีกับเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี (VCP) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยหญ้าแฝกในพีวีซีคอมโพสิตทำให้ความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ปริมาณเส้นใยหญ้าแฝกขนาด 20-50 mesh ในปริมาณ 30 phr มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จาก SEM พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยหญ้าแฝกมากขึ้นทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเป็นผลให้พีวีซีเมตริกซ์ไม่สามารถแทรกตัวระหว่างเส้นใยหญ้าแฝกและเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานคอมโพสิตเนื่องจากพีวีซีบางส่วนเกิดการสลายตัวทางร้อน

วิไลพร เจตน์จันทร์ และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาไวนิลวูด (Vinyl wood) ที่เตรียมได้จากพีวีซี ผงไม้ และสารเติมแต่งต่าง ๆ ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพ สารหล่อลื่น สารช่วยกระบวนการผลิต สารเพิ่มความต้านแรงกระแทกและสารตัวเติม เป็นต้น จากนั้นผ่านกระบวนการอัดรีดและผลิตเป็นเม็ด แล้วนำเม็ดที่ได้ไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการอัดรีด เช่น ประตู วงกบ และบัว เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าไวนิลวูดมีสมบัติเด่นหลายประการที่สามารถทดแทนไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ว่าจะเป็นเรื่องความทนทานต่อความชื้น ทนทานต่อการเข้าทำลายของปลวก ทนไฟ น้ำหนักเบา สวยงาม และราคาไม่แพง ยังมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง คือติดตั้งง่าย สามารถเลื่อย ตัด ไส เจาะ ตอกตะปู และติดกาวได้โดยไม่ต้องอาศัยช่างฝีมือที่ชำนาญเป็นพิเศษ ไวนิลวูดจึงเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในงานอาคารและสถาปัตยกรรมเนื่องจากสามารถทดแทนไม้ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วรรณิยา ชาญณรงค์ [17] ได้ทำการศึกษาพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากพีวีซีกับเส้นใยไม้ยางพารา (Natural rubber fibers) ที่เตรียมได้จากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) โดยผสมในเครื่องผสมความเร็วสูง แล้วนำส่วนผสมไปผสมแบบหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) จากการศึกษาพบว่า ปริมาณไม้ที่เหมาะสมในการเติมในพีวีซีคอมโพสิต คือ 30-40 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต พบว่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกดลดลง ปริมาณ DOP ที่เหมาะสมในการเติมในพีวีซีคอมโพสิตคือ 5 phr

สมภาพ เลิศลักษณ์กุล [18] ได้ทำการศึกษาพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากพีวีซีกับเส้นใยยูคาลิปตัส โดยผสมสูตรด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง แล้วนำส่วนผสมไปผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว คือ  $170^{\circ}\text{C}$  เส้นใยไม้ที่ขนาด 35-50 mesh ในปริมาณ 30 phr เหมาะสมที่สุดในการเติมในพีวีซีคอมโพสิต เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิตทำให้พีวีซีคอมโพสิตนิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสที่ 3% การยืดมีค่าลดลง พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อนลดลงเมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น ปริมาณ DOP ที่เหมาะสมในการผลิตพีวีซีคอมโพสิตคือ 10 phr

Premalal และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน (PP) กับผงแคลบ และคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับทาลค์ม โดยใช้เครื่อง Brabender Plasticoder รุ่น PLE 331 ที่มี Mixer ต่ออยู่ โดยควบคุมอุณหภูมิที่  $180^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบ 50 rpm ซึ่งทำการผสมสารตัวเติม 0 15 30 45 และ 60 % โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press) ที่อุณหภูมิ  $190^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที และทำให้เย็นภายใต้ความดันนั้นเป็นเวลา 4 นาที จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองเพิ่มขึ้นในแต่ละคอมโพสิตทำให้มอดุลัส และความแข็งแรงโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง คอมโพสิตที่ใช้แคลบเป็นสารตัวเติมมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรงโค้งงอต่ำกว่าคอมโพสิตที่ใช้ทาลค์มเป็นสารตัวเติม แต่คอมโพสิตที่ใช้แคลบเป็นสารตัวเติมมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lin และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาสสมบัติเชิงกล และการดูดซับน้ำของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับผงไม้ โดยใช้ผงไม้ที่มีขนาด 20 40 80 120 และ 160 mesh ปริมาณผงไม้ 0-40 % โดยน้ำหนัก จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 23 60 และ 100 °C พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณของผงไม้ ขนาดของผงไม้ การปรับปรุงพื้นผิวของไม้ และอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีค่าลดลงที่ทุก ๆ สูตรของการผสม ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีแนวโน้มเหมือนกันที่อุณหภูมิ 60 และ 100 °C สำหรับค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากที่แช่ในน้ำทั้ง 3 อุณหภูมิ แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่แช่สูงขึ้น

ธีรพัฒน์ อุณหโชค และพจนีย์ ศรธรรมลี [21] ได้ทำการศึกษาสสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเส้นใยผักตบชวา (Hyacinth fibers) ที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณเส้นใยต่อพอลิเมอร์ผลของสารช่วยผสม Polyethylene-graft-Maleic anhydride (PE-g-MA) ต่อปริมาณเส้นใย และขนาดของเส้นใยผักตบชวา โดยผสมสูตรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งกดเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและองศาความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยผักตบชวาเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง จากการศึกษาผลของสารช่วยผสมพบว่าคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อใส่สารช่วยผสม PE-g-MA เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อใส่สารช่วยผสม PE-g-MA ปริมาณสารช่วยผสม PE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 3% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักเส้นใย และขนาดของเส้นใยผักตบชวาที่เหมาะสม คือ 50-80 mesh ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จาก SEM พบว่าสารช่วยผสม PE-g-MA ช่วยให้การยึดเกาะระหว่างพอลิเอทิลีนเมตริกซ์กับเส้นใยดีขึ้น

ปิยะวรรณ เจียวกิก และพงศศักดิ์ แพน้อย [22] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจาก 2 กระบวนการ คือกระบวนการทางเคมี (CP) และกระบวนการทางความร้อนเชิงกล (TMP) โดยศึกษาผลของปริมาณเส้นใย (0-40 phr) และผลของสารช่วยผสม MAPP พบว่าปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดมีค่าลดลง ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม คือ 20 phr เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม MAPP ทำให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง ปริมาณสารช่วยผสม MAPP ที่เหมาะสมคือ 3 % โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP พบว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าเส้นใย TMP มีการกระจายตัวในคอมโพลีเมอร์ดีกว่า และให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า เมื่อพิจารณาองศาความเป็นผลึกพบว่าปริมาณเส้นใยไม่ไม่มีผลต่อค่าองศาความเป็นผลึก แต่ปริมาณสารช่วยผสม MAPP มีผลทำให้ค่าองศาความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น

Kokta และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพลีเมอร์ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับไม้สนที่มีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยไม้ด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิพรอพิลีนกับไม้สน โดยใช้พอลิเมทิลีนพอลิฟีนิลไอโซไซยาเนต (PMPPIC) สารคู่ควบไซเลน (A-172, A-174 และ A-1100) และไฮอีโพลีน (Epolene wax) เป็นสารปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยก่อนการเติมในคอมโพลีเมอร์ โดยผสมสูตรด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ขนาดของเส้นใยที่เหมาะสมในการเติมในคอมโพลีเมอร์ คือ 20 mesh การใช้ PMPPIC กับ Epolene wax เป็นสารปรับสภาพผิวเส้นใยก่อนเติมในคอมโพลีเมอร์ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุด

Joseph และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพลีเมอร์ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเส้นใยป่านครนารายณ์ (Sisal fiber) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึง ได้แก่ กระบวนการผสมเส้นใยกับพอลิเมอร์ ความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใย และลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในพอลิเมอร์ โดยการผสมแบบสารละลาย (Solution mixing) เกิดความเสียหายของเส้นใยน้อยกว่าการผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ความแข็งแรงดึงของคอมโพลีเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เมื่อนำคอมโพลีเมอร์มาอัดขึ้นรูปใหม่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มตามจำนวนครั้งที่ฉีด เนื่องจากผลของความร้อนระหว่างกระบวนการขึ้นรูปทำให้เกิดการสลายตัวของพื้นผิวของเส้นใย จึงทำให้พอลิเอทิลีนเมตริกซ์ยึดติดกับเส้นใยดีขึ้น คอมโพลีเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยตามแนวแรงมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าคอมโพลีเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง เส้นใยที่มีความยาว 6 mm ทำให้คอมโพลีเมอร์มีค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด

พิชัย มนต์พัฒนาและศิริพงศ์ โรจนวีระ [25] ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยใช้ขุยมะพร้าวและฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นสารตัวเติม จากการศึกษาพบว่าการเติมขุยมะพร้าวใน HDPE และ PP ทำให้ค่ามอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ส่วนความแข็งแรงดึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลง ส่วนการเติมฟางข้าวใน HDPE และ PP ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใส่สารตัวเติมมากกว่า 10 phr จะพบปัญหาในการขึ้นตอนการขึ้นรูป

Simpson และ Selke [26] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากขวดพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled polypropylene, rPP) กับเส้นใยไม้ (Wood fiber) และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนใหม่ (Virgin polypropylene) กับเส้นใยไม้ โดยใช้ปริมาณเส้นใยไม้ 0 30 40 และ 50% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นที่นำกลับมาใช้ใหม่กับเส้นใยไม้มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนใหม่กับเส้นใยไม้ แต่การเติมเส้นใยไม้มากกว่า 30% โดยน้ำหนักทำให้ความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากสารเติมแต่งที่มีอยู่ในขวดพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟส

George และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเส้นใยสับปะรด โดยศึกษาผลของขนาดเส้นใย ผลของปริมาณเส้นใย และผลของวิธีการผสม 2 วิธี คือ การผสมแบบสารละลายโดยนำเส้นใยสับปะรดใส่ลงในสารละลายพอลิเอทิลีน และการผสมแบบหลอมเหลวโดยนำเส้นใยสับปะรดใส่ลงในพอลิเอทิลีนที่หลอมเหลวในเครื่อง Brabender จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้น โดยคอมโพสิตที่ผสมด้วยวิธีการผสมแบบสารละลายมีสมบัติที่สูงกว่า คอมโพสิตที่เติมเส้นใยที่มีความยาวประมาณ 10 mm ให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าคอมโพสิตที่เติมเส้นใยที่มีความยาว 2 และ 6 mm คอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางตามแนวแรงมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่าคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง และการจัดเรียงตัวของเส้นใยอย่างกระจัดกระจาย

รัชดา ขวัญตน [28] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากขวดน้ำดื่ม HDPE กับเส้นใยอ้อย โดยทำการศึกษาผลของปริมาณ ผลของขนาดเส้นใยอ้อย และผลของสารช่วยผสม 2 ชนิด คือสารช่วยผสม PE-g-AA และ PE-g-MAH จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยอ้อยที่เติมในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลง ขนาดของเส้นใยอ้อยไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต สารช่วยผสม PE-g-AA และ PE-g-MAH ที่ใช้ไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจากสารช่วยผสมทั้งสองเกิดพันธะชนิดเดียวกัน

กมลรัตน์ คูรัตนรัชชวาล และดุจดาว ปรีชาวงศ์ [29] ได้ทำการศึกษาผลของเส้นใยอ้อยที่ใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอ-ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์ม โดยใช้เส้นใยอ้อยที่ไม่ปรับสภาพผิว และเส้นใยอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วยการฉายรังสีแล้วต่อกิ่งด้วยมัลติฟังก์ชันนัลมอนอเมอร์ (Multifunctional monomer) ผสมสูตรที่ได้แบบหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากการศึกษพบว่าคอมโพสิตที่เติมเส้นใยอ้อยทั้งปรับและไม่ปรับสภาพผิวมีสมบัติความแข็งแรงดึงและสมบัติทางด้านความร้อนดีขึ้น ปริมาณมัลติฟังก์ชันนัลมอนอเมอร์ที่ 1% โดยน้ำหนักทำให้คอมโพสิตมีสมบัติต่าง ๆ ดีที่สุด

นันทพร พันธุ์ภักดี และเรวดี สกุลอาริยะ [30] ได้ทำการศึกษาสมบัติพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยอ้อย โดยศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยอ้อยเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวและการยึดติดโดยใช้ไขอีโพลีน (Epolene wax) 10% โดยน้ำหนัก การฉายรังสี 10 kGy และ Trimethylol propane triacrylate (TMPTA) 10% โดยน้ำหนักเป็นมัลติฟังก์ชันนัลมอนอเมอร์ ทำการผสมสูตรด้วย Brabender และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วนำคอมโพสิตไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากการศึกษพบว่าคอมโพสิตที่เติมเส้นใยอ้อย 10% โดยน้ำหนักทั้งที่มีปรับและไม่ปรับสภาพพื้นผิวมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าพอลิเมอร์ คือ ค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัส โดยสามารถสรุปการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวข้างต้นได้ดังนี้

1. คอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) มีสมบัติเชิงกลมากกว่าคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี (CP) เพราะที่เส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกลเป็นเส้นใยที่มีความแข็ง มีความคงรูปเป็นเส้นใย และมีการกระจายตัวในคอมโพสิตดีกว่า
2. คอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่มีการปรับปรุงพื้นผิว เช่น การใช้สารคู่ควบ และสารช่วยผสมช่วยให้การยึดติดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับเส้นใยดีขึ้น ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้น
3. คอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยตามแนวแรงมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride); PVC) VINYL THAI (PUBLIC) CO., LTD.  
ชนิด Suspension เกรด <sup>®</sup>266 GS  
- Viscosity index 109 dm<sup>3</sup>/kg  
- K value 66
2. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer) THAI PLASTIC AND CHEMICAL  
Ca-Zn stabilizer (PUBLIC) CO., LTD.
3. ซีรีคลอร์ (Cereclor) พลาสติกไซเซอร์ เกรด <sup>®</sup>S52 ICI ASIATIC CHEMICAL CO., LTD.
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) THAI PLASTIC AND CHEMICAL  
(PUBLIC) CO., LTD.
5. น้ำมัน Epoxydized soybean oil SRITHEP THAI CO., LTD.  
เกรด VIKOFLEX <sup>®</sup>7170
6. ไดออกทิลฟทาเลต (Dioctyl phthalate; DOP) SOUTH CITY PETROCHEM CO., LTD.
7. ไพพอลิเอทิลีน (Polyethylene wax) P&M ASSOCIATE CO., LTD.
8. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) SURINT OMYA CHEMICALS  
เกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริก 1% (Omyacarb <sup>®</sup>  
2T) (THAILAND) CO., LTD.  
- ขนาดอนุภาค 2.7 μm  
- ความถ่วงจำเพาะ 2.7 g/cm<sup>3</sup>
9. ทัลคัม (Talcum) LIAONING METAL AND MINERALS  
IMP & EXP CORP.  
เกรด Talc powder no. 1  
- SiO<sub>2</sub> 60% appr  
- MgO 30% appr  
- ขนาดอนุภาค 45 μm  
- ความถ่วงจำเพาะ 2.75 g/cm<sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10. ซิลิกาสังเคราะห์ชนิดตกตะกอน

(Synthetic precipitated silica)

เกรด Hi-Sil<sup>®</sup> 255-S

- pH (5% water suspension)	6.4-7.2
- Moisture	7.5% max
- Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Hydrate Basis)	2.0% max
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Hydrate Basis)	0.5% max
- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Hydrate Basis)	0.1% max
- SiO <sub>2</sub> (Hydrate Basis)	88% max
- ความถ่วงจำเพาะ	2.2 g/cm <sup>3</sup>
- BET surface area	150-180 m <sup>2</sup> /g
- ขนาดอนุภาค	60-80 μm

## 11. เส้นใยยูคาลิปตัส (Eucalyptus fibers)

ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้

สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้

## 12. เส้นใยหญ้าแฝก (Vetiver grass fibers)

ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้

สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้

- หญ้าแฝกดอน พันธุ์ราชบุรี

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) : Lab Tech Engineering Co., Ltd. รุ่น 0023
2. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) : Gebrüder HAAKE GmbH Co. Ltd. "ThermoHaake Polydrive" รุ่น 003-3411
3. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) : Lab Tech Engineering Co., Ltd.
4. เครื่องบดพลาสติก (Grinder) : Bosco Engineering Co., Ltd.
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) : Llyod Instrument Co., Ltd. รุ่น LR 30K
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod impact tester) : Yasuda Seiki Seisakusho Co., Ltd. รุ่น 258-PC
7. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์ดี (Hardness tester, Shore D) : Intro Enterprise Co., Ltd. "Societa Per Azioni" รุ่น Alsfaar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA (Dynamic mechanical thermal analyzer) : Rheometric Scientific Co., Ltd. รุ่น DMTA-V
9. เครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer) : Parkin Elmer Instrument Co., Ltd. รุ่น Pyris 1 TGA HT
10. เครื่องทดสอบอุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน HDT (Heat distortion temperature) :Yasuda Seiki Seisakukho Co., Ltd.
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) : LEO Co., Ltd. รุ่น 1455 VP
12. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) : Retsch Co., Ltd. รุ่น 01409023 พร้อมกับตะแกรงมาตรฐานขนาด 20 และ 50 mesh
13. เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity balance)
14. ตู้อบแบบอากาศร้อน : MEMERT รุ่น UM 400
15. เดซิเคเตอร์

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 เส้นใยธรรมชาติ

##### 3.3.1.1 การเตรียมเส้นใยธรรมชาติ

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาเส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด คือ หญ้าแฝกและยูคาลิปตัส ซึ่งเตรียมได้จาก 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulp; MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Pulp; TMP) ซึ่งสามารถเตรียมได้ดังนี้

##### ก. กระบวนการเชิงกล มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นไม้ที่ล้างสะอาดไปบดด้วยเครื่องบด
2. ทำการแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อนขนาด 20 และ 50 mesh เพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย
3. นำเส้นใยไม้ที่มีขนาด 20-50 mesh ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน หรือจนได้น้ำหนักเส้นใยไม้คงที่ แล้วนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปผสมกับพอลิเมอร์

##### ข. กระบวนการความร้อนเชิงกล มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเส้นใยไม้ที่ได้จากกรรมป่าไม้ ซึ่งเตรียมโดยนำชิ้นไม้ที่ล้างสะอาดไปเข้าเครื่อง Defibrators ให้ความร้อนกับชิ้นไม้ด้วยไอน้ำภายใต้ความดันไอ จนกระทั่งอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงกว่า 140 °C จากนั้นทำกรบดชิ้นไม้ให้แยกออกจากกันภายใต้อุณหภูมิ และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันสูง (การบดใช้วิธีการเสียดสีของเครื่อง Defibrators ซึ่งประกอบด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นร่อง 2 จาน โดยจานหนึ่ง หรือสองจานหมุนสวนทางเสียดสีกัน) โดยให้ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองแตกแยกออกเป็นเส้นใยหรือกลุ่มเส้นใย ประมาณ 90–95 % ขึ้นอยู่กับสภาวะในการแยกเยื่อ ได้แก่ อุณหภูมิไอน้ำ เวลาในการการบดชิ้นไม้

2. ทำการแยกขนาดเส้นใยไม้ด้วยเครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อนขนาด 20 และ 50 mesh เพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย
3. นำเส้นใยไม้ที่มีขนาด 20-50 mesh ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน หรือจนกว่าน้ำหนักเส้นใยไม้คงที่ แล้วนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปผสมกับพอลิเมอร์

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) ที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [31]

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอบแห้ง				มาตรฐาน
	VMP	VTMP	EMP	ETMP	
1. การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซิน (Alcohol-benzene solubility)	2.61	2.09	3.50	2.47	TAPPI-T204-cm-97
2. การละลายในแอลกอฮอล์ (Alcohol solubility)	1.08	0.64	0.82	0.07	TAPPI-T264-cm-97
3. การละลายในน้ำร้อน (Hot water solubility)	11.05	3.63	4.20	6.72	TAPPI-T207-cm-93
4. การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% (1% NaOH solubility)	43.99	40.66	19.15	24.54	TAPPI-T212-cm-98
5. ขี้เถ้า (Ash)	1.05	0.35	0.23	N/A	TAPPI-T211-cm-93
6. โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)	75.45	78.88	72.51	62.69	Acid chlorite Method of Browing
7. ลิกนิน (Lignin)	24.55	21.12	27.49	28.05	TAPPI-T222-cm-98
8. แอลฟาเซลลูโลส ( $\alpha$ Cellulose)	40.59	42.55	41.92	60.49	TAPPI-T203-cm-93
9. เพนโตซาน (Pentosan)	25.83	16.03	16.21	13.32	TAPPI-T223-cm-84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ เส้นใยไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ชนิด คือ

- VMP คือเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (Vetiver Mechanical Pulp)  
 VTMP คือเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (Vetiver Thermomechanical Pulp)  
 EMP คือเส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (Eucalyptus Mechanical Pulp)  
 ETMP คือเส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (Eucalyptus Thermomechanical Pulp)

### 3.3.1.2 อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ

การหาอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) โดยนำเส้นใยที่ได้ผ่านการเตรียมในข้อ 3.3.1 มาทำการเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM จากนั้นทำการวัดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากรูป SEM

### 3.3.1.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ใช้น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิกรัม โดยใช้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) 20 psi และภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 10 °C/min
- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ = 50-600 °C

### 3.3.2 ขั้นตอนการผสม PVC

1. ชั่งสูตรผสมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2
2. ทำการผสม PVC compound โดยการผสมใช้ PVC resin DOP และ Cereclor<sup>®</sup> ในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ทำการปั่นกวนของผสมเป็นเวลา 5 นาที
3. เติมเส้นใยไม้ Ca-Zn stabilizer Stearic acid PE wax และ Filler ลงไป จากนั้นทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที
4. เติมน้ำมัน Epoxydized soybean oil ปั่นกวนต่อ 5 นาทีหรือให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี โดยใช้ความเร็วในการผสม 4000 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำส่วนผสมที่ได้ไปผสมกันในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคนเดียว (Single-screw extruder) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม คือ 160 165 170 และ 175 °C ตามลำดับ ความเร็ว 90 rpm (โดยใช้ Slit die ที่มีความกว้าง 50 mm และความหนา 2 mm)
6. นำ PVC compound ที่ได้ไปบด และทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการอัดเย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที

ตารางที่ 3.2 สูตรการผสมพีวีซีคอมพาวด์

ส่วนประกอบ (phr)	สูตรที่										
	1	2-8	9-12	13	14	15	16	17-19	20-23	24-26	27
PVC resin	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cereclor	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cd-Zn stabilizer	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
PE wax	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Epoxydized soybean oil	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
** DOP	5	5	5-12.5	5	5	5	5	5	5	5	5
** CaCO <sub>3</sub>	40	40	-	40	40	40	-	10-30	-	-	-
** Talcum	-	-	-	-	-	-	-	-	10-40	-	-
** Silica	-	-	40	-	-	-	-	-	-	10-30	10
** VMP	-	10-70	30	-	-	-	30	30	30	30	-
** VTMP	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-
** EMP	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-
** ETMP	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ \*\* คือองค์ประกอบที่ทำการศึกษา

- สูตรที่ 1 - พีวีซี (ควบคุม)
- สูตรที่ 2-8 - ใช้ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพลิต โดยพีวีซีคอมโพลิต  
ที่ศึกษาเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr ทำการเติมเส้นใย VMP  
10-70 phr
- สูตรที่ 9-12 - ใช้ศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพลิต โดยพีวีซีคอมโพลิต  
ที่  
ศึกษาเติมเส้นใย VMP 30 phr และซิลิกา 40 phr ทำการเติม DOP 5-12.5  
phr
- สูตรที่ 4, 13-15 - ใช้ศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพลิต โดยพีวีซีคอมโพลิตที่  
ศึกษาเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr ทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้น  
ใยไม้ที่ใช้ (VMP, VTMP, EMP และ ETMP) ในปริมาณ 30 phr เท่ากัน
- สูตรที่ 4, 16-19 - ใช้ศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมในพีวีซีคอมโพลิต โดย  
พีวีซีคอมโพลิตที่ศึกษาเติมเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5 phr ทำการ  
เติม  $\text{CaCO}_3$  40 phr
- สูตรที่ 16, 20-23 - ใช้ศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมในพีวีซีคอมโพลิต โดย  
พีวีซีคอมโพลิตที่ศึกษาเติมเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5 phr ทำการ  
เติมทัลคัม 0-40 phr
- สูตรที่ 9, 16, 24-26 - ใช้ศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมในพีวีซีคอมโพลิต โดย  
พีวีซีคอมโพลิตที่ศึกษาเติมเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5 phr ทำการ  
เติมซิลิกา 0-40 phr
- สูตรที่ 27 - ใช้ศึกษาผลของการรีไซเคิลของพีวีซีคอมโพลิต โดยพีวีซีคอมโพลิตที่ศึกษา  
เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr  
เมื่อทำการรีไซเคิลจำนวน 2 ครั้ง โดยนำพีวีซีคอมโพลิตมาบดด้วยเครื่อง  
บด  
พลาสติก และขึ้นรูปใหม่ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป

### 3.4 การทดสอบ

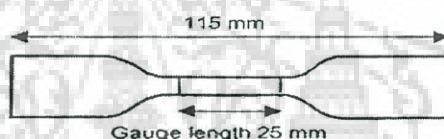
เอกสารนี้เป็นเอกสารนำชิ้นงานพีวีซีคอมโพลิตที่ได้จากการขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติต่างๆได้แก่ ระเบียบงานด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 สมบัติเชิงกล

#### 3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืดและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

การหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัสที่ 3% การยืด (Modulus at 3% strain) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 638 [32] ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง โดยชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 30 kN
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 100 mm / min
- ความยาวเกจ (Gauge length) 25 mm



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด [32]

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength); } \sigma = \frac{F_1}{A}$$

$$\text{มอดุลัสที่ 3% การยืด (Modulus at 3% strain); } E = \frac{F_2/A}{3/100}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ; } At = \left[ \frac{L - L_0}{L_0} \right] \times 100$$

เมื่อ  $F_1$  คือแรงที่ใช้ในการยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดสูงสุด (N)

$F_2$  คือแรงที่ใช้ในการยืดชิ้นงานตัวอย่างที่ 3% ความเครียด (N)

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )

$L$  คือระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงตัวอย่าง (mm)

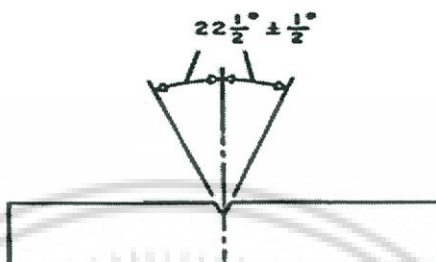
$L_0$  คือช่วงที่ชิ้นงานแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน; Gauge length 25 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 ความแข็งแรงกระแทก

การหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256 [33] โดยในการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง และลักษณะชิ้นงานตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก [33]

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

- เมื่อ
- IS คือค่าความแข็งแรงกระแทก ( $\text{kJ/m}^2$ )
  - W คือค่าพลังงานกระแทก (kJ)
  - A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่แตกหัก ( $\text{m}^2$ )

### 3.4.1.3 ความแข็งกด

การหาค่าความแข็งกด (Hardness tester, shore D) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [34] โดยใช้มาตรฐานแบบ Shore D ในการทดสอบ ลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องเรียบ และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm

### 3.4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ

การหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 790 [35] โดยลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอแสดงดังรูปที่ 3.3 และสภาวะในการทดสอบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

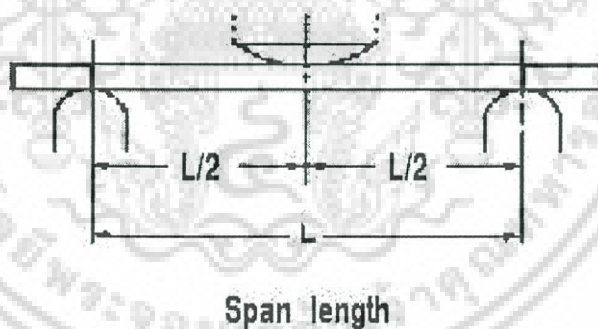
- โหลดเซลล์ (Load cell)	1	kN
- ความเร็วในการกด (Compression speed)	10	mm / min
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length)	40	mm

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ; } \sigma_f = \frac{1.5 FL}{Bh^2}$$

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

- เมื่อ F คือแรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างโค้งงอ (N)  
 L คือ Span length (40 mm)  
 B คือความกว้างของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)  
 H คือความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)  
 $\Delta F$  คือผลต่างของแรงกด ณ จุดเริ่มต้นถึงแรงกดที่ 1 N ในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)  
 $\Delta d$  คือระยะกดโค้งงอในช่วงแรงกด 0-1 N (mm)



รูปที่ 3.3 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ [35]

### 3.4.2 สมบัติทางกายภาพ

#### 3.4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ

การหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) สามารถหาได้โดยใช้เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity balance) ตามมาตรฐาน ASTM D 1500-85 [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%Water absorption) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 570 [37] โดยการนำชิ้นงานพีวีซีคอมโพสิตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า น้ำหนัก 2.00-2.50 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30-45 นาที ชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่าง (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) และบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 45 วัน และชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

### 3.4.3 สมบัติทางความร้อน

#### 3.4.3.1 อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน

อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อนสามารถทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน HDT ตามมาตรฐาน ASTM D 648 [38] หลักการของเครื่องทดสอบอุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน คือนำชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าใส่ในเครื่องทดสอบที่มีน้ำมันในอ่างและมีการบั่นกวนตลอดเวลา อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อนเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปไป 0.254 mm โดยใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- ความเค้นกดที่ใช้ = 455 kPa
- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ = 30-150 °C
- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 2 °C/min

#### 3.4.3.2 อุณหภูมิการสลายตัว

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีคอมโพสิตด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ใช้น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิกรัม โดยใช้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) 20 psi และสภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 10 °C/min
- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ = 50-600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

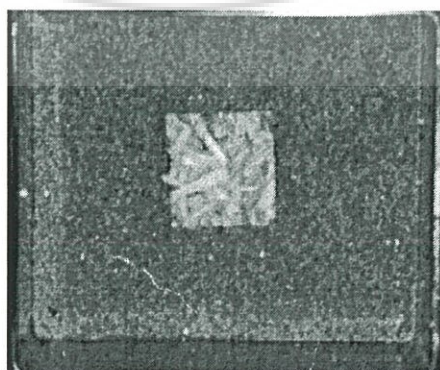
### 3.4.3.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า $\tan \delta$

Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) เป็นเทคนิคในการหาเพื่อหาค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  ของพีวีซีคอมโพสิต โดยชิ้นงานที่ทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวไม่เกิน 8 mm และความหนาประมาณ 2 mm ใส่ในเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA โดยการให้แรงสั่นที่มีความถี่คงที่หรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลา โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

- รูปแบบในการทดสอบ = Single Cantilever Bending Geometry
- ความถี่ = 1 Hz
- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ = 30-90 °C
- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 5 °C/min

### 3.4.4 ความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิต [2]

ในการทดสอบความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตจะใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทดสอบแบบบังคับ ใช้ชิ้นงานพีวีซีคอมโพสิตที่มีขนาด  $2.5 \times 2.5 \times 0.2$  cm<sup>3</sup> จำนวน 5 ชิ้น และบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานพีวีซีคอมโพสิต แล้วจึงนำชิ้นงานใส่ลงในบ่อซีเมนต์ที่ได้เพาะเลี้ยงปลวกชนิด *Coptotermes gestroi* ซึ่งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะไม่สัมผัสดินใช้เวลาในการทดสอบทั้งสิ้นประมาณ 4 สัปดาห์ ทำการประเมินผลการทดสอบโดยการประเมินความเสียหายบนแผ่นวัสดุทดลองด้วยสายตา (Visual rating) บันทึกน้ำหนักของชิ้นงานคอมโพสิตหลังการทดสอบและคำนวณหาค่าอัตราการเข้าทำลาย โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทดสอบแบบบังคับแสดงดังรูปที่ 3.4 และมาตรฐานในการทดสอบความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิตแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทดสอบแบบบังคับ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานในการทดสอบความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิต [2]

ระดับคะแนน ความเสียหาย	อัตราการเข้าทำลาย (%)	ความเสียหายของวัสดุทดลอง	ประสิทธิภาพ
0	0	ไม่พบการเข้าทำลาย	ดี
1	1-20	ทำลายผิววัสดุ	น่าพึงพอใจ
2	21-40	ทำลายภายในวัสดุน้อย	ยอมรับ
3	41-60	ทำลายภายในวัสดุปานกลาง	ไม่ยอมรับ
4	61-80	ทำลายภายในวัสดุมาก	ไม่ยอมรับ
5	81-100	ทำลายภายในวัสดุอย่างรุนแรง	ไม่ยอมรับ

#### 3.4.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของพีวีซีคอมโพสิตที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 20 นาที และทำการหักชิ้นงานตัวอย่างทันที จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบพื้นผิวด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยจะทำการดูการกระจายตัวของเส้นใย การกระจายตัวของสารตัวเติม และการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพีวีซีเมตริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากพีวีซีและเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) สามารถแสดงรายละเอียดของผลการทดลองได้ดังนี้

- 4.1 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก)
- 4.2 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
- 4.3 การศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
- 4.4 การศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
- 4.5 การศึกษาผลของสารตัวเติมที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
- 4.6 การศึกษาผลการรีไซเคิลของพีวีซีคอมโพสิต
- 4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของพีวีซีคอมโพสิต

#### 4.1 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก)

##### 4.1.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก)

การหาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) ที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกลและกระบวนการความร้อนเชิงกล ไปหาความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คำนวณหาค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด (VMP, VTMP, EMP และ ETMP) แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 และฐานฐานวิทยาของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 4.1

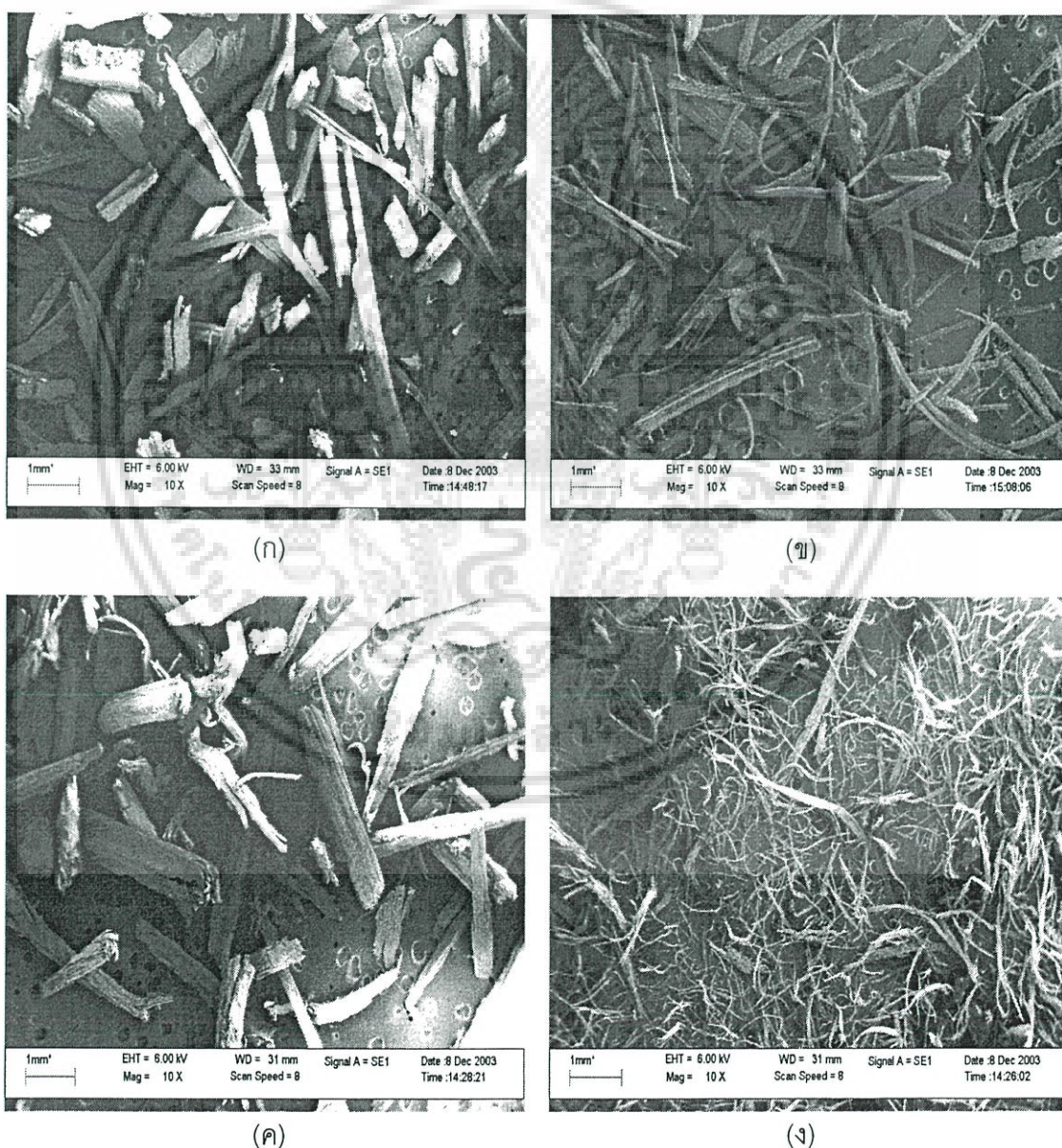
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

ชนิดของเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย
เส้นใย VMP	337.5 $\pm$ 120.15	7.3 $\pm$ 2.97
เส้นใย VTMP	255.5 $\pm$ 94.48	12.3 $\pm$ 7.74
เส้นใย EMP	372.7 $\pm$ 113.20	7.4 $\pm$ 2.94
เส้นใย ETMP	82.0 $\pm$ 58.13	20.7 $\pm$ 11.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเส้นใย VMP และเส้นใย EMP มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่าเส้นใย VTMP และเส้นใย ETMP เนื่องจากเส้นใย VMP และเส้นใย EMP เตรียมมาจากระบวนการเชิงกลใช้แรงทางกลจากเครื่องบด ซึ่งเป็นการตัดเส้นใยทำให้ได้เส้นใยที่มีความยาวต่ำ ส่วนเส้นใย VTMP และเส้นใย ETMP เป็นเส้นใยที่เตรียมมาจากระบวนการความร้อนเชิงกลใช้ความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ลิกนินอ่อนตัวและใช้การเสียดสีของเครื่อง Defibrators ทำให้ลิกนินที่เป็นสารยึดเส้นใยออก ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็ก (Microfibers) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ดังนั้นเส้นใย VTMP และเส้นใย ETMP จึงมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงกว่า

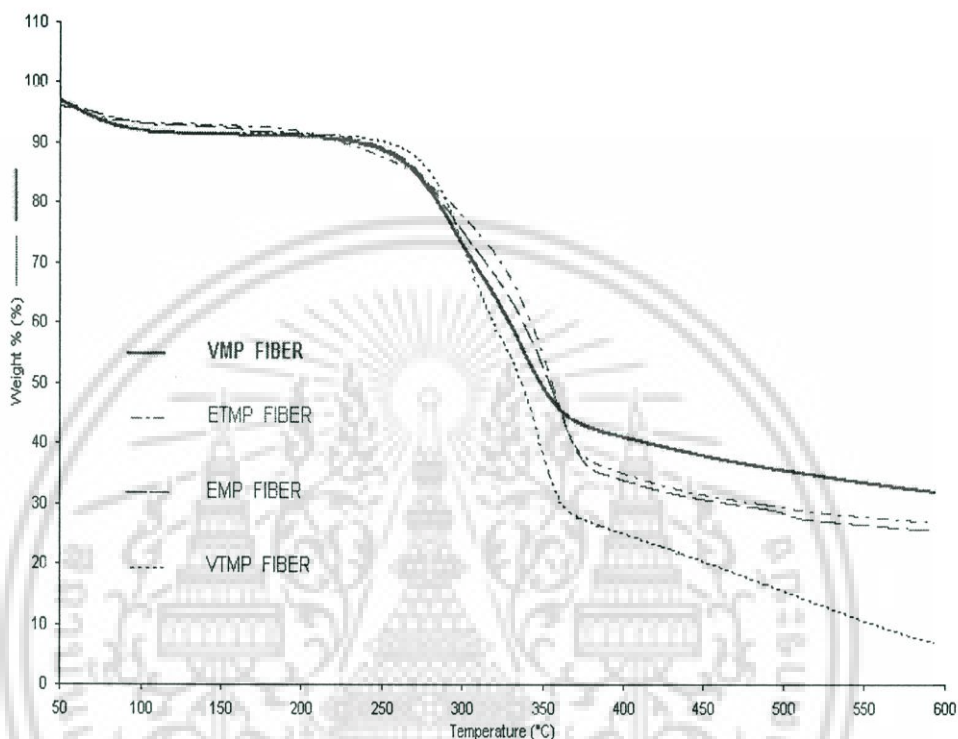


รูปที่ 4.1 ลักษณะวิทยาของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด (ก) เส้นใย VMP (ข) เส้นใย VTMP (ค) เส้นใย EMP และ (ง) เส้นใย ETMP ที่ทำถึงขยาย 10 เท่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก)

อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟ TGA ของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด (VMP, VTMP, EMP และ ETMP)

จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยทั้ง 4 ชนิด (VMP, VTMP, EMP และ ETMP) พบว่าเส้นใยทั้ง 4 ชนิด มีการลดลงของน้ำหนักเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากความชื้นในเส้นใย จากนั้นเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอันเนื่องจากความร้อนกล่าวคือ อุณหภูมิที่เริ่มเสถียรภาพของเส้นใย VTMP ประมาณ  $275^{\circ}\text{C}$  ส่วนเส้นใย VMP, EMP และ ETMP เริ่มเสถียรภาพที่อุณหภูมิประมาณ  $250^{\circ}\text{C}$  เพราะว่าเส้นใย VTMP มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสสูงสุด เมื่อเทียบกับเส้นใยอีก 3 ชนิด (VMP, EMP และ ETMP) ซึ่งเซลลูโลสมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงกว่า ลิกนินและมีน้ำหนักเหลือหลังการสลายตัวต่ำกว่าลิกนิน (เซลลูโลสและลิกนินเริ่มสลายตัวที่ อุณหภูมิประมาณ  $320$  และ  $175^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ [39])

## 4.2 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

ในการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสมที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต พีวีซีคอมโพสิตที่ศึกษาเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr โดยเติมเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมกระบวนการเชิงกล 0-70 phr

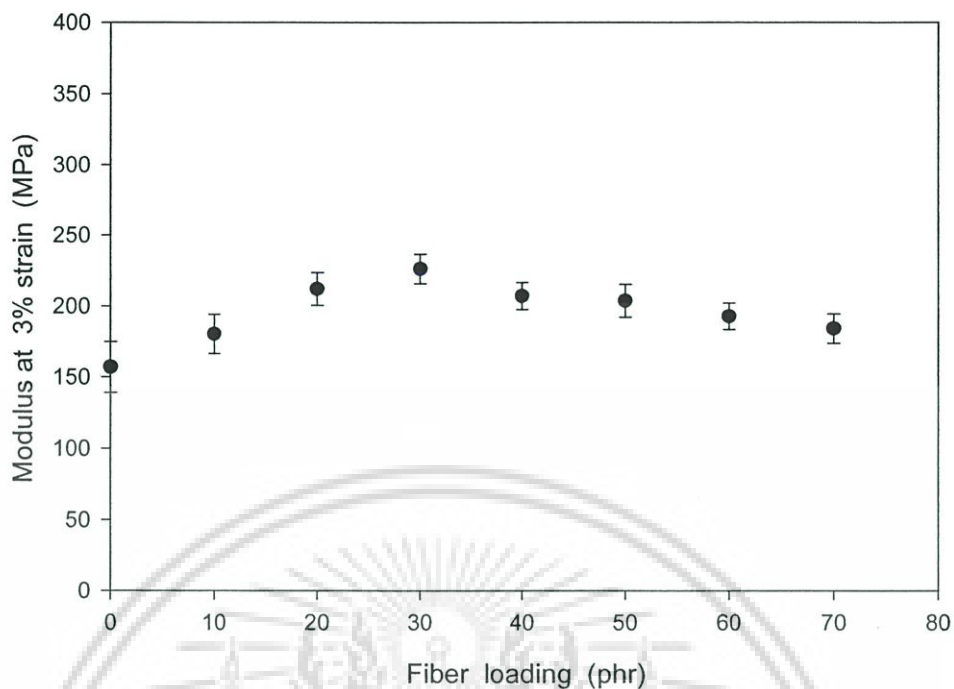
### 4.2.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้

ผลของสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้ที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3-4.9

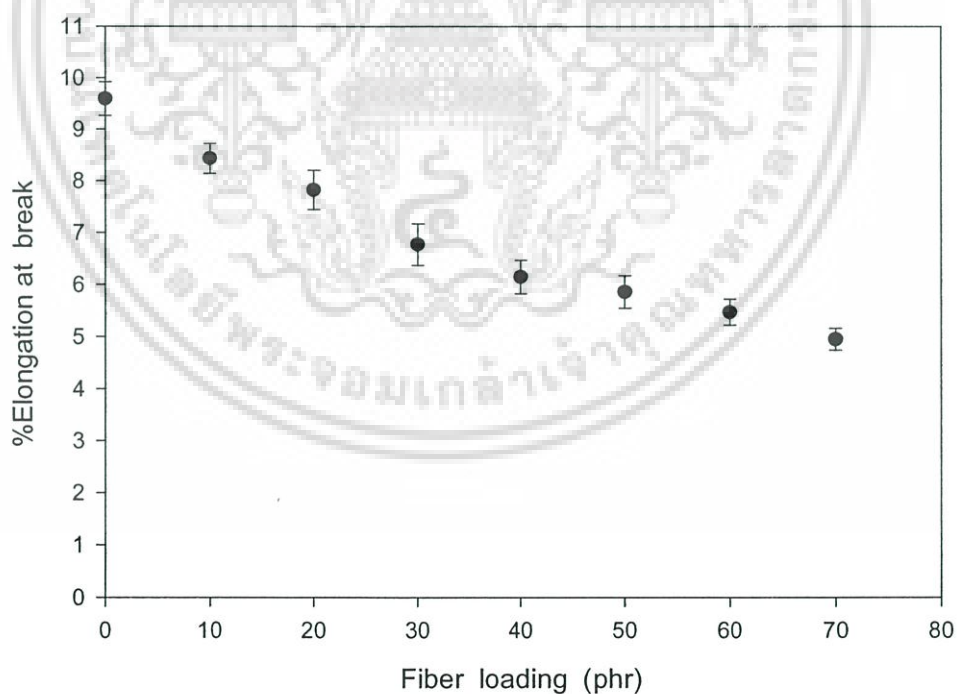


รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

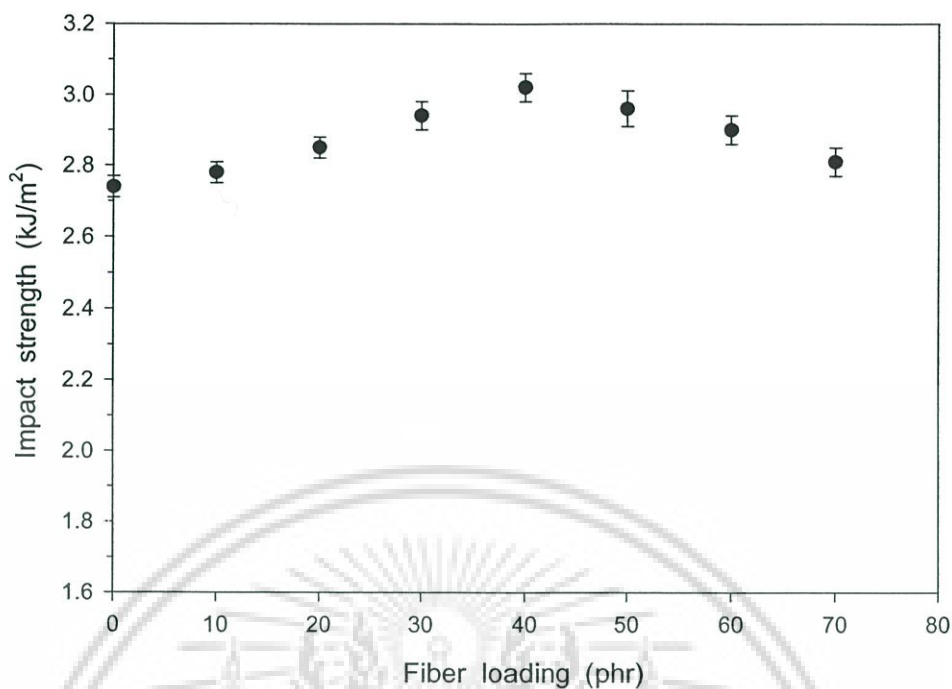


รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

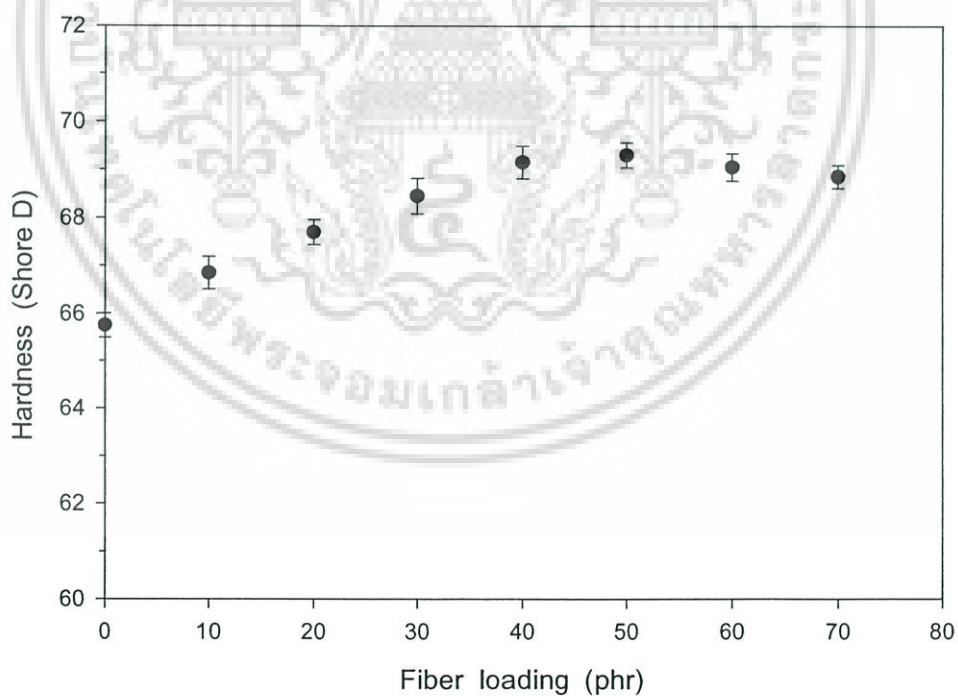


รูปที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

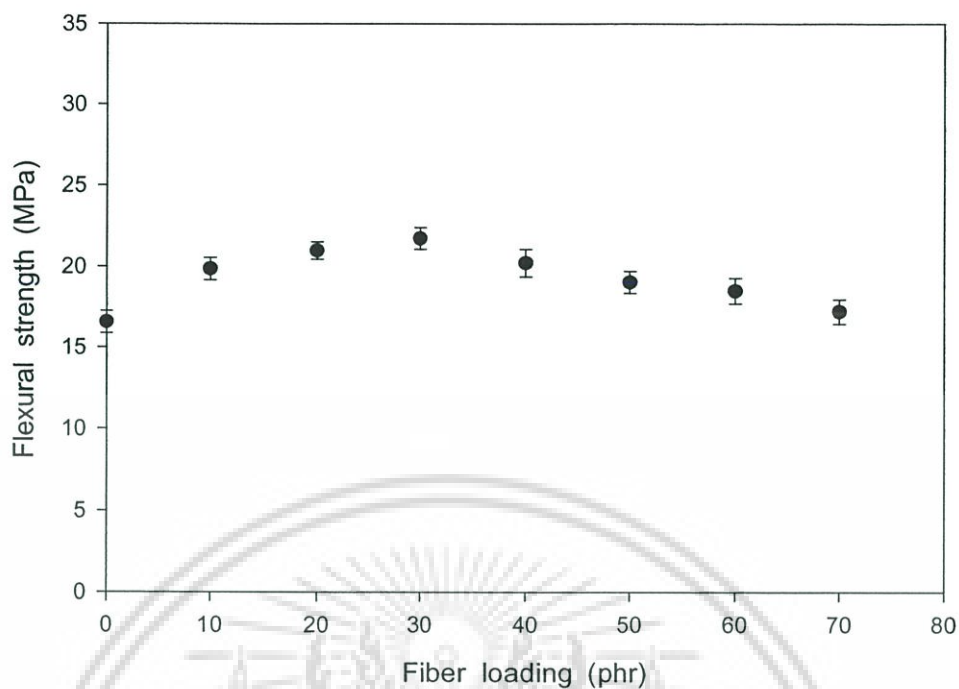


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

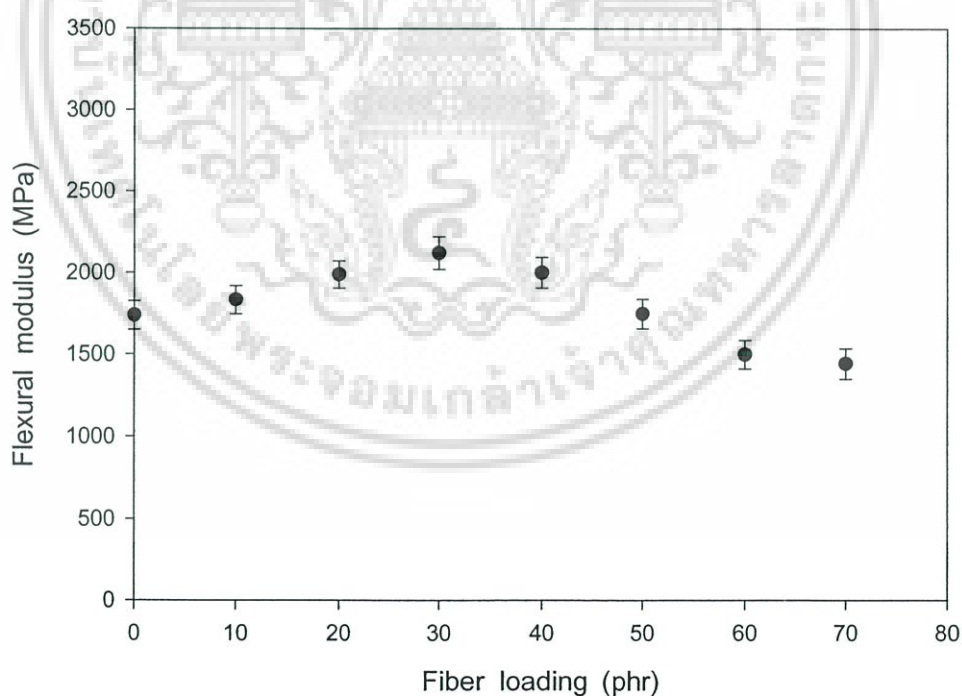


รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr



รูปที่ 4.9 ค่ามอดูลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3-4.4 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นจาก 0-30 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใย VMP ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่พีวีซีคอมโพสิตทำให้อรับแรงดึงได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเส้นใย VMP ที่มากเกินไป (เส้นใย VMP 40-50 phr) ทำให้การกระจายตัวของเส้นใย VMP ไม่ดี เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย VMP พีวีซีหลอมเหลวไม่สามารถแทรกเข้าไปในกลุ่มของเส้นใย VMP ได้ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง จากรูปที่ 4.3-4.4 พบว่าปริมาณเส้นใย VMP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตแล้วทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดมีค่าสูงสุด คือ 30 phr ซึ่งผลงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [15, 18]

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใย VMP เป็นวัสดุที่มีความแข็งและมีความยืดหยุ่นต่ำกว่าพีวีซี อีกทั้งเส้นใย VMP ที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของพีวีซี ทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถยืดตัวได้น้อยลง ปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่พบได้ทั่วไปเมื่อเติมสารตัวเติมใด ๆ ลงในพอลิเมอร์ [15, 17, 18]

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นจาก 0-40 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใย VMP ช่วยรับแรงและกระจายแรงที่ส่งมาจากพีวีซีเมตริกซ์ แต่ปริมาณเส้นใย VMP ที่มากเกินไป (50 phr) ทำให้เส้นใย VMP เกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีและเกิดเป็นช่องว่างภายในพีวีซีคอมโพสิต ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง [17, 18]

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใย VMP เป็นวัสดุที่มีความแข็งจึงช่วยรับแรงและกระจายแรงกดที่ส่งมาจากพีวีซีเมตริกซ์ [15, 17, 18]

จากรูปที่ 4.8-4.9 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นจาก 0-30 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเส้นใย VMP ที่มากเกินไป (40-50 phr) ทำให้การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคพีวีซีกับเส้นใย VMP มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

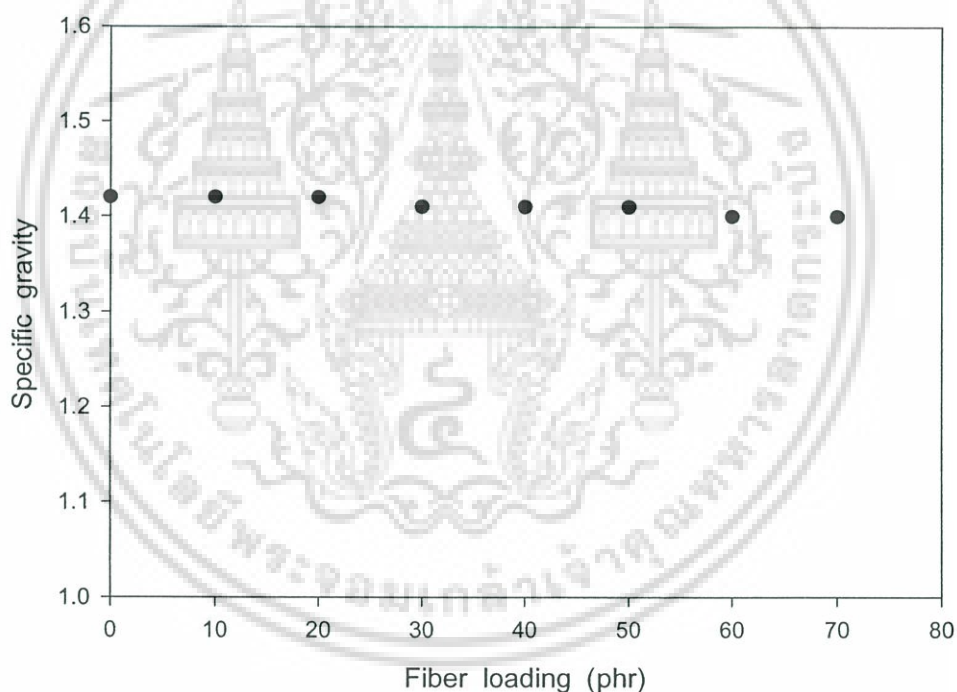
งอมมีค่าลดลง จากรูปที่ 4.8-4.9 จะเห็นได้ว่าปริมาณเส้นใย VMP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตแล้วทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีค่าสูงสุด คือ 30 phr ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.3 และ 4.4

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้ พบว่าปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสมที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต คือ 30 phr ซึ่งให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงสุด

#### 4.2.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้

สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10

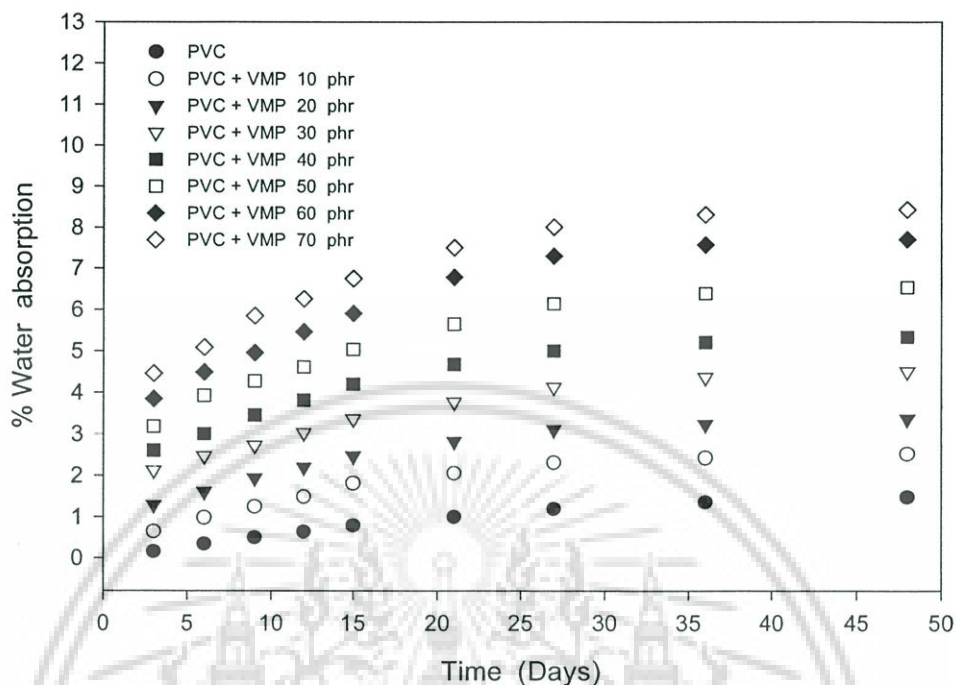


รูปที่ 4.10 ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่ใส่ DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (เส้นใยไม้ทั่วไปมีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย  $1.5 \text{ g/cm}^3$  [40] และพีวีซีมีค่าความถ่วงจำเพาะ  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ) ทำให้ความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11



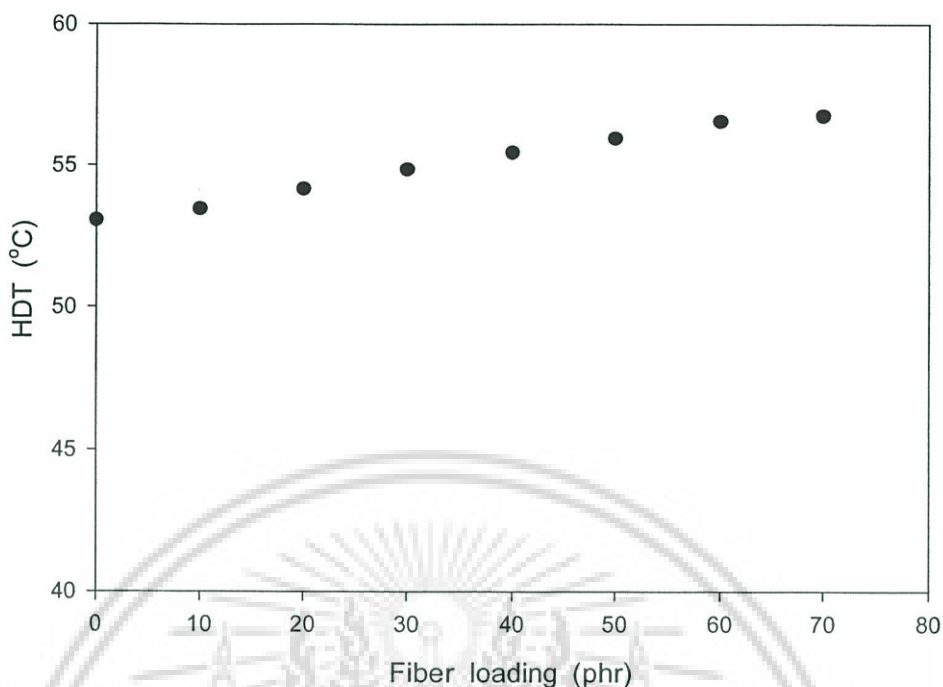
รูปที่ 4.11 เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

จากรูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพลิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP ที่เติมในพีวีซีคอมโพลิตเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใย VMP ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ นอกจากนี้ปริมาณเส้นใย VMP ที่เพิ่มขึ้นยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสดูดซับน้ำ ส่งผลให้พีวีซีคอมโพลิตสามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

### 4.2.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพลิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้

สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพลิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน จากเครื่องทดสอบทางความร้อน HDT ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.12

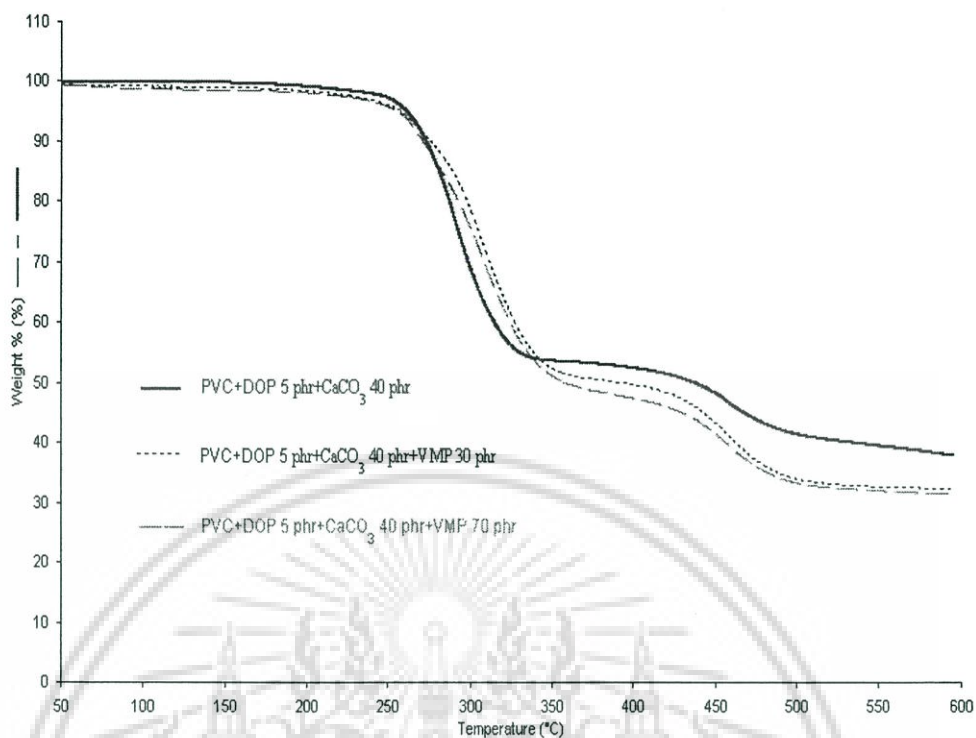


รูปที่ 4.12 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่า HDT เพิ่มขึ้น เพราะว่าเส้นใย VMP ช่วยรับความร้อนที่ส่งมาจากพีวีซีเมตริกซ์ อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเส้นใย VMP ทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถทนความร้อนได้ดีขึ้น [18]

2. อุณหภูมิการสลายตัว จากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.13 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0 30 และ 70 phr พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใย VMP 30 และ 70 phr มีค่ามากกว่าพีวีซี เพราะว่าเส้นใย VMP ช่วยรับความร้อนที่ส่งมาจากพีวีซีเมตริกซ์ โดยการสลายตัวช่วงแรกเป็นการสลายตัวของพีวีซีและสารเติมแต่งที่ระเหยง่าย ส่วนการสลายตัวช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของเส้นใย VMP และน้ำหนักเหลือหลังการสลายตัวของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใย VMP จะเป็น  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งมีอุณหภูมิสลายตัวสูงกว่า  $600^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.13 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0 30 และ 70 phr

3. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

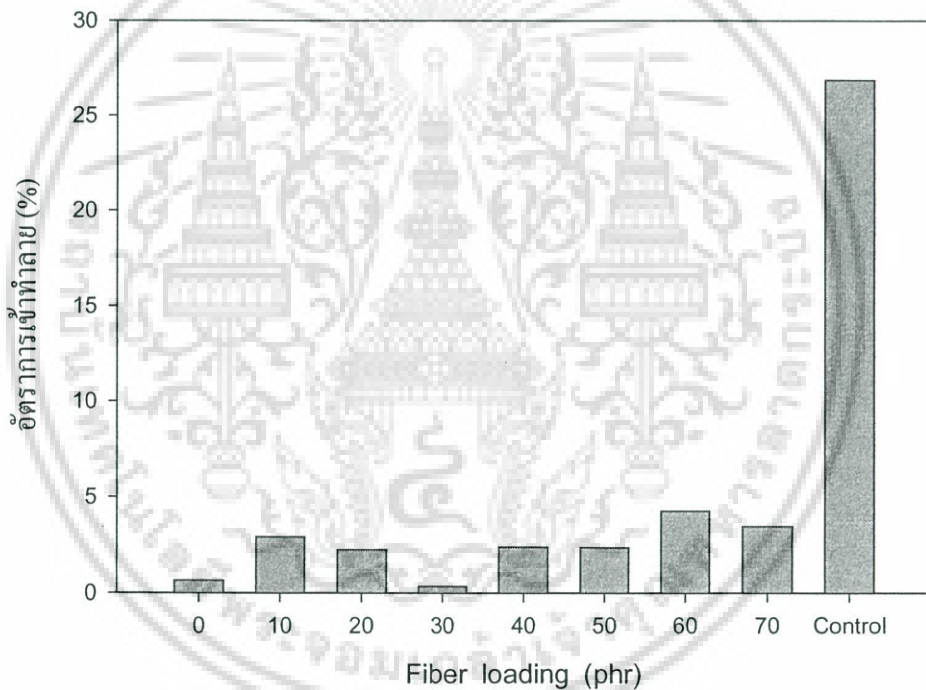
ตารางที่ 4.2 ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้

สูตรของพีวีซีคอมโพสิต	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta$
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr	66.9	0.742
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr + VMP 30 phr	70.7	0.710
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr + VMP 70 phr	72.4	0.622

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0 30 และ 70 phr พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใย VMP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่า  $T_g$  เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณเส้นใย VMP ที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล (Chain mobility) ของเอกซาร์พีวีซี จึงต้องให้พลังงานกับพีวีซีคอมโพสิตมากขึ้นเพื่อก้าวเปลี่ยนสถานะไปแต่ค่า  $\tan \delta$  ของพีวีซีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใย VMP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า  $\tan \delta = E_2 / E_1$  (เมื่อ  $E_2$  คือ มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) เปรียบเสมือนหน่วยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อน และ  $E_1$  คือ มอดุลัสสะสม (Storage modulus) เปรียบเสมือนหน่วยที่สามารถเก็บพลังงานที่ได้รับเอาไว้และปลดปล่อยพลังงานออกเมื่อปราศจากแรง โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานไปในรูปอื่น) เมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับแรงจึงสามารถกระจายแรงไปยังเส้นใย VMP ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้น

#### 4.2.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้



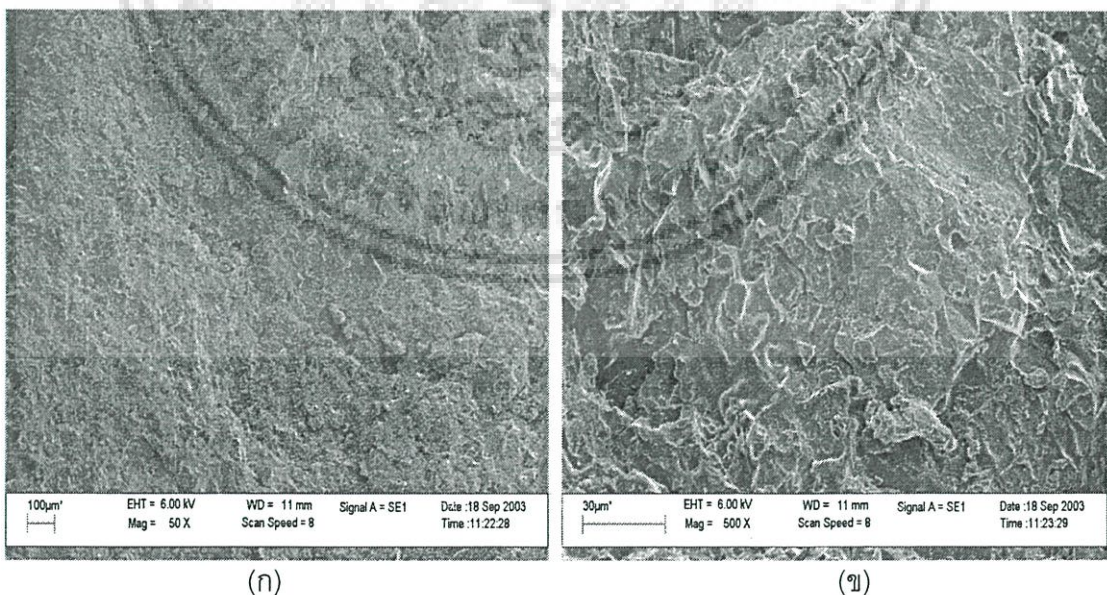
รูปที่ 4.14 กราฟอัตราการทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr

จากรูปที่ 4.14 แสดงกราฟอัตราการทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0-70 phr ใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบแบบบังคับและใช้ไม้ยางพาราเป็นตัวควบคุม พบว่าอัตราการทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวควบคุม ซึ่งถูกทำลายประมาณ 27% โดยมีอัตราการทำลายอยู่ในช่วง 0.35-4.26% และความเสียหายของพีวีซีคอมโพสิตเกิดการย่อยสลายที่ผิวเท่านั้น เอกสารนี้ตั้งนั้นพีวีซีคอมโพสิตจึงมีประสิทธิภาพของความสามารถทนทานต่อปลวกอยู่ในระดับ "น่าพึงพอใจ" เนื่องจากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปลวกเข้าทำลายวัสดุน้อยกว่า 20% ตามมาตรฐานในการทดสอบความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิต (ตารางที่ 3.3) เมื่อปริมาณเส้นใย VMP เพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการเข้าทำลายของปลวกของพีวีซีคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีค่าใกล้เคียงกัน

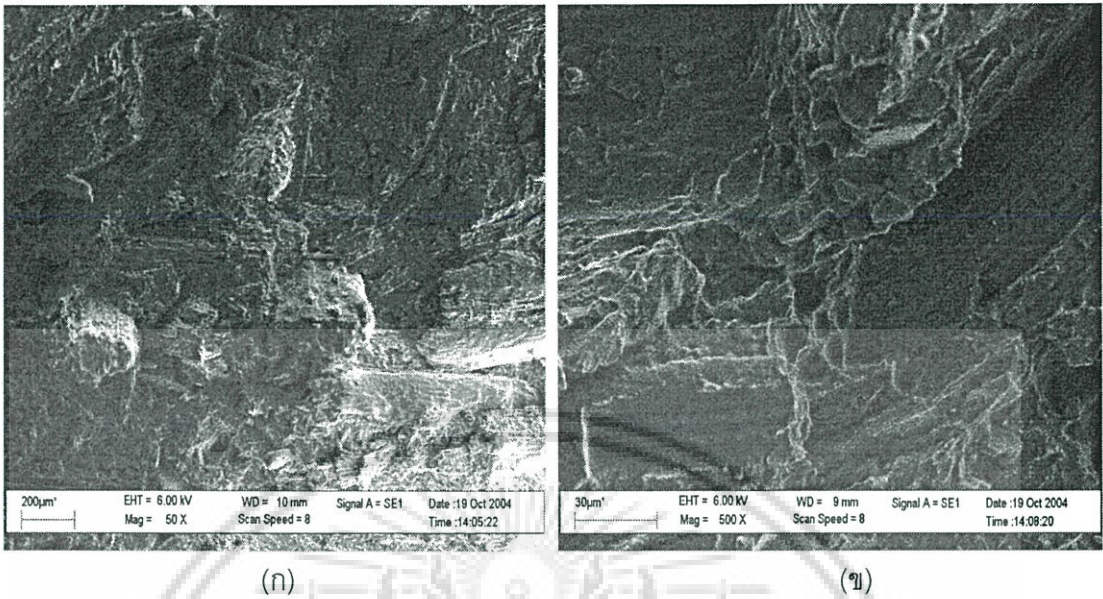
#### 4.2.5 ฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้

จากรูปที่ 4.15-4.17 แสดงฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติมเส้นใย VMP 0 40 และ 70 phr ตามลำดับ (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใย VMP 40 และ 70 phr มีการกระจายตัวของเส้นใย VMP ไม่สม่ำเสมอ บางบริเวณไม่มีเส้นใย VMP อยู่ ทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ภายในพีวีซีคอมโพสิตและพบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของพีวีซีกับเส้นใย VMP ได้ อย่างชัดเจน (สังเกตที่รูป 4.17) เนื่องจากปริมาณเส้นใย VMP ที่มากเกินไปทำให้พีวีซีหลอมเหลวไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างเส้นใยได้ จึงทำให้ความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างภูมิภาคต่ำ เมื่อเทียบกับความแข็งแรงของพีวีซีเมตริกซ์และเส้นใย VMP แสดงว่าเกิดการเสียสภาพของพีวีซีคอมโพสิตแบบยึดเกาะ (Adhesive failure) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคพีวีซีเมตริกซ์กับเส้นใย VMP ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใย VMP 70 phr มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใย VMP 30 phr

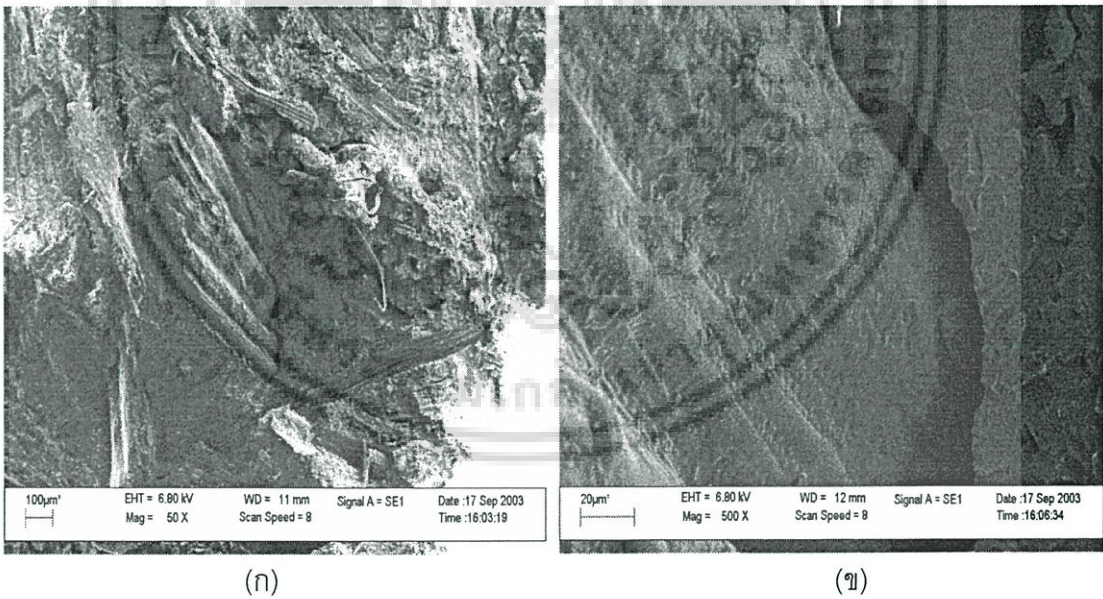


รูปที่ 4.15 ฐานวิทยาของพีวีซีที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติม เส้นใย VMP 40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.17 ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เมื่อเติม เส้นใย VMP 70 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

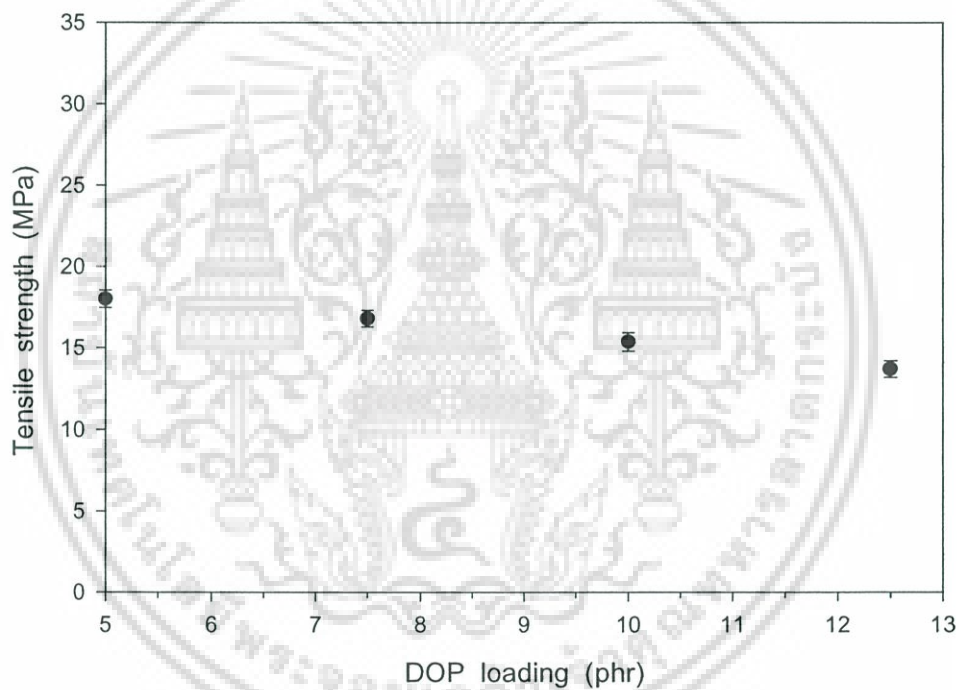
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

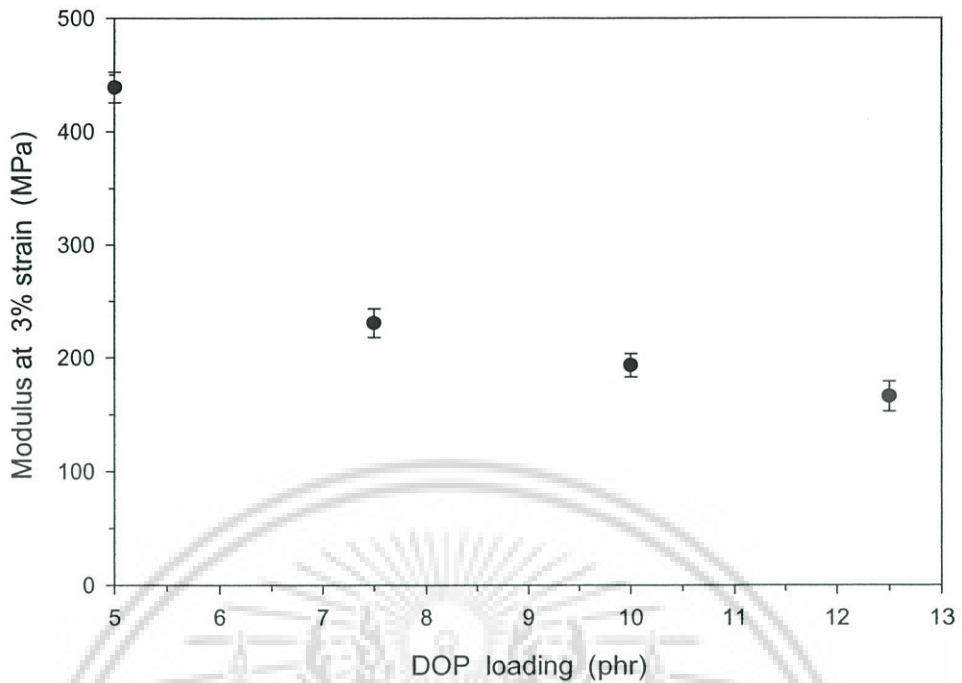
ต่อไปเป็นการศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต ซึ่งพีวีซีคอมโพสิต ที่ศึกษาเติมเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr โดยเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

#### 4.3.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

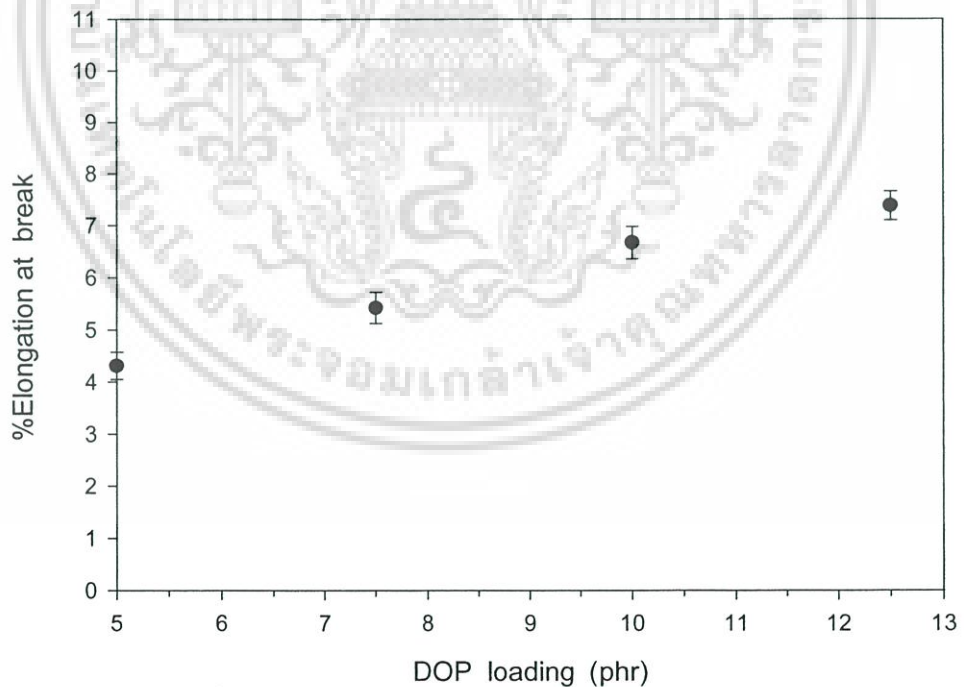
ผลของสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP ที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18-4.24



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

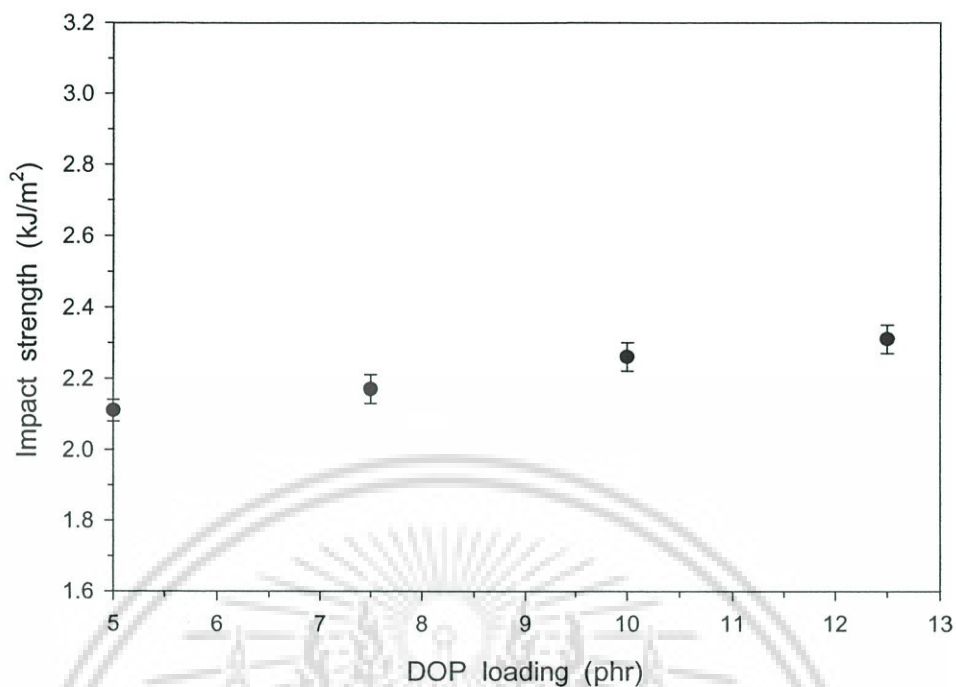


รูปที่ 4.19 ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

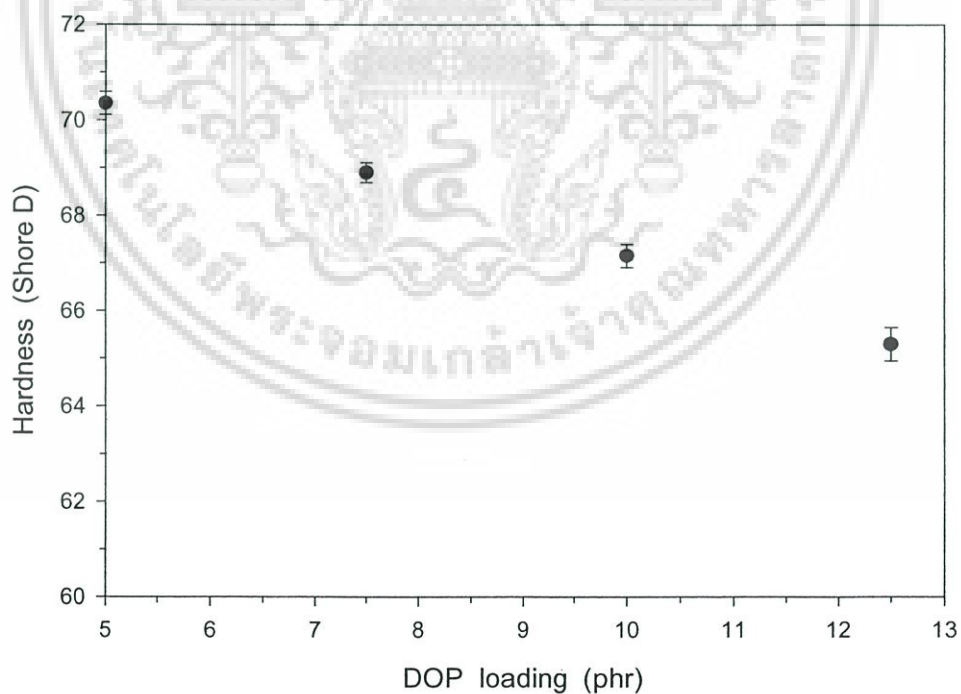


รูปที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

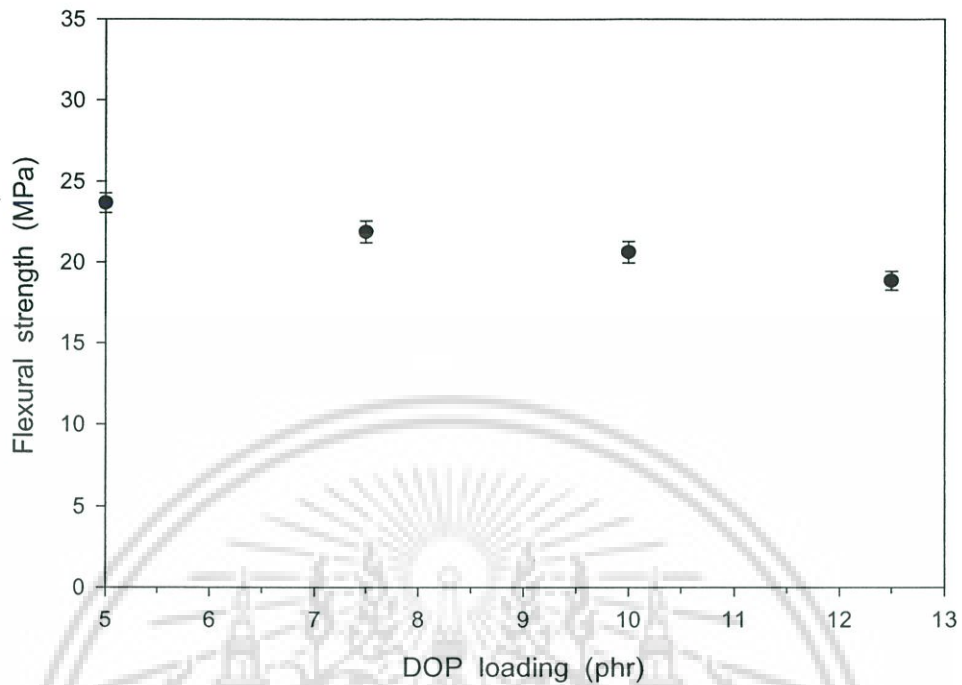


รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

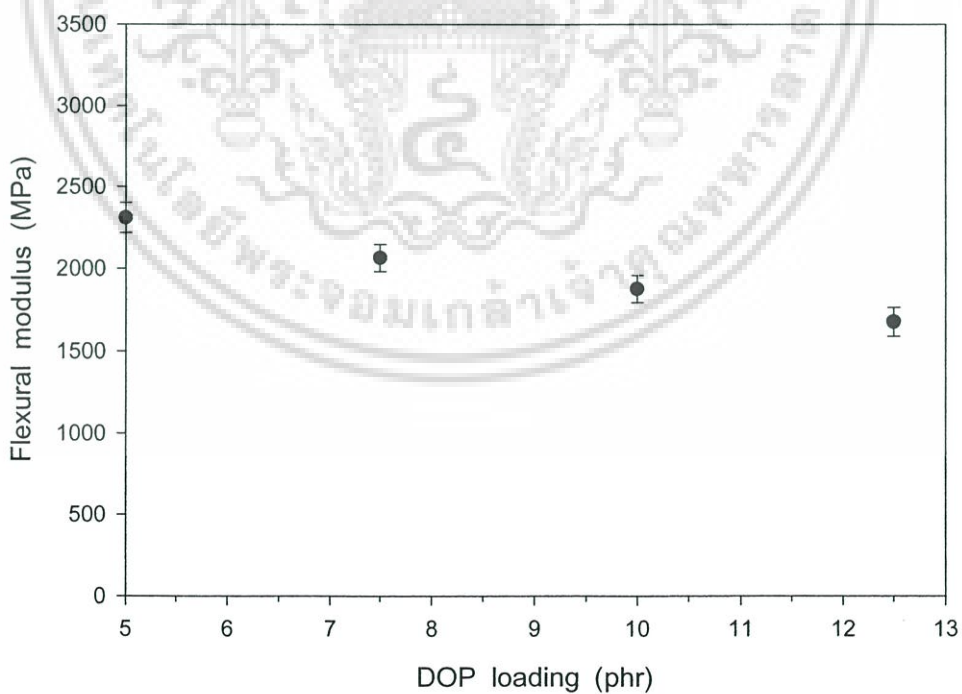


รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงโค้งของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr



รูปที่ 4.24 ค่ามอดุลัสโค้งของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18-4.20 แสดงค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อทำการเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดมีค่าลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่า DOP ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่ของพีวีซี เมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับแรงดึงทำให้สายโซ่ของพีวีซีจึงเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและเกิดการยืดตัวได้เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.21-4.22 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกและความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งกดมีค่าลดลง เนื่องจาก DOP ทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความนิ่มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น แต่รับแรงกดได้ลดลง

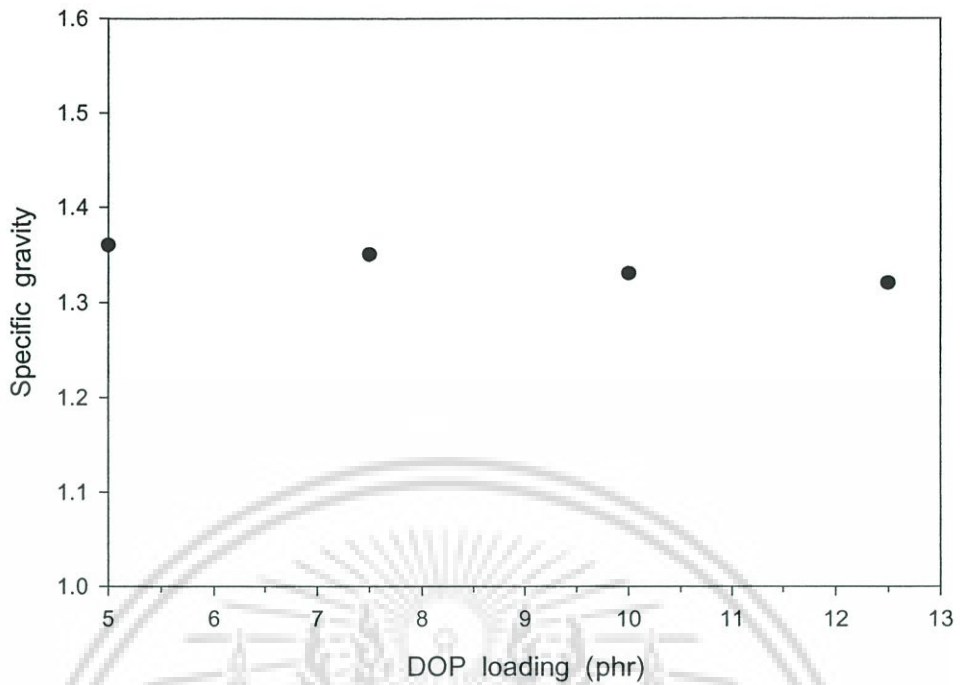
จากรูปที่ 4.23-4.24 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอลดลง เพราะว่า DOP เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของพีวีซี เมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับแรงทำให้สายโซ่ของพีวีซีเคลื่อนที่ออกจากเส้นใย VMP ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีค่าลดลง

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP พบว่าปริมาณ DOP ที่เหมาะสมที่ขึ้นรูปเป็นพีวีซีคอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติ คือ 5.0 phr เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการผลิตพีวีซีคอมโพสิตสูตรแข็งเพื่อใช้งานเป็นไม้เทียม ซึ่งปริมาณ DOP นี้สามารถขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตได้และให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงสุด

#### 4.3.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

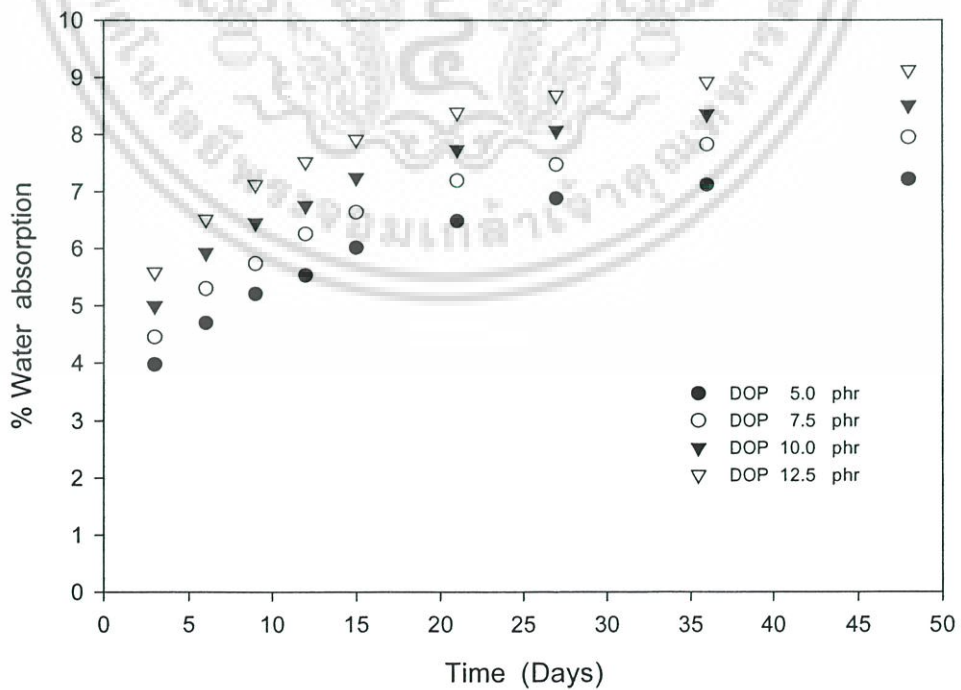
สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

2. เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

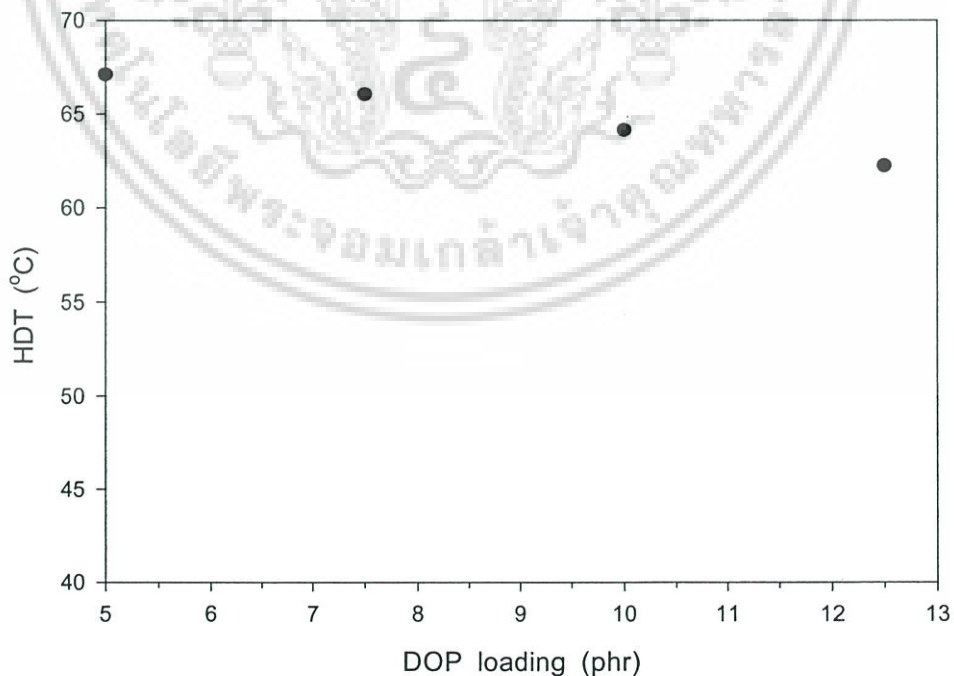
จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และใส่ซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลงเล็กน้อย เพราะว่า DOP แทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของพีวีซี สายโซ่จัดตัวอยู่ห่างกัน ทำให้มีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง

จากรูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่า DOP ที่เติมทำให้ปริมาตรอิสระของพีวีซีคอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในพีวีซีคอมโพสิตที่มีเส้นใย VMP และซิลิกาที่ดูดซับน้ำได้ดี

#### 4.3.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน จากเครื่องทดสอบทางความร้อน HDT ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.27



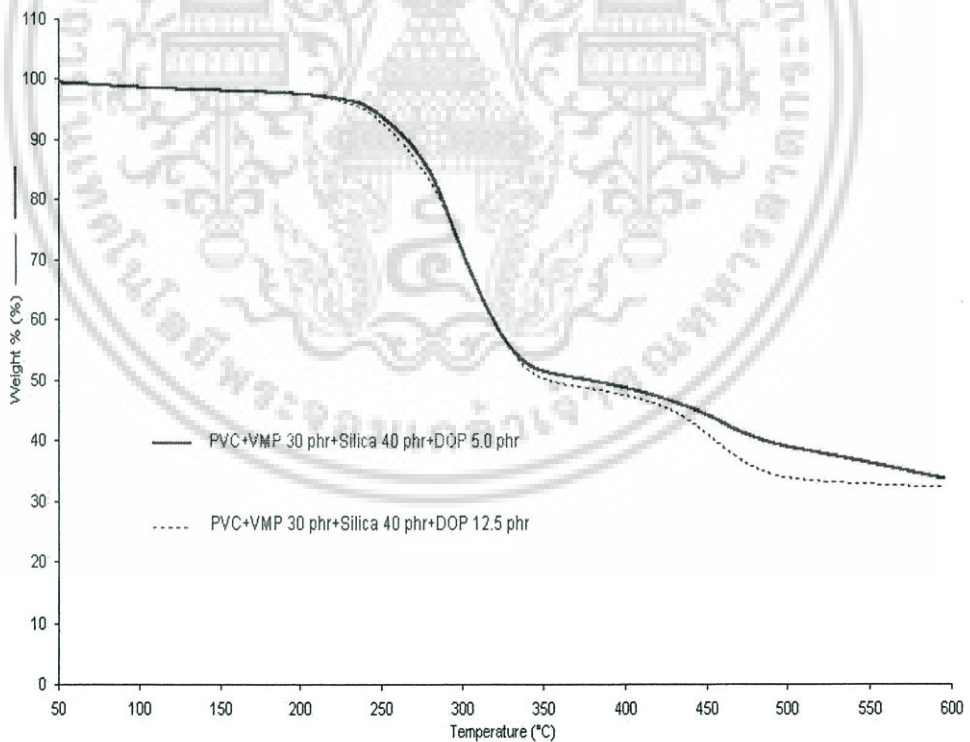
รูปที่ 4.27 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนลิขสิทธิ์ทางปัญญา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.27 แสดงค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่า HDT ลดลง เพราะว่า DOP มีผลให้สายโซ่ของพีวีซีเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับความร้อนภายใต้แรงกดที่คงที่

2. อุณหภูมิการสลายตัว จากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.28

จากรูปที่ 4.28 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 และ 12.5 phr พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าใกล้เคียงกัน และมีน้ำหนักเหลือหลังการสลายตัวของพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5.0 phr มากกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 12.5 phr เล็กน้อย เพราะว่าปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาตรอิสระของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความร้อนเกิดการกระจายตัวในพีวีซีคอมโพสิตได้ดีกว่า จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้เร็วกว่า



รูปที่ 4.28 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 และ 12.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

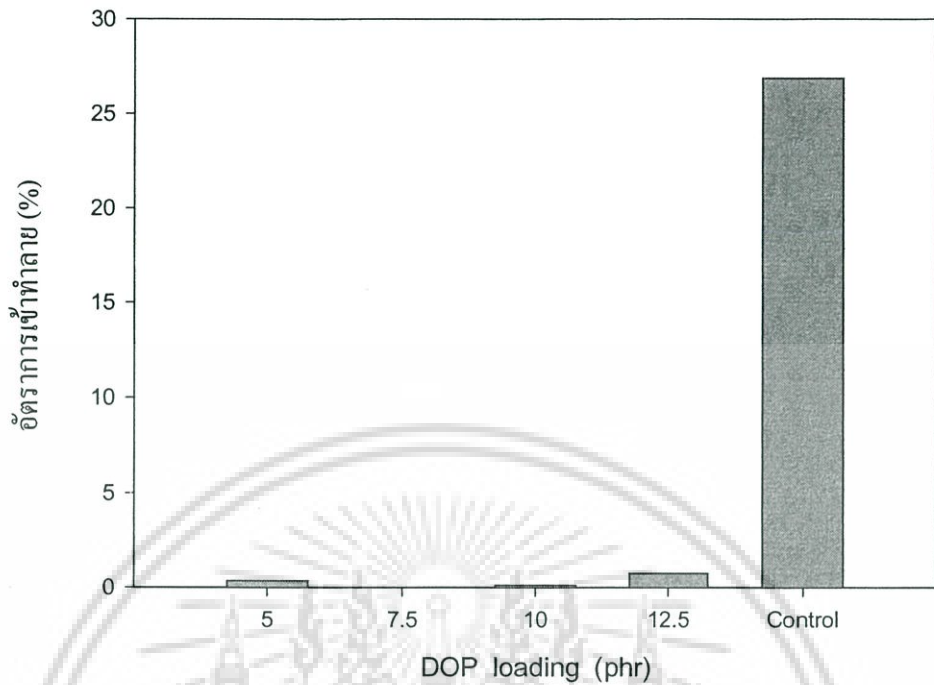
สูตรของพีวีซีคอมโพสิต	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta$
PVC + VMP 30 phr + ซิลิกา 40 phr + DOP 5.0 phr	72.8	0.631
PVC + VMP 30 phr + ซิลิกา 40 phr + DOP 12.5 phr	67.9	0.414

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 และ 12.5 phr พบว่าเมื่อปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทำให้ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง เพราะว่า DOP เข้าแทรกตัวระหว่างสายโซ่พีวีซี ทำให้สายโซ่ของพีวีซีเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของพีวีซีคอมโพสิตลดลง เนื่องจาก DOP ที่เติมทำให้พีวีซีคอมโพสิตนิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตเก็บแรงที่ได้รับไม่ดี ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตมีความอดุลล์สะสมลดลง

#### 4.3.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

จากรูปที่ 4.29 แสดงกราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr ใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบแบบบังคับและใช้ไม้ยางพาราเป็นตัวควบคุม พบว่าอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวควบคุม โดยมีอัตราการเข้าทำลายอยู่ในช่วง 0-0.75% และความเสียหายของพีวีซีคอมโพสิตเกิดการทำลายผิวเท่านั้น ดังนั้นพีวีซีคอมโพสิตจึงมีประสิทธิภาพของความทนทานต่อปลวกอยู่ในระดับ "น่าพึงพอใจ" เนื่องจากปลวกเข้าทำลายวัสดุน้อยกว่า 20% ตามมาตรฐานในการทดสอบความทนทานต่อปลวกของคอมโพสิต (ตารางที่ 3.3) ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่ออัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิต

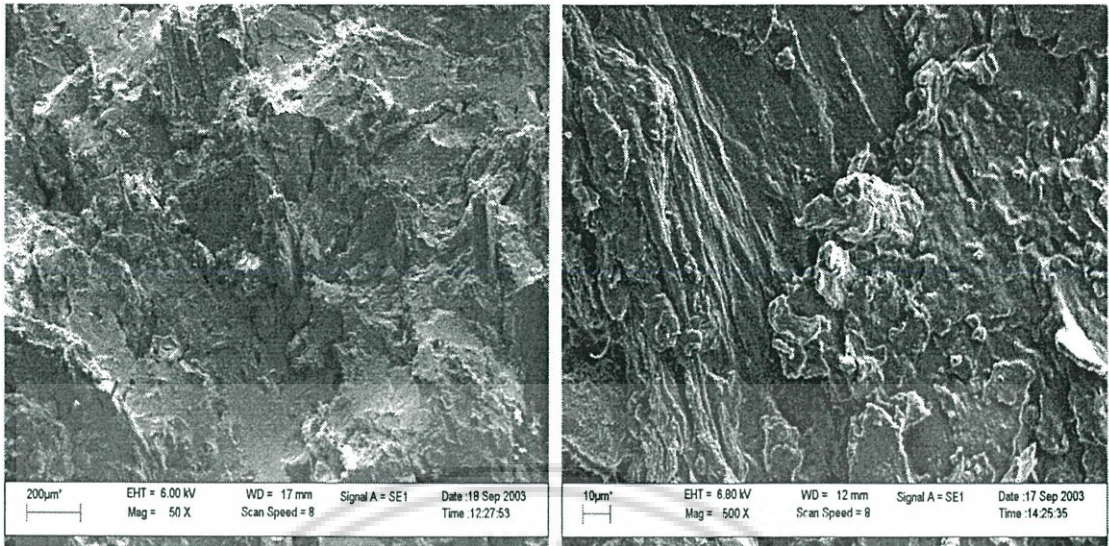
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟอัตราการเข้าทำละลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 7.5 10.0 และ 12.5 phr

#### 4.3.5 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

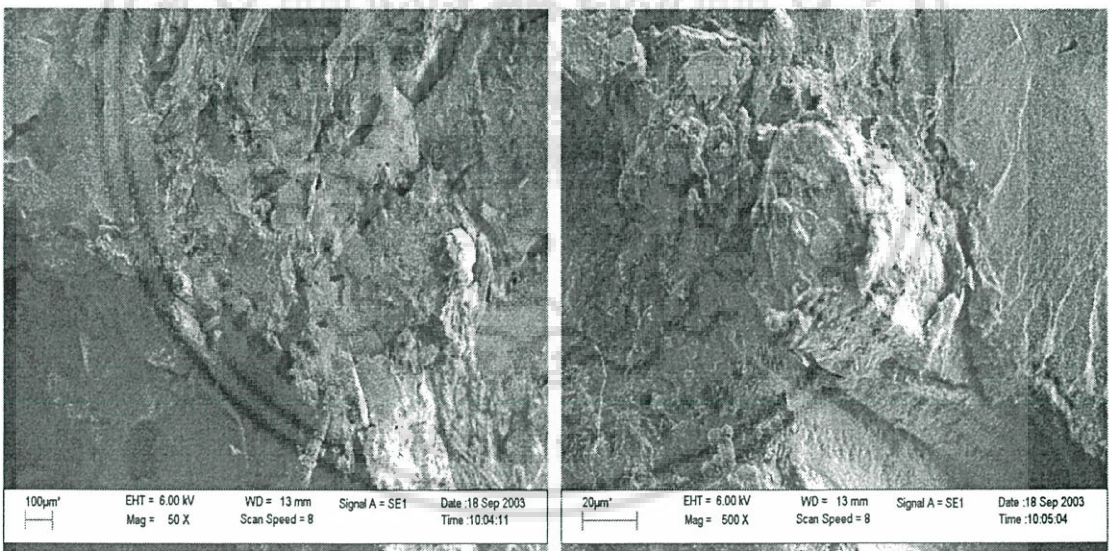
จากรูปที่ 4.30-4.31 แสดงสัณฐานวิทยาของชิ้นงานตัวอย่างที่หักที่อุณหภูมิต่ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 และ 12.5 phr ตามลำดับ (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าในการหักชิ้นงานพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 12.5 phr เกิดช่องที่เส้นใยหลุดออกมามากกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติม DOP 5.0 phr (สังเกตได้จากรูปที่ 4.31) เพราะว่า DOP ที่เติมลงไปทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความนิ่มเพิ่มขึ้น และการยึดเกาะระหว่างภูมิภาคของพีวีซีเมตริกซ์กับเส้นใย VMP ไม่ดีนัก ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.30 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 5.0 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.31 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติมซิลิกา 40 phr เมื่อเติม DOP 12.5 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

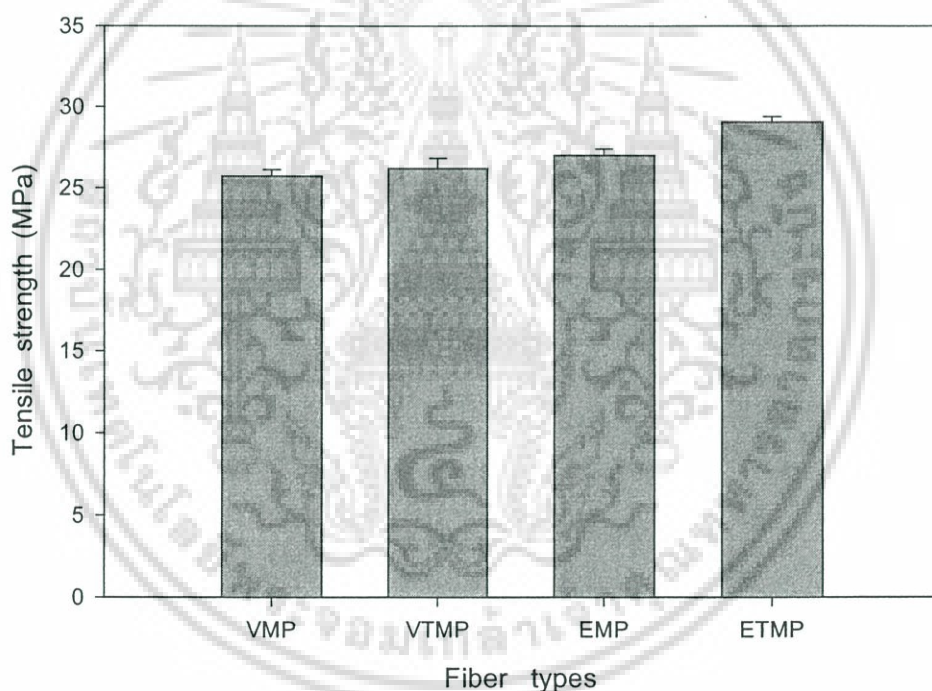
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

ในการศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต พีวีซีคอมโพสิตที่ศึกษาใช้เส้นใย 4 ชนิด (VMP, VTMP, EMP และ ETMP) ที่มีขนาด 20-50 mesh ในปริมาณ 30 phr เท่ากัน โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เท่ากันทุกสูตร สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

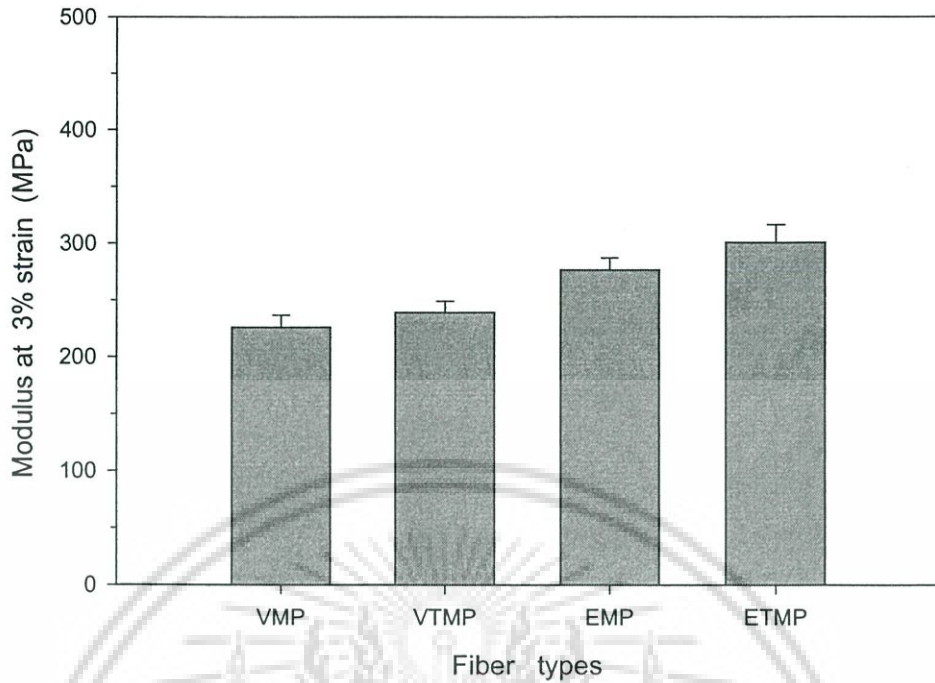
##### 4.4.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของเส้นใยไม้

ผลของสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของเส้นใยไม้ที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.32-4.38

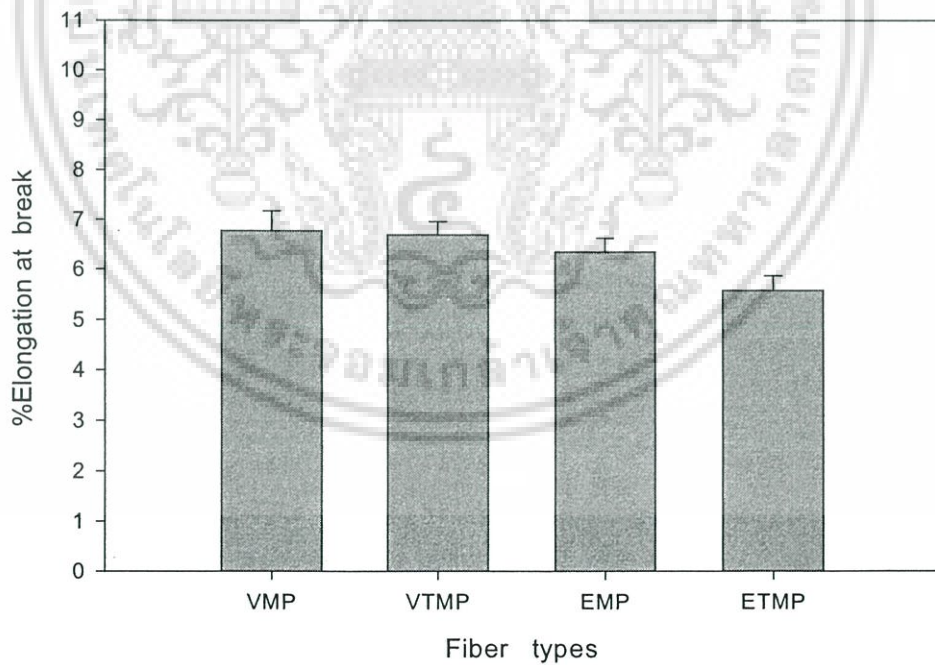


รูปที่ 4.32 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

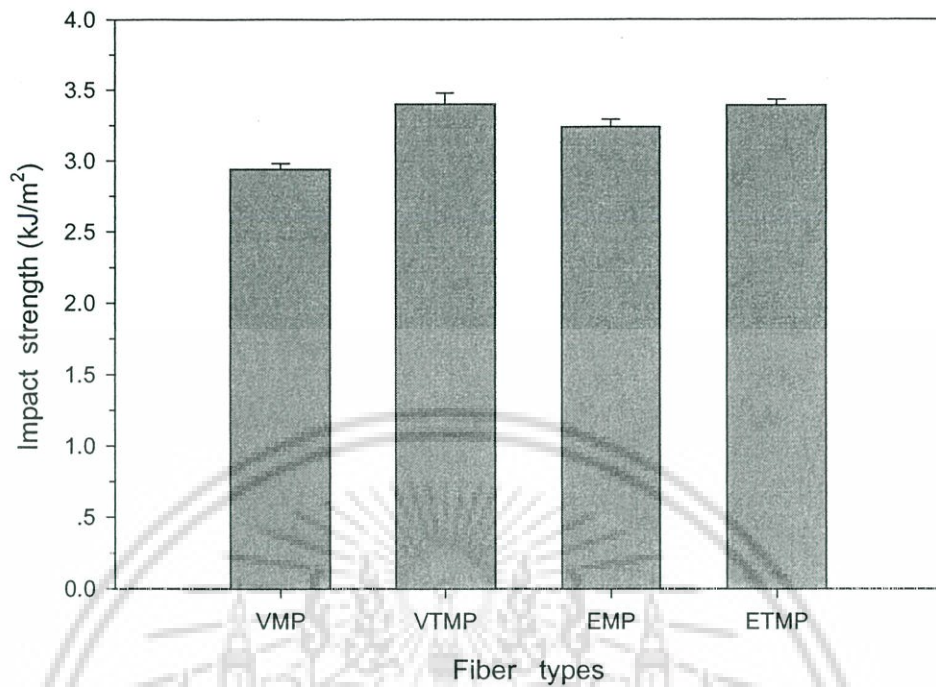


รูปที่ 4.33 ค่ามอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

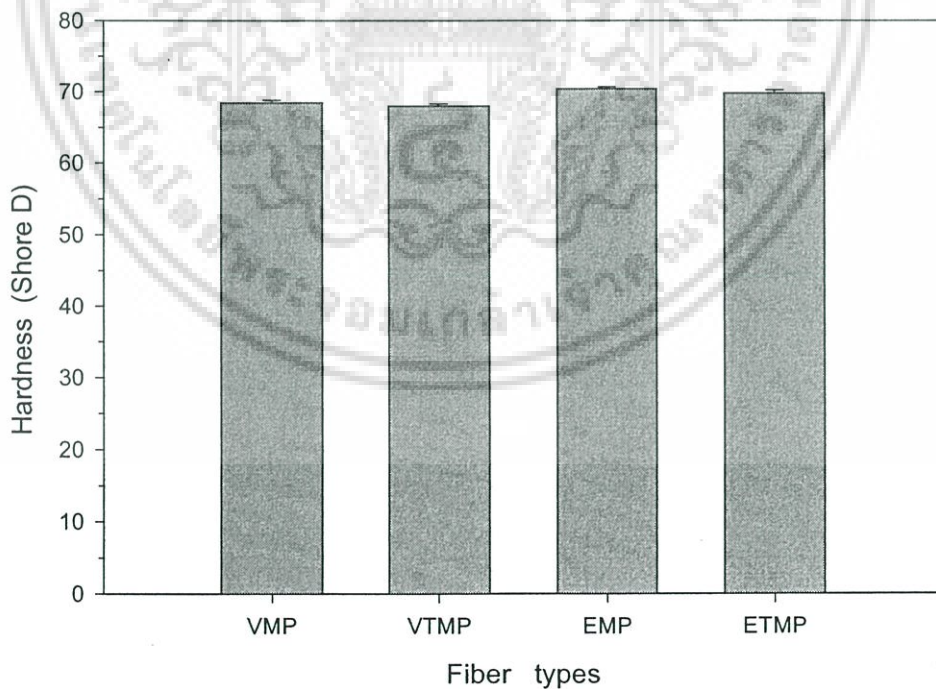


รูปที่ 4.34 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

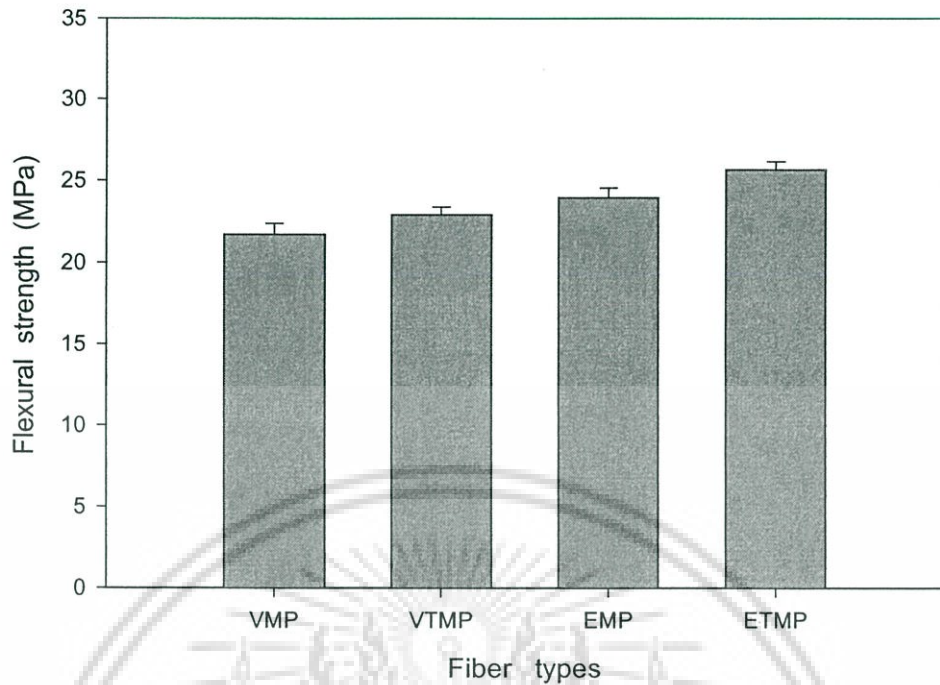


รูปที่ 4.35 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO<sub>3</sub> 40 phr

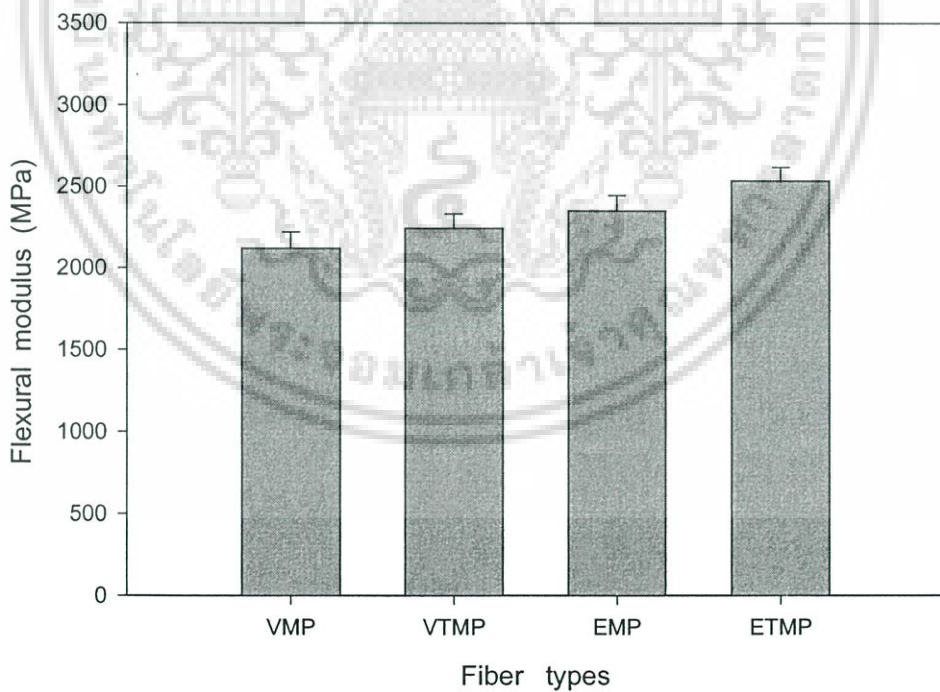


รูปที่ 4.36 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ CaCO<sub>3</sub> 40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr



รูปที่ 4.38 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.32-4.34 แสดงค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr ตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ โดยเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้  $\text{ETMP} > \text{EMP} > \text{VTMP} > \text{VMP}$  แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ โดยเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้  $\text{VMP} > \text{VTMP} > \text{EMP} > \text{ETMP}$  เนื่องจากเส้นใยที่มี Aspect ratio และปริมาณลิกนินมากทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถรับแรงดึงได้มาก

จากรูปที่ 4.35 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ โดยเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้  $\text{VTMP} \sim \text{ETMP} > \text{EMP} > \text{VMP}$  เนื่องจากเส้นใยที่มีแอลฟาเซลลูโลสและมี Aspect ratio มาก (ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 4.1 ตามลำดับ) จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มาก

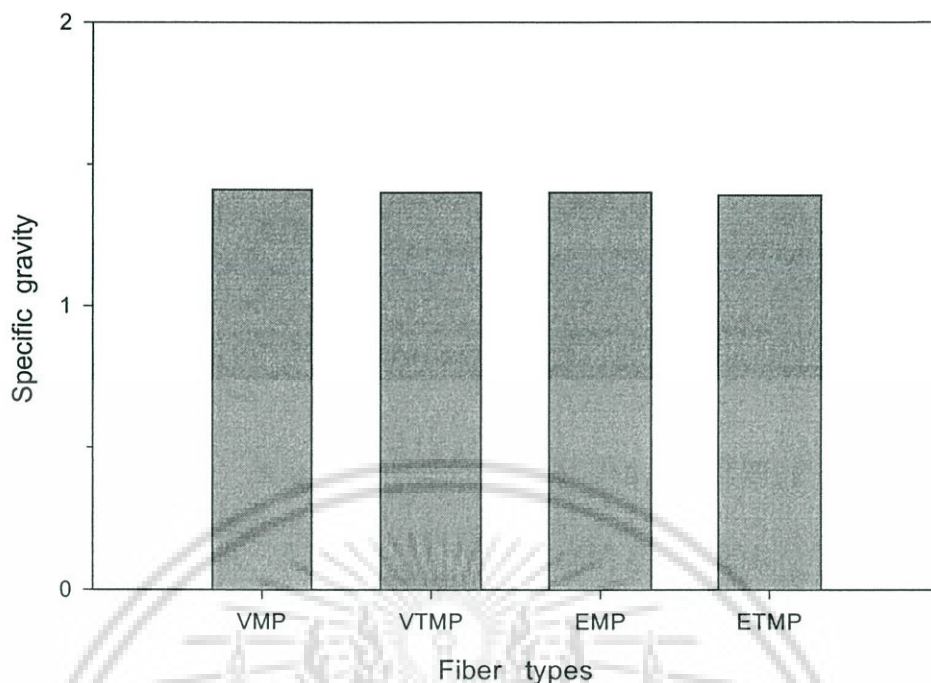
จากรูปที่ 4.36 แสดงค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ โดยเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้  $\text{EMP} \sim \text{ETMP} > \text{VMP} \sim \text{VTMP}$  เนื่องจากเส้นใยที่มีปริมาณลิกนินมาก (ตารางที่ 3.1) ซึ่งลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อนที่มีความแข็งสูง จึงทำให้พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP และ EMP สามารถรับแรงกดได้มากกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP และ VTMP

จากรูปที่ 4.37-4.38 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ โดยเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้  $\text{ETMP} > \text{EMP} > \text{VTMP} > \text{VMP}$  เนื่องจากเส้นใยที่มีปริมาณลิกนินและมี Aspect ratio มาก ซึ่งเส้นใยที่มี Aspect ratio มากทำให้มีประสิทธิภาพการเสริมแรง ทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งแรงสามารถรับแรงดัดโค้งงอได้มากขึ้น

#### 4.4.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้

สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.39

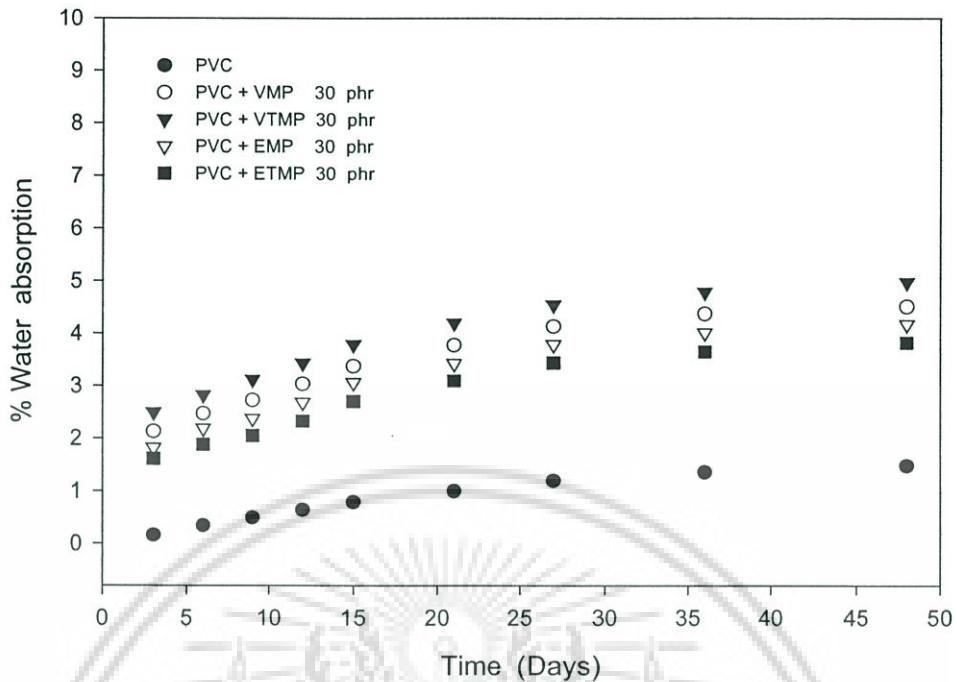


รูปที่ 4.39 ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

จากรูปที่ 4.39 แสดงความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP, VTMP, EMP และ ETMP มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณการเติมเส้นใยไม้ที่เท่ากัน คือ 30 phr และโดยทั่วไปเส้นใยไม้มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย  $1.5 \text{ g/cm}^3$  [40]

## 2. เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.40

จากรูปที่ 4.40 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยเรียงจากมากไปน้อยดังนี้  $\text{VTMP} > \text{VMP} > \text{EMP} > \text{ETMP}$  เนื่องจากเส้นใยที่มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสมากจึงดูดซับน้ำได้มาก โดยไฮโดรเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้



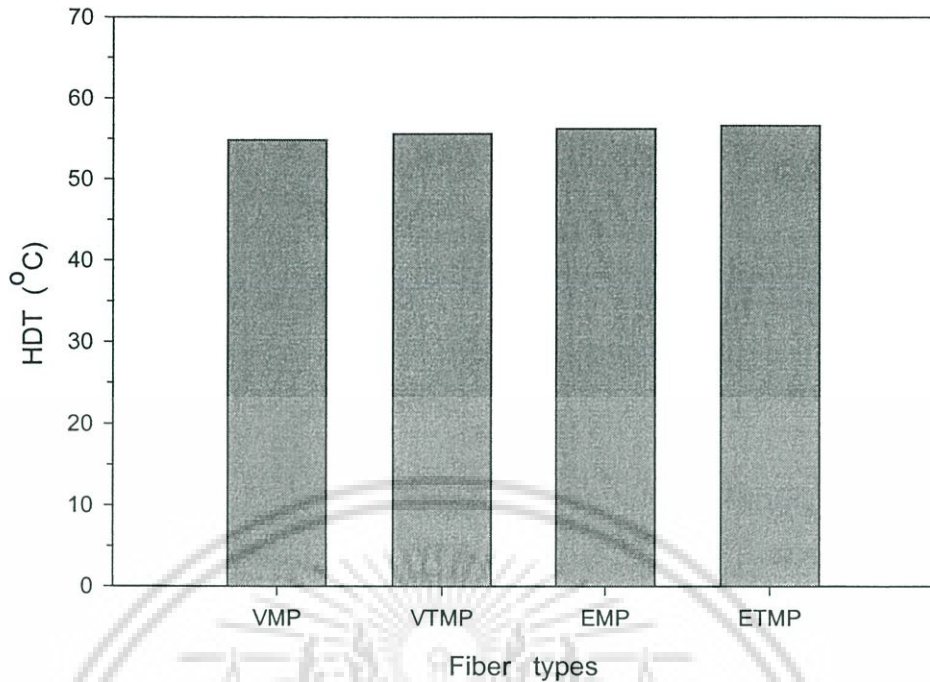
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบการดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

#### 4.4.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้

สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน จากเครื่องทดสอบทางความร้อน HDT ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.41

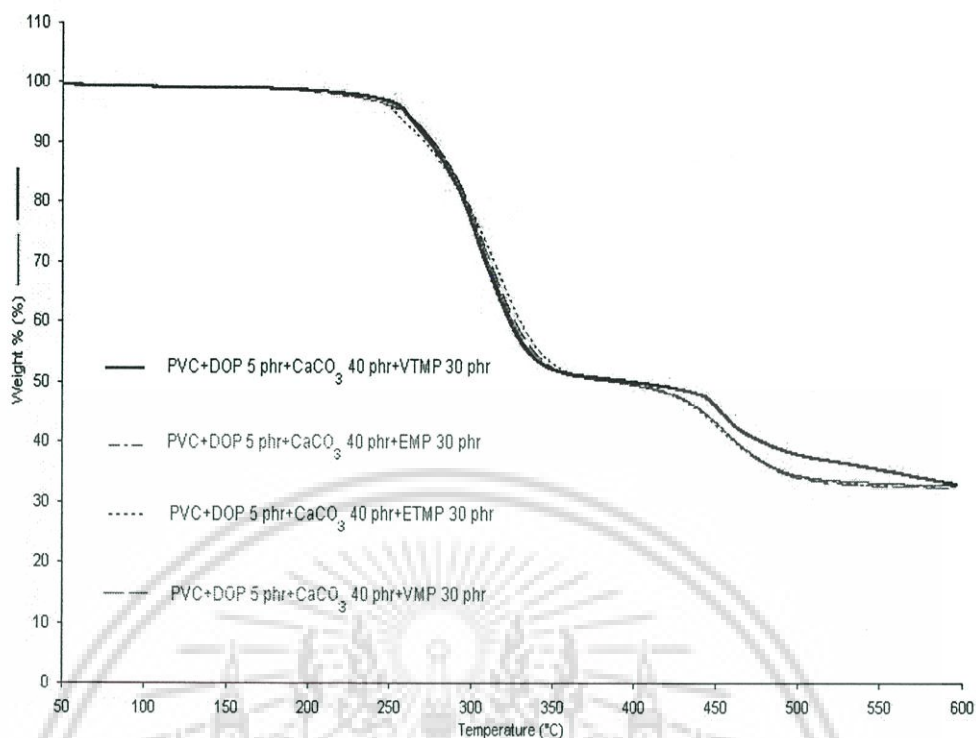
จากรูปที่ 4.41 แสดงค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr พบว่าค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ (VMP, VTMP, EMP และ ETMP) มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากเส้นใยไม้ชนิดต่าง ๆ มีสมบัติทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.41 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

2. อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) จากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.42

จากรูปที่ 4.42 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr พบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยทั้ง 4 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ  $270^\circ\text{C}$ ) โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของพีวีซี และสารเติมแต่งที่ระเหยง่าย ช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของเส้นใยไม้ เนื่องจากพีวีซีคอมโพสิตได้มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมทำให้พีวีซีคอมโพสิตสลายตัวที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดย  $\text{CaCO}_3$  เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า  $600^\circ\text{C}$  [41]



รูปที่ 4.42 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

3. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4

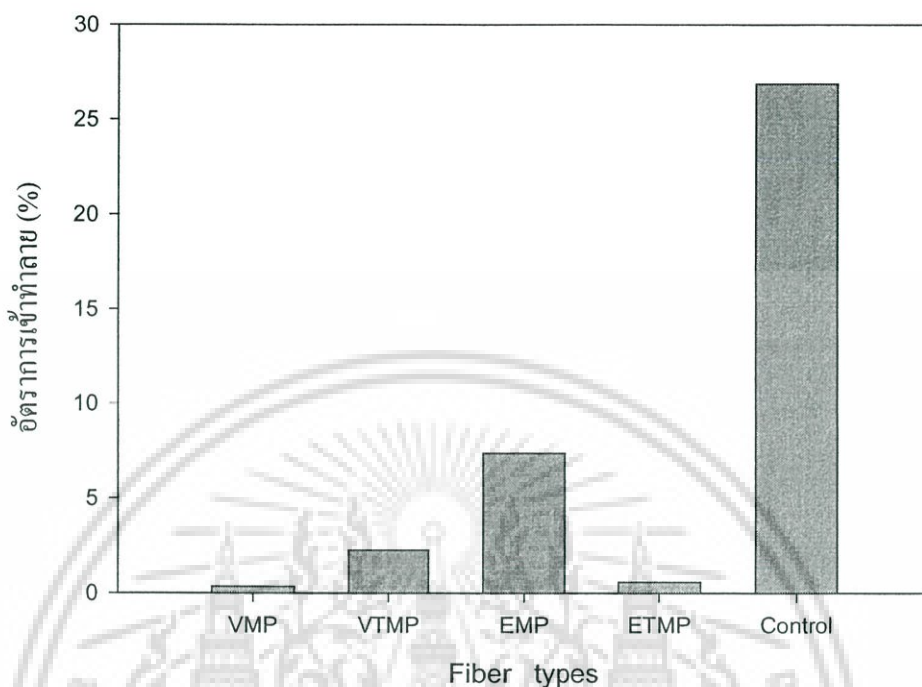
ตารางที่ 4.4 ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้

สูตรของพีวีซีคอมโพสิต	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta$
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr + VTMP 30 phr	70.4	0.711
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr + VMP 30 phr	70.7	0.710
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr + ETMP 30 phr	71.2	0.696
PVC + DOP 5.0 phr + $\text{CaCO}_3$ 40 phr + EMP 30 phr	71.4	0.690

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่อง DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของเส้นใยไม้ พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใยชนิดต่าง ๆ (ETMP, EMP, VTMP และ VMP) มีค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดของเส้นใยไม้ไม่มีผลต่อ  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของพีวีซีคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้



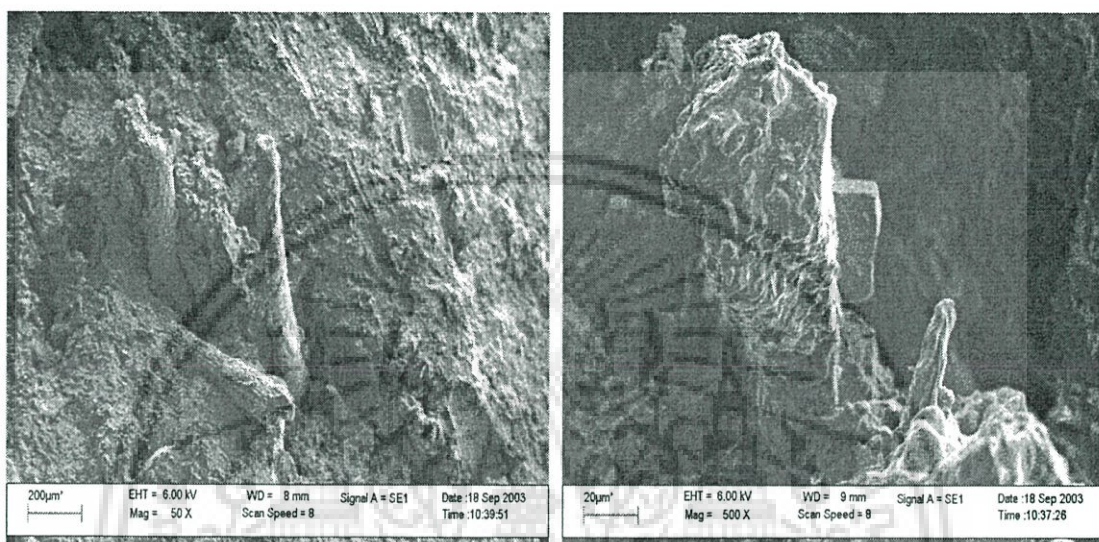
รูปที่ 4.43 กราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr

จากรูปที่ 4.43 แสดงกราฟอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr ใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการแบบบังคับและใช้ไม้ยางพาราเป็นตัวควบคุม พบว่าอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมาก (0.35-7.37%) เมื่อเทียบกับตัวควบคุม ซึ่งความเสียหายของพีวีซีคอมโพสิตเกิดการทำลายผิวเท่านั้น จึงมีประสิทธิภาพของความทนทานต่อปลวกอยู่ในระดับ “น่าพึงพอใจ” เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้ที่ใช้ พบว่าอัตราการเข้าทำลายของปลวกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย EMP มีอัตราการเข้าทำลายของปลวก 7.37% ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่น (VMP, VTMP และ ETMP) เพราะว่าเส้นใยหญ้าแฝกมีความทนทานต่อปลวก และเส้นใย ETMP มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใย EMP จึงมีอัตราการเข้าทำลายต่ำกว่า

#### 4.4.5 สันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชนิดเส้นใยไม้

จากรูปที่ 4.44-4.47 แสดงสันฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP, VTMP, EMP และ ETMP ที่มีขนาด 20-50 mesh ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 30 phr โดยใส่ DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr เท่ากัน (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

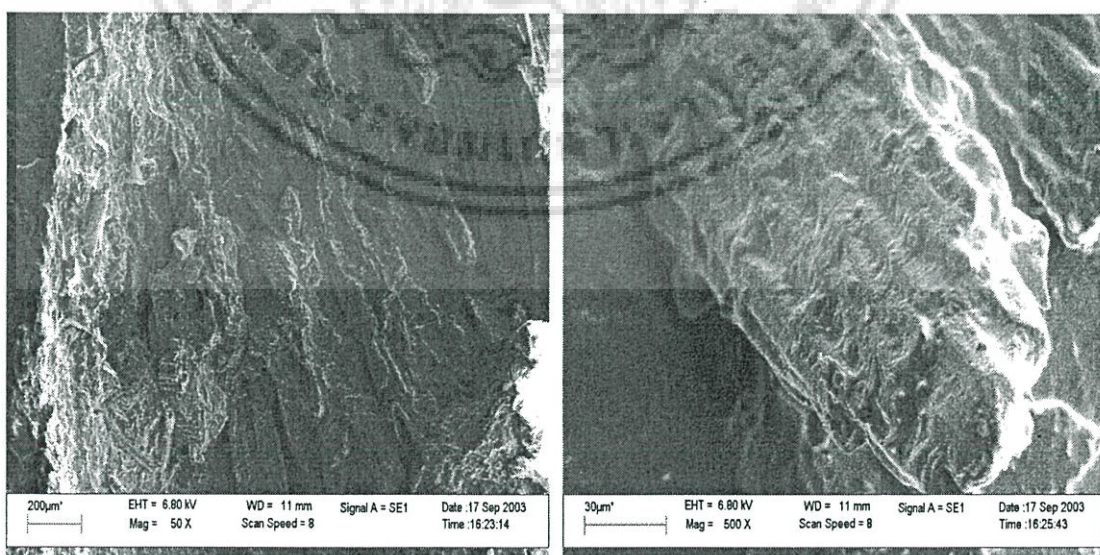
พีวีซีที่มีการยึดเกาะกับเส้นใย ETMP, EMP และ VTMP ได้ดีพอสมควร และไม่พบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคพีวีซีกับเส้นใย ETMP, EMP และ VTMP แต่มีการพบช่องที่เส้นใย VMP หลุดออกจากพีวีซีเมตริกซ์ แสดงว่าพีวีซีคอมโพสิตมีการเสียสภาพที่บริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาค (Interface) ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ต่ำสุดเมื่อเทียบกับพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP, EMP และ VTMP



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.44 ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

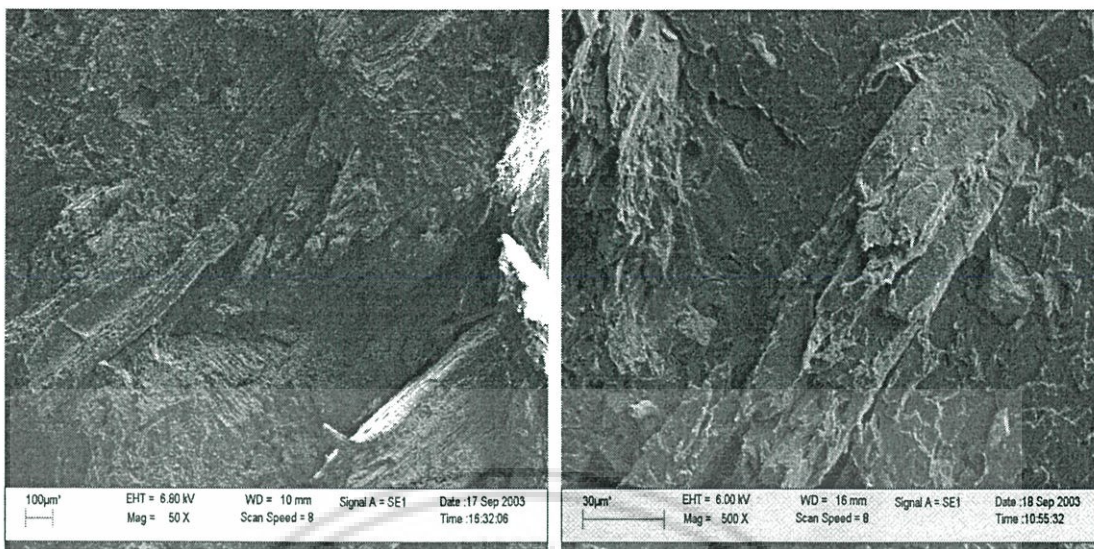


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.45 ลักษณะวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VTMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

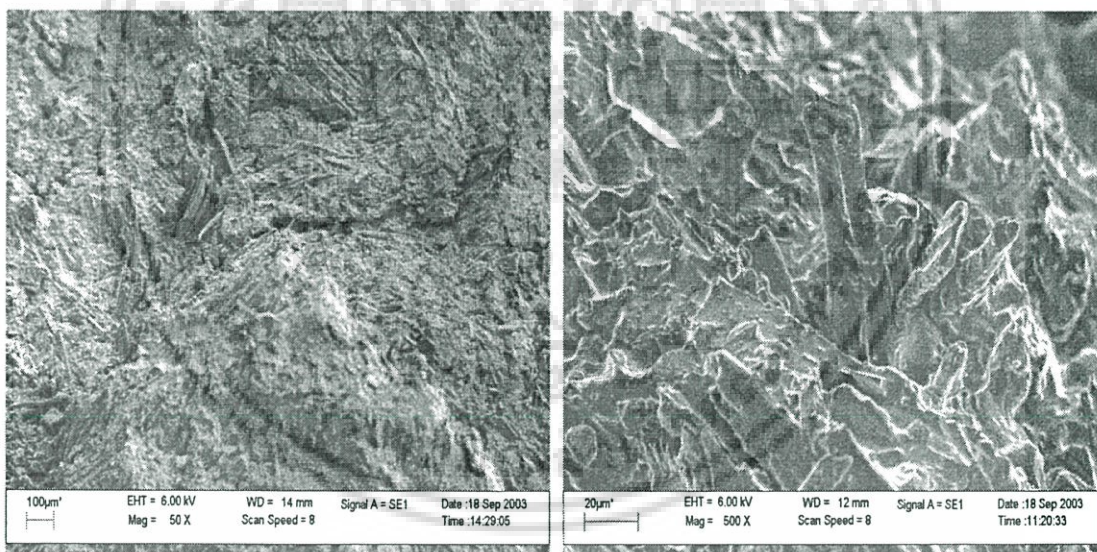
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.46 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย EMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



(ก)

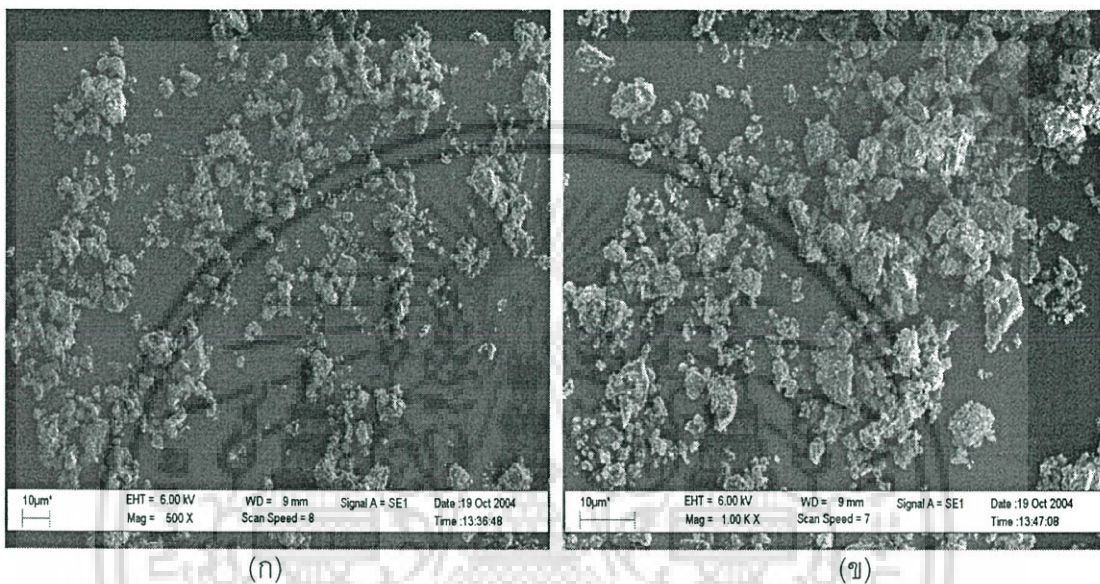
(ข)

รูปที่ 4.47 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และ  $\text{CaCO}_3$  40 phr (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

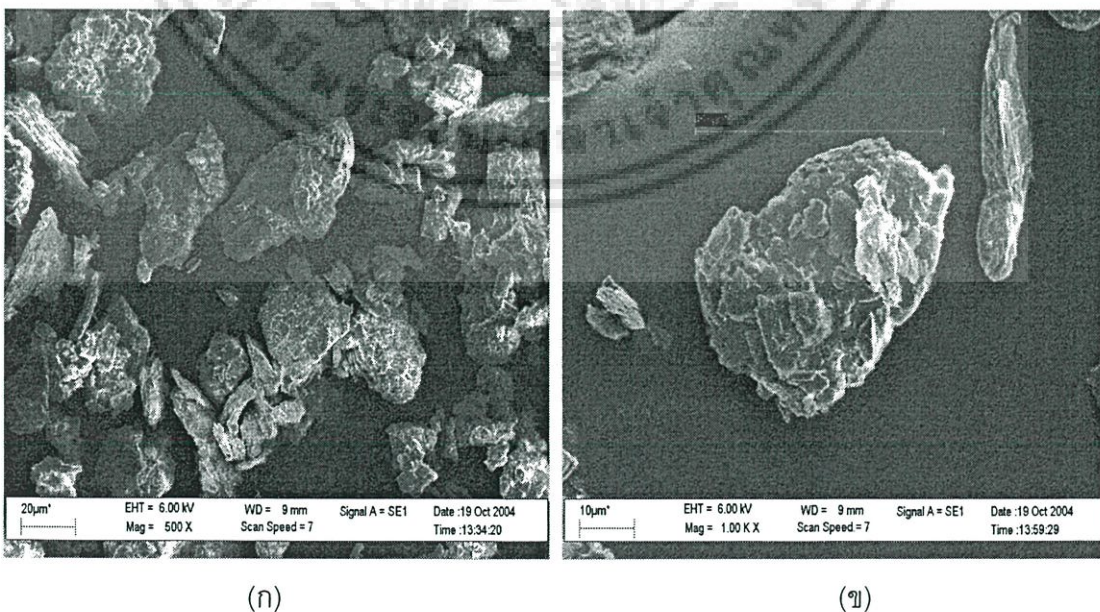
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การศึกษาผลของสารตัวเติมในพีวีซีคอมโพสิต

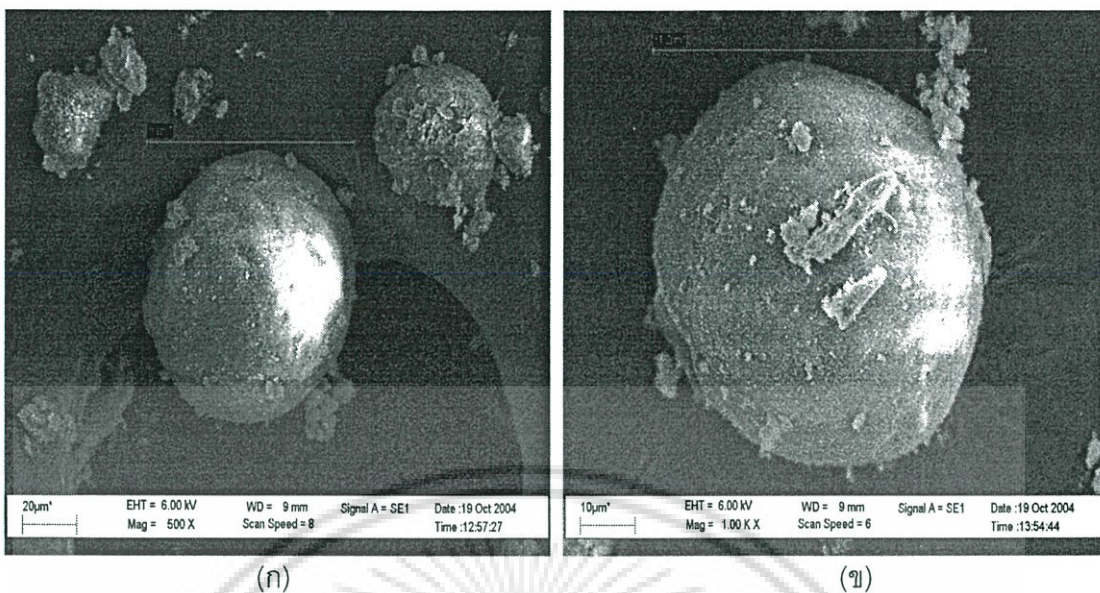
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารตัวเติม 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัมและซิลิกา ซึ่งพีวีซีคอมโพสิตที่ศึกษาเติมเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมกระบวนการเชิงกล 30 phr และ DOP 5 phr โดยทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัม และซิลิกา ในปริมาณ 0-40 phr ซึ่งลักษณะวิทยาของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4.48-4.50 ตามลำดับ



รูปที่ 4.48 ลักษณะวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต (ก) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า



เอกสารรูปที่ 4.49 ลักษณะวิทยาของทัลคัม (ก) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่าการค้นคว้าครั้งนี้พบว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

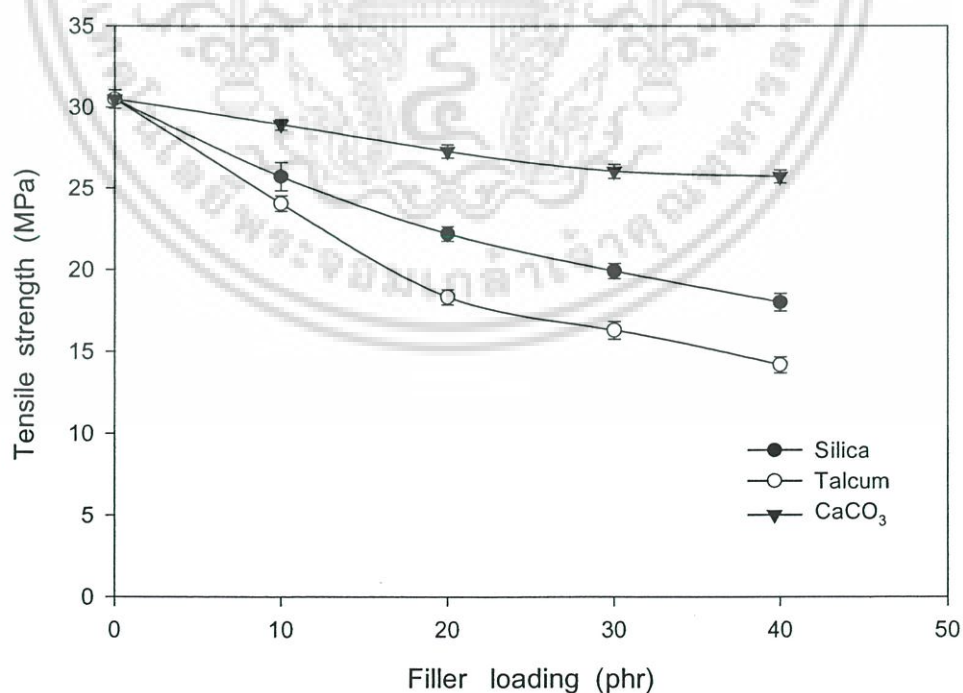


รูปที่ 4.50 สัณฐานวิทยาของซิลิกา (ก) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

#### 4.5.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม

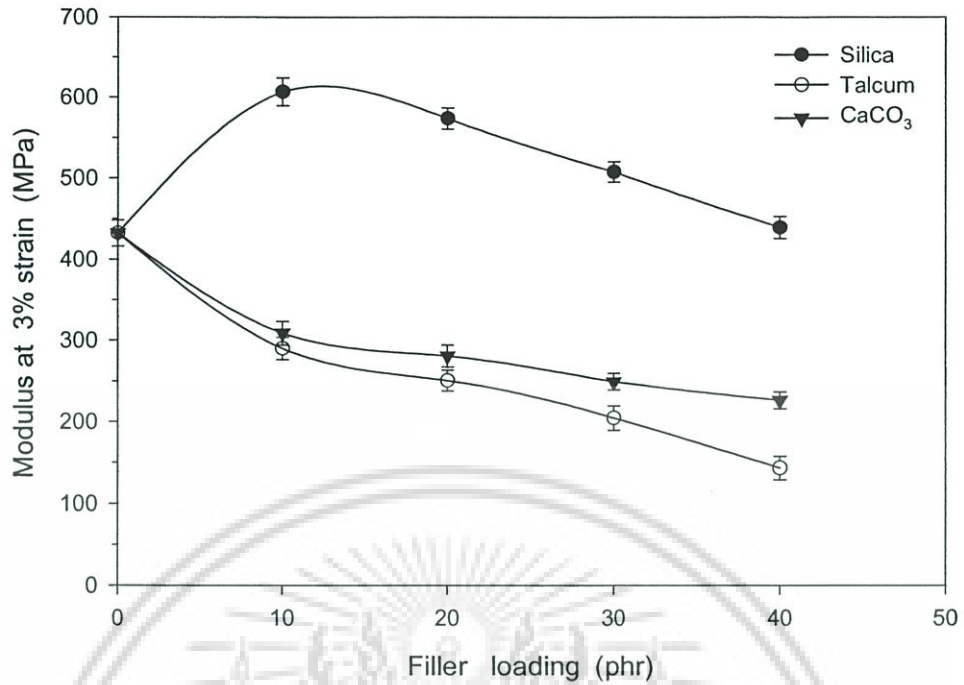
ผลของสมบัติเชิงกลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติมที่ได้จากการทดสอบแสดงดัง

รูปที่ 4.51-4.57

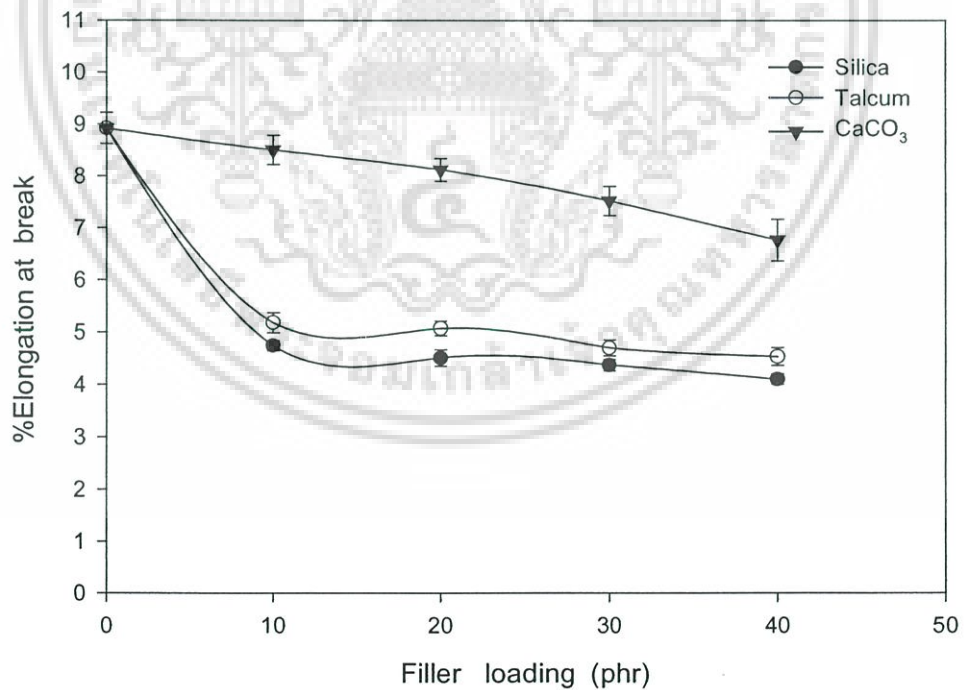


รูปที่ 4.51 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสาร DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

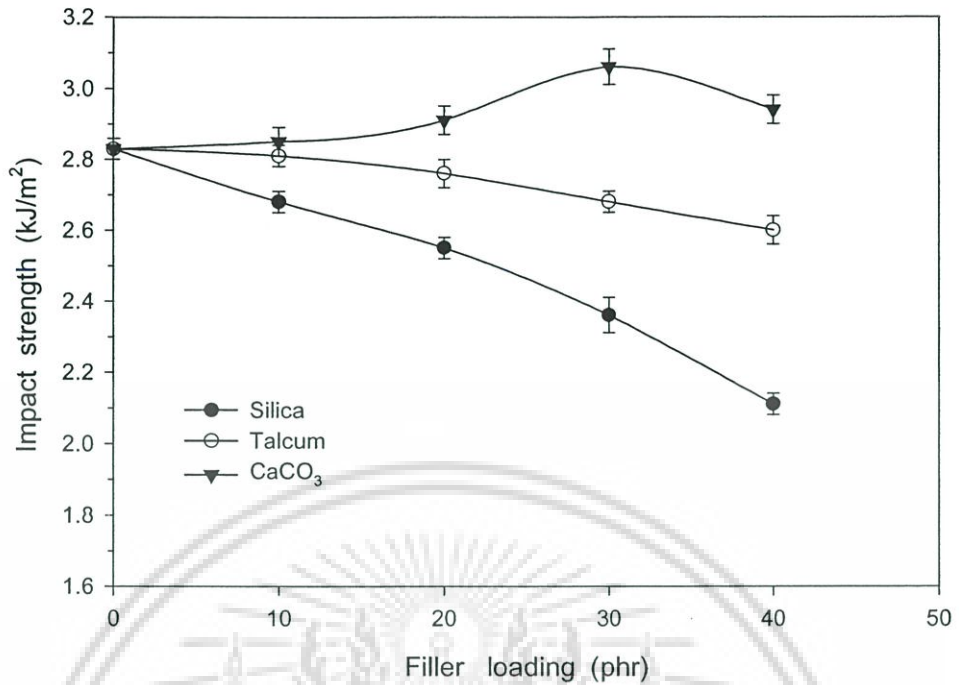


รูปที่ 4.52 ค่ามอดุลัสที่ 3 % การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

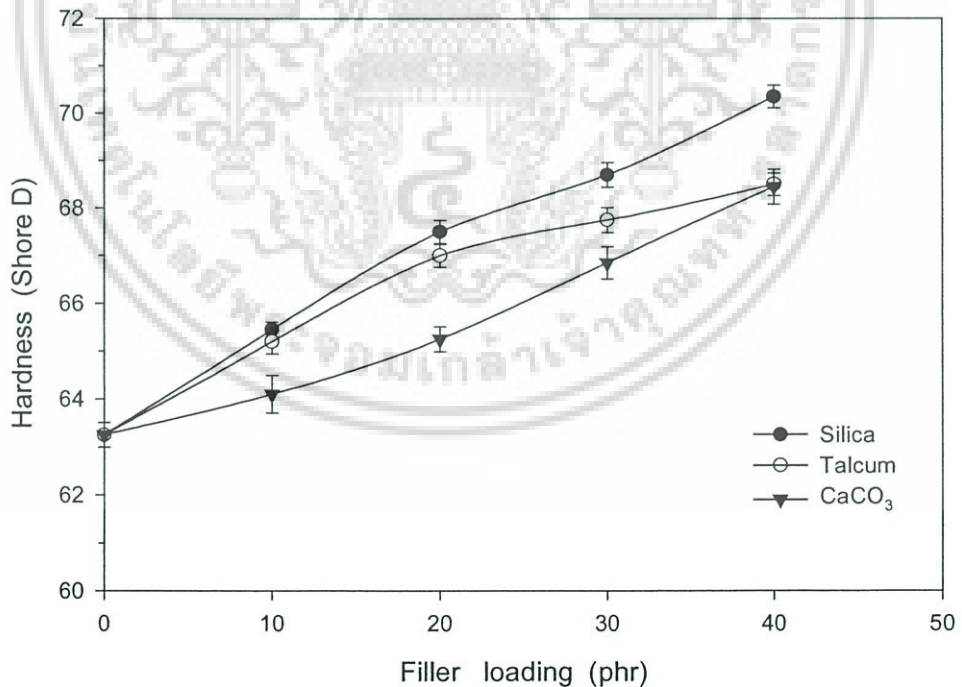


รูปที่ 4.53 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

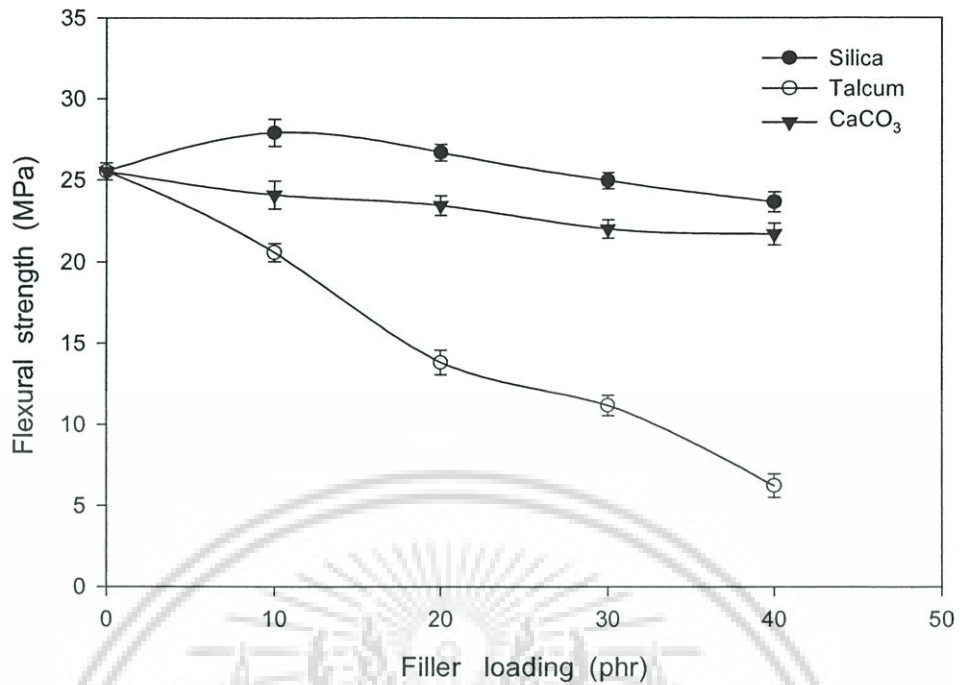


รูปที่ 4.54 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

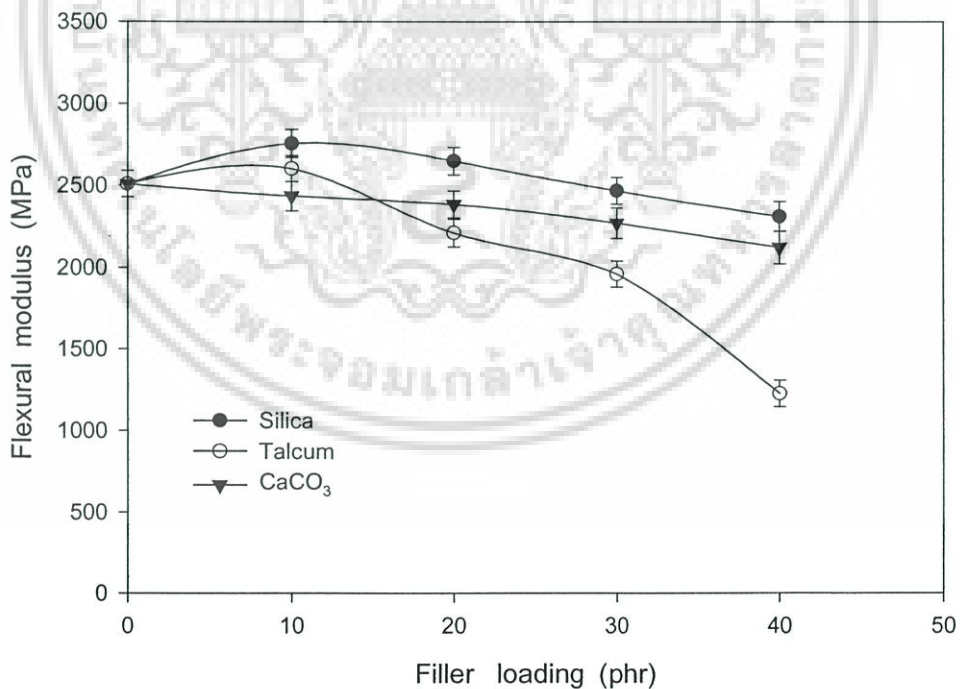


รูปที่ 4.55 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 ค่าความแข็งแรงโค้งของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr



รูปที่ 4.57 ค่ามอดุลัสโค้งของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.51 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าพีวีซีคอมโพสิตได้เติมเส้นใย VMP 30 phr โดยพีวีซียึดเกาะกับเส้นใย VMP เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นจึงยึดเกาะกับพีวีซีได้เพียงบางส่วน ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตลดลง โดยค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ แคลเซียมคาร์บอเนต>ทัลคัม>ซิลิกา เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (2.7  $\mu\text{m}$ ) เมื่อเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิด และมีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกจึงมีการกระจายตัวดีกว่า ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงมีค่ามากกว่า

จากรูปที่ 4.52 แสดงค่ามอดูลัสที่ 3 % การยืดของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าค่ามอดูลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัมเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกามีค่าเพิ่มมากกว่าไม่เติมสารตัวเติม โดยมีมอดูลัสที่ 3% การยืดมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณซิลิกาเท่ากับ 10 phr ค่ามอดูลัสที่ 3% การยืดของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>แคลเซียมคาร์บอเนต>ทัลคัม เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิด (ทัลคัมและแคลเซียมคาร์บอเนต)

จากรูปที่ 4.53 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เพราะวสารตัวเติมมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นต่ำกว่าพีวีซี ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พีวีซีเมื่อได้รับแรงดึง โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ แคลเซียมคาร์บอเนต>ทัลคัม>ซิลิกา เนื่องจากขนาดอนุภาคของสารตัวเติมเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต [41]

จากรูปที่ 4.54 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติม 2 ชนิด (ทัลคัมและซิลิกา) เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (2.7  $\mu\text{m}$ ) เมื่อเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิดและมีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกจึงมีการกระจายตัวดีกว่า ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ แคลเซียมคาร์บอเนต>ทัลคัม>ซิลิกา ซึ่งค่าความแข็งแรงกระแทกจะขึ้นกับขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาค โดยขนาดอนุภาคของสารตัวเติมเรียงจากน้อยไปมากดังนี้ แคลเซียมคาร์บอเนต>ทัลคัม>ซิลิกา ซึ่งขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่เล็กทำให้พีวีซีคอมโพสิตรับแรงกระแทกได้ดีกว่า

จากรูปที่ 4.55 แสดงค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิต พบว่าค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เพราะว่าสารตัวเติมเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งทำให้พีวีซีคอมโพสิตรับแรงกดได้เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งของสารตัวเติมเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต [41] ส่งผลให้ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าดังนี้ ซิลิกา>ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต

จากรูปที่ 4.56-4.57 แสดงค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา (0-10 phr) ทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เพราะว่าซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็ง แต่ปริมาณซิลิกาที่มากเกินไป (20-40 phr) การยึดเกาะของพีวีซีกับซิลิกาไม่ดี ส่วนพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมอีก 2 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม) มีค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>แคลเซียมคาร์บอเนต>ทัลคัม เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม) [41]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติม 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัมและซิลิกา พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกา 10 phr มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด

#### 4.5.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม

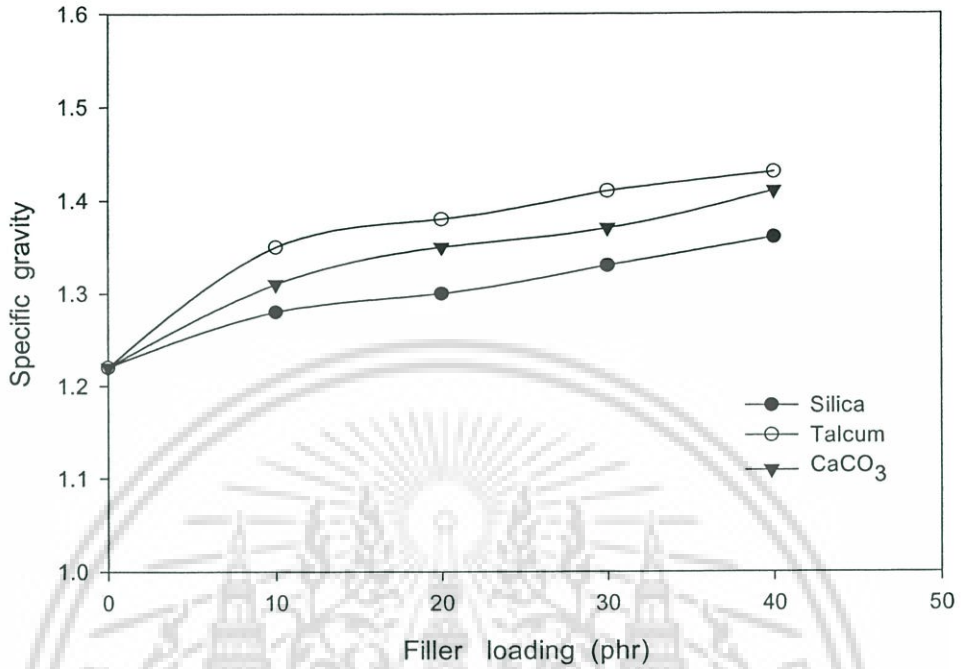
สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.58

จากรูปที่ 4.58 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยค่าความถ่วงจำเพาะของสารตัวเติมเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต>ซิลิกา เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของสารตัวเติม ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกามีค่า 2.75 2.7 และ 2.2 g/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ ซึ่งค่า

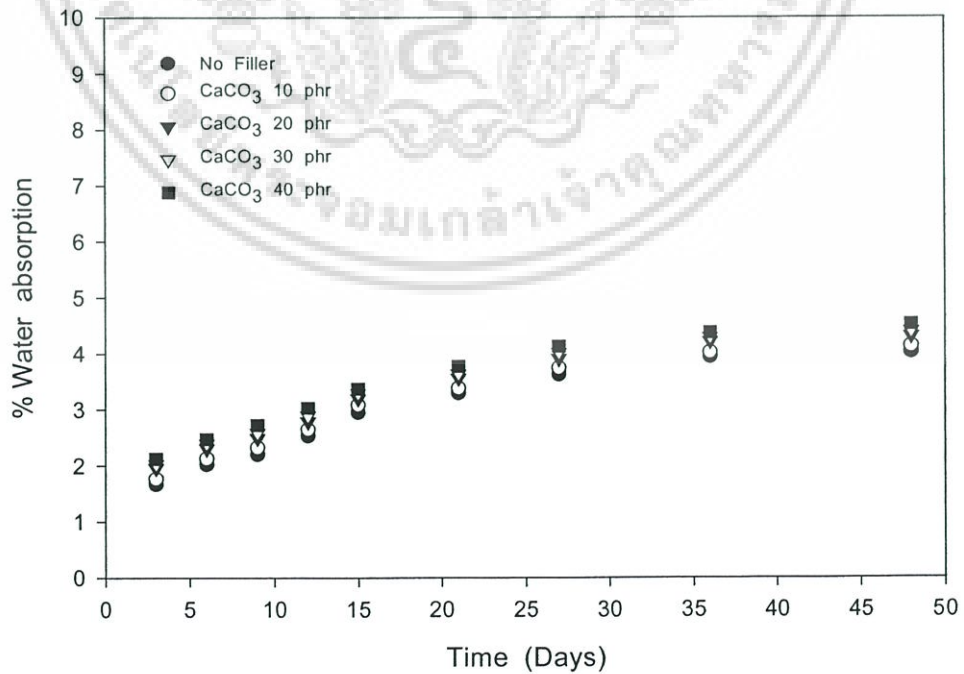
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถ่วงจำเพาะของสารตัวเติมมีค่ามากกว่าพีวีซี (1.4 g/cm<sup>3</sup>) จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติม

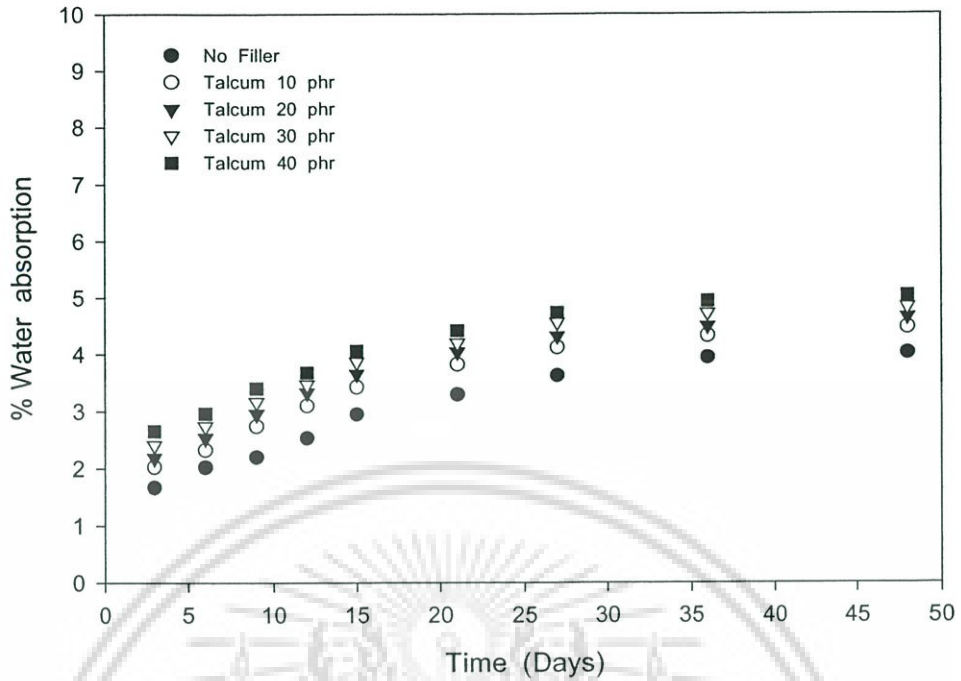


รูปที่ 4.58 ค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

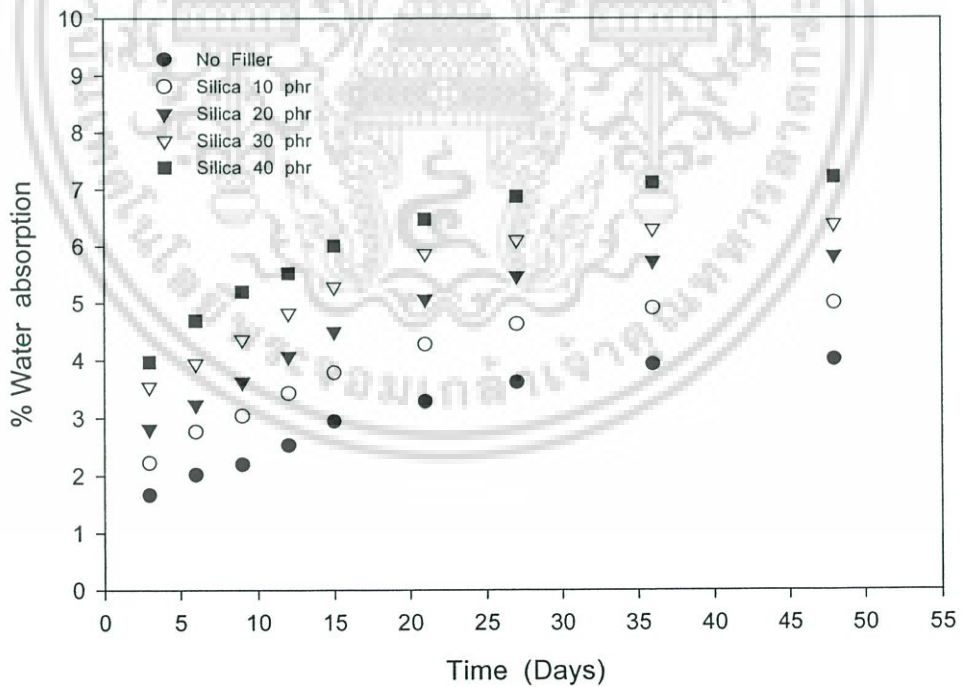
2. เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.59-4.61



รูปที่ 4.59 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 0-40 phr ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมทัลคัม 0-40 phr



รูปที่ 4.61 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมซิลิกา 0-40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.59 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 0-40 phr พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ดูดซับน้ำจึงไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.60 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมทัลคัม 0-40 phr พบว่าเมื่อปริมาณทัลคัมเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจคาดได้ว่าน้ำสามารถแทรกเข้าไปในพีวีซีคอมโพสิตที่บริเวณรอยต่อที่ไม่แข็งแรง โมเลกุลของน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ในเส้นใย VMP จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.61 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมซิลิกา 0-40 phr พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

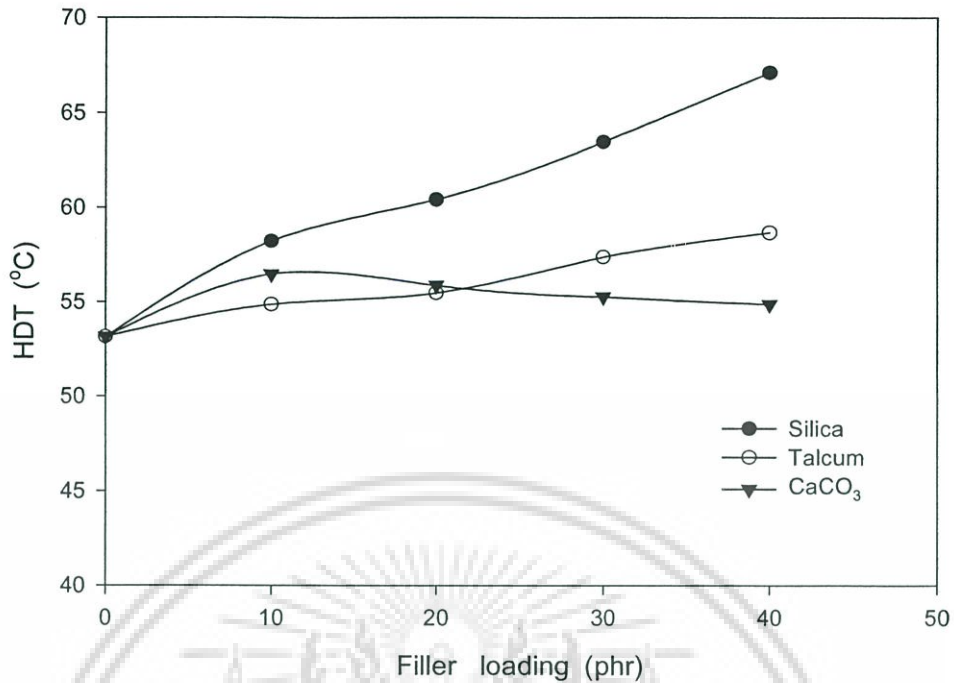
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติม พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต

#### 4.5.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม

สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน จากเครื่องทดสอบทางความร้อน HDT ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.62

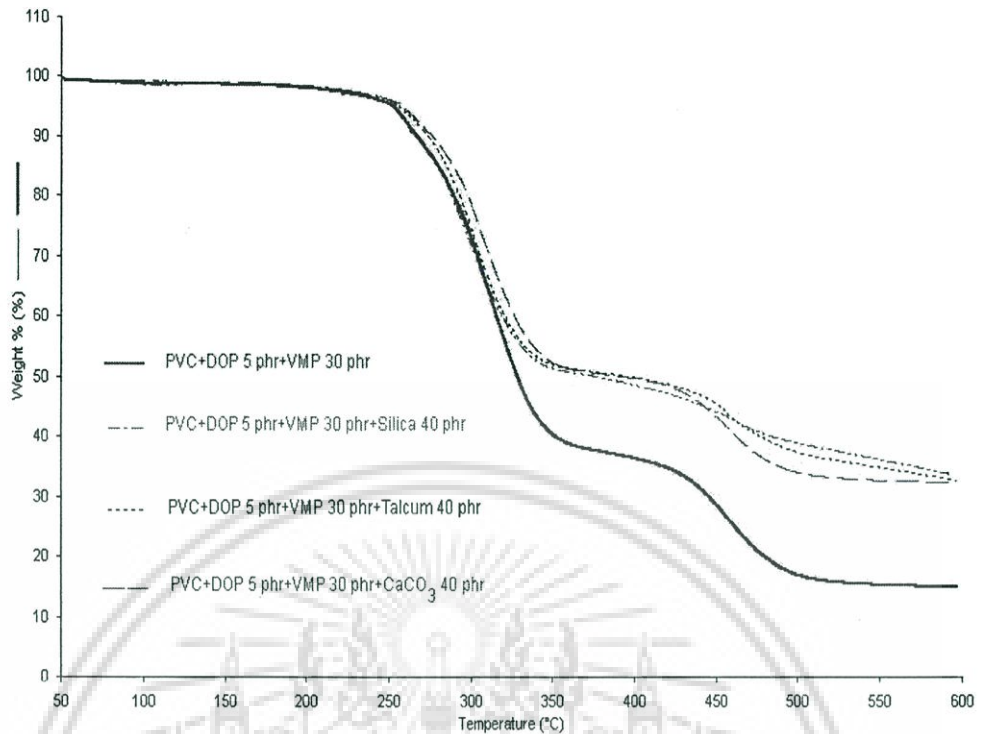
จากรูปที่ 4.62 แสดงค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr พบว่าค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องจากค่าความแข็งและสมบัติทางความร้อนของสารตัวเติมเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ซิลิกา>ทัลคัม>แคลเซียมคาร์บอเนต [41]



รูปที่ 4.62 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0-40 phr

2. อุณหภูมิการสลายตัว จากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA ได้ผลการทดสอบแสดง ดังรูปที่ 4.63

จากรูปที่ 4.63 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0 และ 40 phr พบว่าอุณหภูมิสลายตัวเริ่มต้นของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติม 40 phr มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเกิดการสลายตัวได้ช้ากว่าพีวีซีคอมโพสิตที่ไม่เติมสารตัวเติม โดยการสลายตัวช่วงที่หนึ่งเป็นการสลายตัวของพีวีซีและสารเติมแต่งที่ระเหยง่าย ส่วนการสลายตัวช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของเส้นใยไม้ มีน้ำหนักเหลือจากการสลายตัวของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติม 3 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัมและซิลิกา) 40 phr มากกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่ไม่เติมสารตัวเติม เพราะว่าอุณหภูมิการสลายตัวของสารตัวเติม 3 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัมและซิลิกา) สูงกว่า 600 °C [41]



รูปที่ 4.63 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0 และ 40 phr

3. อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ได้ผลการทดสอบแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติม

สูตรของพีวีซีคอมโพสิต	$T_g$ (°C)	$\tan \delta$
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr	68.4	0.739
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + CaCO <sub>3</sub> 40 phr	70.7	0.710
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ทัลคัม 40 phr	70.5	0.695
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 40 phr	72.8	0.631

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติม พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม 0 และ 40 phr พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 phr ทำให้ค่า  $T_g$  ของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัม และซิลิกาเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็ง ทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งเพิ่มขึ้นจึงต้องให้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้ค่า  $T_g$  ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกา 40 phr มีค่า  $T_g$  มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม ทั้งนี้เพราะว่าซิลิกามีค่าความแข็งมากที่สุด [41] แต่ค่า  $\tan \delta$  ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจากสารตัวเติมที่เติมในพีวีซีคอมโพสิตทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งเพิ่มขึ้น

#### 4.5.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม

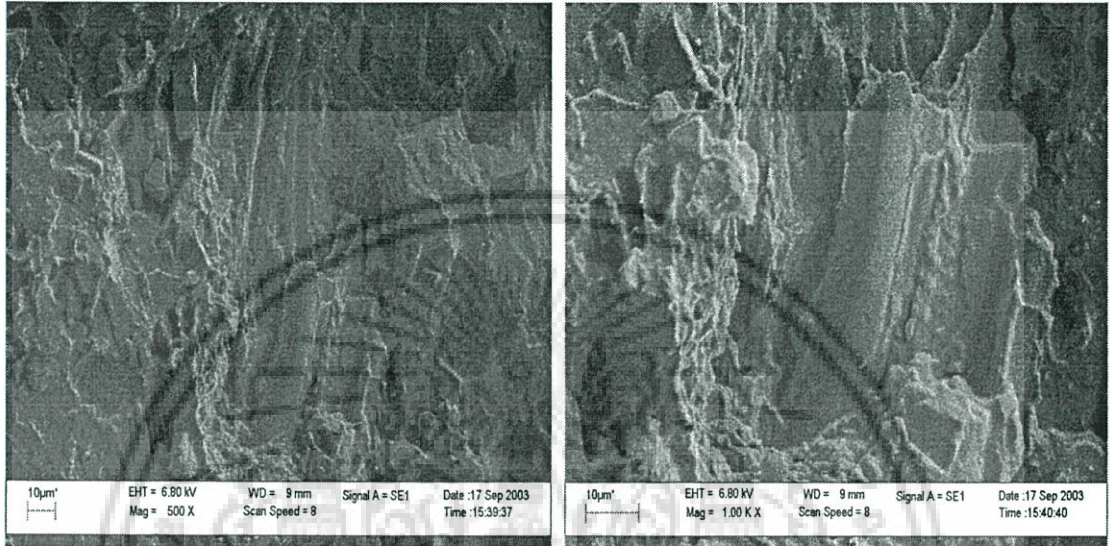
ตารางที่ 4.6 อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม

สูตรของพีวีซีคอมโพสิต	อัตราการเข้าทำลาย (%)
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr	0.97
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + CaCO <sub>3</sub> 10 phr	0.26
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + CaCO <sub>3</sub> 20 phr	0.75
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + CaCO <sub>3</sub> 30 phr	0.60
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + CaCO <sub>3</sub> 40 phr	0.35
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ทัลคัม 10 phr	0.62
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ทัลคัม 20 phr	2.97
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ทัลคัม 30 phr	2.91
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ทัลคัม 40 phr	1.26
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 10 phr	0.52
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 20 phr	1.31
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 30 phr	1.39
PVC + VMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 40 phr	0.35
Control	26.87

จากตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัมและซิลิกา) 0-40 phr ใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบแบบบังคับและใช้ไม้ยางพาราเป็นตัวควบคุม พบว่าอัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวควบคุม เอกสารนี้คุ้มและควมเสียหายเกิดการทำลายที่ผิวของพีวีซีคอมโพสิตเท่านั้น แต่จึงมีประสิทธิภาพของความไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

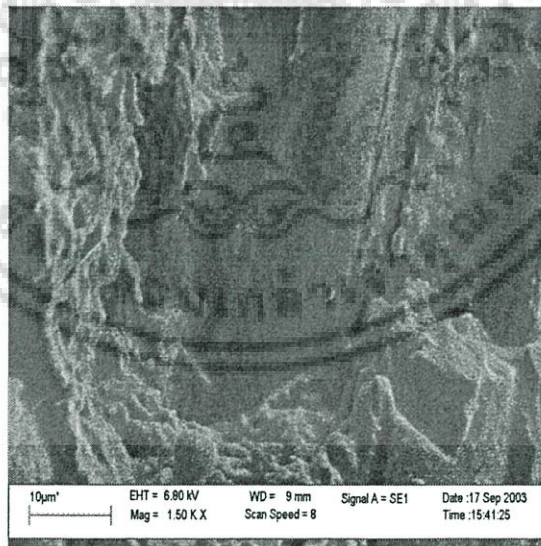
ทนทานต่อปลวกอยู่ในระดับ “น่าพึงพอใจ” เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการเข้าทำลายของปลวกมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะว่ปลวกกินเส้นใยไม้เท่านั้น

#### 4.5.5 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสารตัวเติม



(ก)

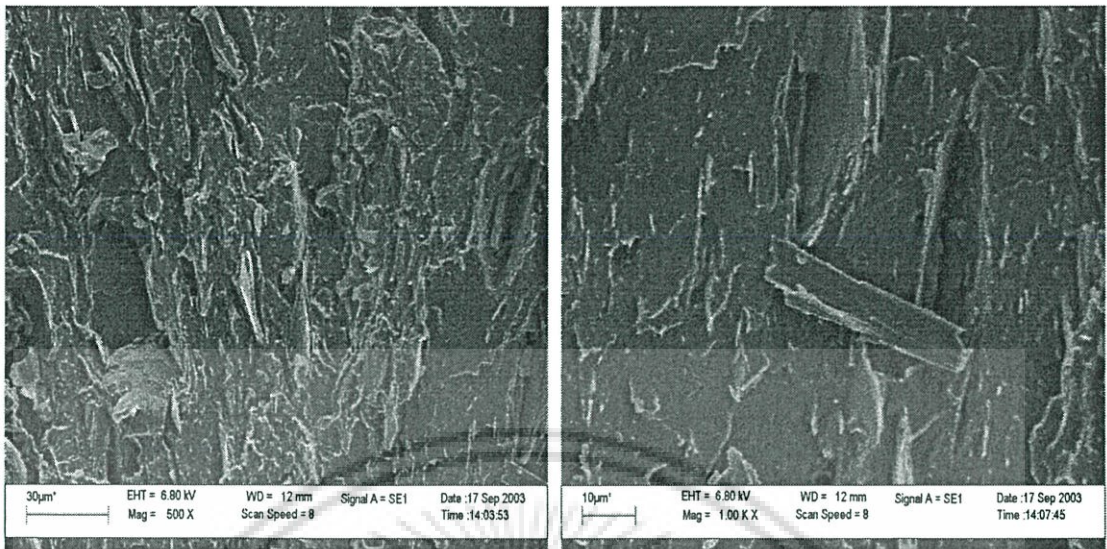
(ข)



(ค)

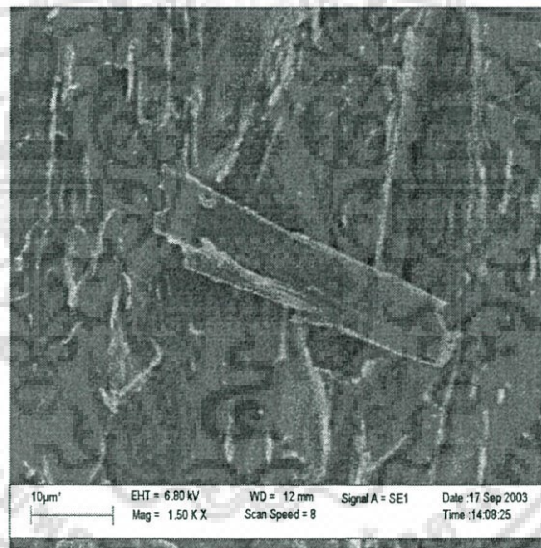
**รูปที่ 4.64** สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติม  $\text{CaCO}_3$  40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

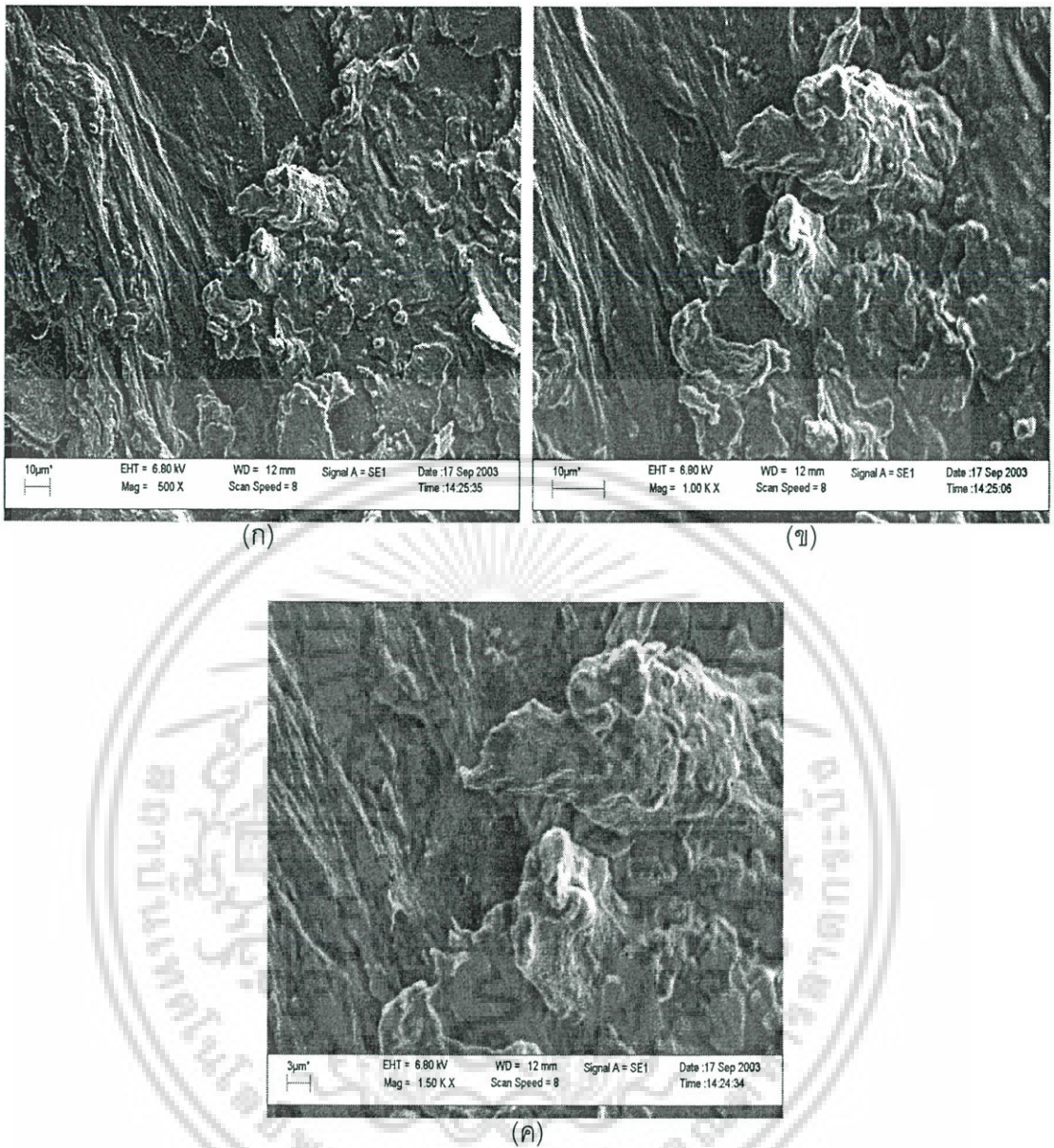
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.65 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมทัลคัม 40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.66 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมซิลิกา 40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.64-4.66 แสดงสัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และเติม DOP 5 phr เมื่อเติมสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัมและซิลิกา) 40 phr (ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมในพีวีซีคอมโพสิตไม่ดีและเข้าไปแทรกระหว่างพีวีซีกับเส้นใย VMP ทำให้ความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างพีวีซีกับเส้นใยไม่ลดลง (เกิดช่องที่เส้นใยหลุดออกในขณะที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหักชิ้นงานพีวีซีคอมโพสิต) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น

#### 4.6 การศึกษาผลการรีไซเคิลของพีวีซีคอมโพสิต

ในการศึกษาผลการรีไซเคิลของพีวีซีคอมโพสิต โดยพีวีซีคอมโพสิตที่ศึกษาใช้เส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr ด้วย (โดยนำผลการทดลองตอนที่ 4.2-4.5 ที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด) มาทำการศึกษผลการรีไซเคิล

##### 4.6.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

ผลของสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติต่าง ๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

	Recycle 0 ครั้ง	Recycle 1 ครั้ง	Recycle 2 ครั้ง
ความแข็งแรงดึง (MPa)	28.00	24.81	22.62
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (MPa)	622.29	554.62	481.19
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	5.52	5.05	4.44
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	2.95	2.67	2.58
ความแข็งกด (Shore D)	66.45	66.05	65.65
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	30.27	18.95	11.40
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	3,274.36	2,844.46	2,402.82
ความหนาแน่น (Specific gravity)	1.31	1.30	1.30
HDT (°C)	59.7	58.2	57.6

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP ขนาด 20-50 mesh 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล ตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เชิงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เพราะว่า การรีไซเคิลทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันโดยผ่านกลไกการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพีวีซีสั้นลง และเส้นใย ETMP มีขนาดเล็กลงเนื่องจากผ่านกระบวนการบด ส่งผลให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างพีวีซีกับเส้นใย ETMP ลดลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลดังที่กล่าวมามีค่าลดลง

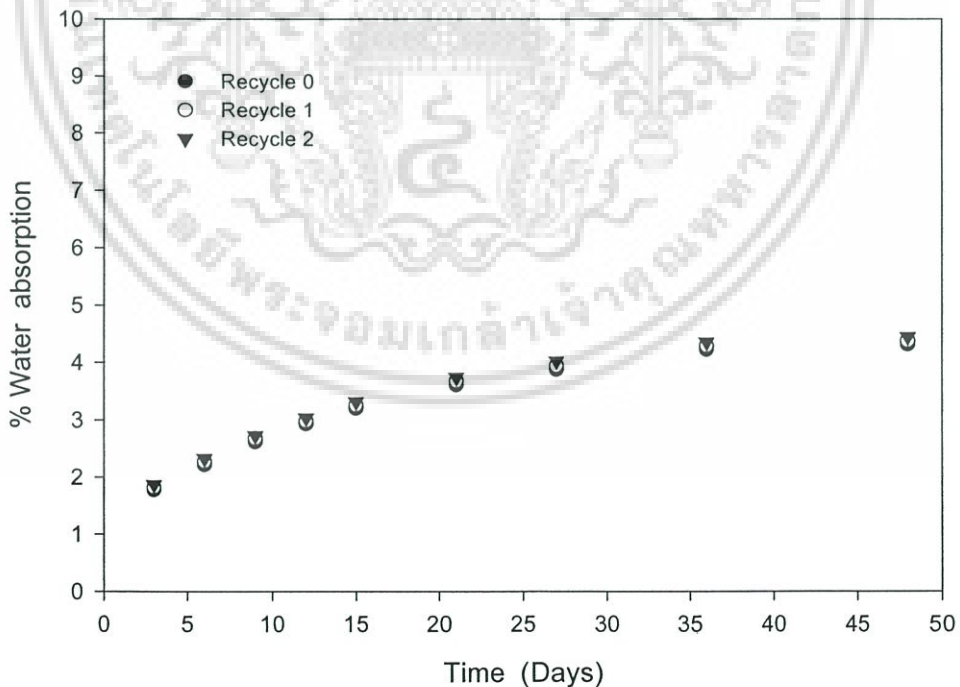
#### 4.6.2 สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

สมบัติทางกายภาพของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

- 1. ความถ่วงจำเพาะ ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิต เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียง เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นกับกฎของผสม

- 2. เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.67



รูปที่ 4.67 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

จากรูปที่ 4.67 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิต เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล ตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าใกล้เคียง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำจะขึ้นกับปริมาณของสารตัวเติมที่ดูดซับน้ำได้ (เส้นใย ETMP และซิลิกา) การรีไซเคิลจึงไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

#### 4.6.3 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

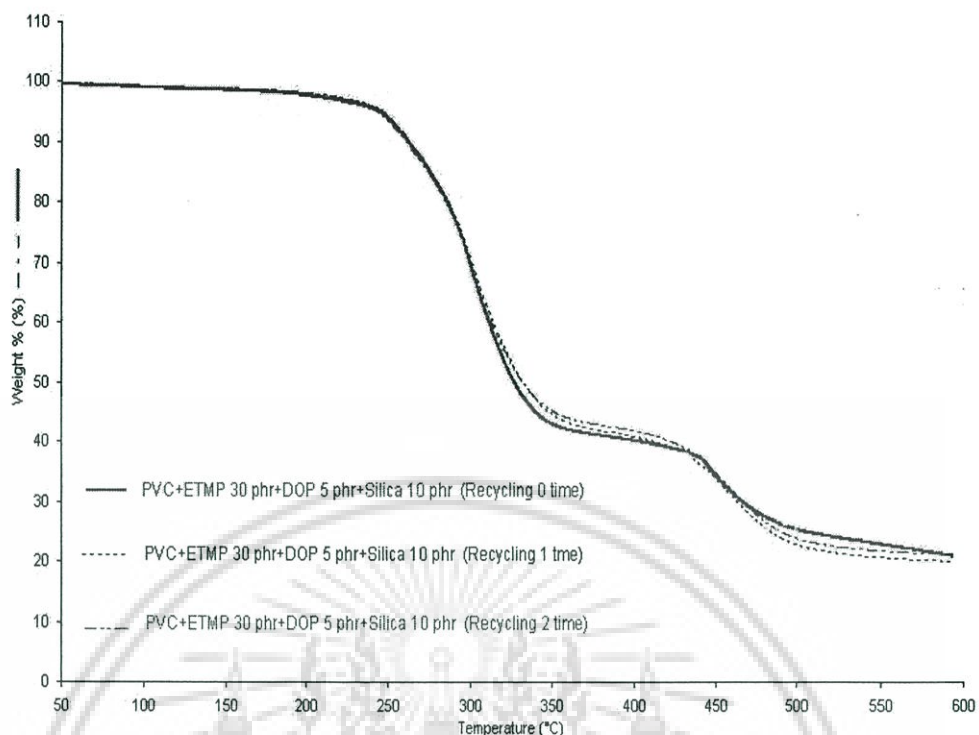
สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ทำการทดสอบ มีดังนี้

1. อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน จากเครื่องทดสอบทางความร้อน HDT ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิต เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล พบว่าค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เพราะว่าการรีไซเคิลทำให้สายโซ่ของพีวีซีสั้นลงส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง เมื่อได้พีวีซีคอมโพสิตได้รับความร้อนภายใต้แรงกดคงที่จึงทำให้ HDT มีค่าลดลง

2. อุณหภูมิการสลายตัว จากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.68

จากรูปที่ 4.68 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิต เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าใกล้เคียงกัน แต่น้ำหนักที่เหลือจากการสลายตัวของพีวีซีคอมโพสิตที่ไม่มีการรีไซเคิลมีค่ามากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการรีไซเคิลทำให้พีวีซีมีสายโซ่โมเลกุลสั้นลงและขนาดเส้นใย ETMP เล็กลง ความร้อนสามารถกระจายตัวในพีวีซีคอมโพสิตได้ง่ายและเร็วขึ้น จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ดีกว่า



รูปที่ 4.68 กราฟ TGA พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

3. อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA ได้ผลการทดสอบแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.8

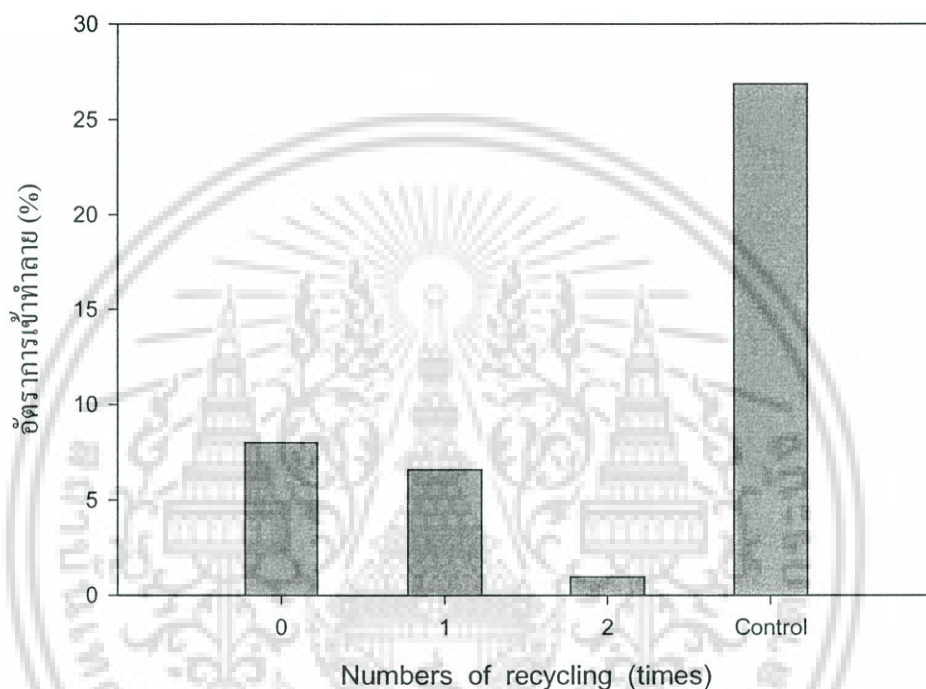
ตารางที่ 4.8 ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

สูตรของพีวีซีคอมโพสิต	$T_g$ (°C)	$\tan \delta$
PVC + ETMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 10 phr (Recycle 0 ครั้ง)	73.7	0.739
PVC + ETMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 10 phr (Recycle 1 ครั้ง)	72.6	0.750
PVC + ETMP 30 phr + DOP 5.0 phr + ซิลิกา 10 phr (Recycle 2 ครั้ง)	71.9	0.789

จากตารางที่ 4.8 ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA เมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล ซึ่งพีวีซีคอมโพสิตที่ศึกษาเตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล พบว่าเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นทำให้ค่า  $T_g$  ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะว่าการรีไซเคิลจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันโดยผ่านกลไกการขจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ทำให้สายโซ่ของพีวีซีสั้นลงจึงเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น พลังงานที่ให้กับพีวีซีคอมโพสิตในการเปลี่ยนสถานะจึงน้อยลง แต่ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\tan \delta$  ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรีไซเคิลจะทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตมีค่ามอดุลัสลดลง

#### 4.6.4 ความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล



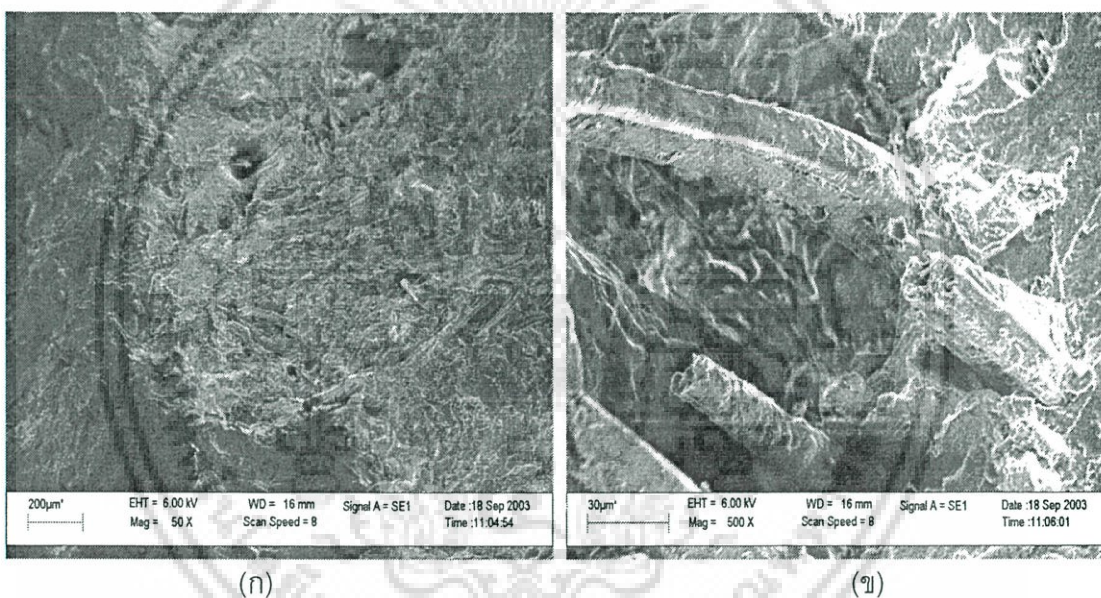
รูปที่ 4.69 กราฟอัตราการทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

จากรูปที่ 4.69 แสดงกราฟอัตราการทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล ใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบแบบบังคับและใช้ไม้ยางพาราเป็นตัวควบคุม พบว่าอัตราการทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมาก (0.98-8.00%) เมื่อเทียบกับตัวควบคุม ซึ่งความเสียหายเกิดที่ผิวของพีวีซีคอมโพสิตเท่านั้น ดังนั้นประสิทธิภาพของความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิตอยู่ในระดับ “น่าพึงพอใจ” เมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการทำลายของปลวกมีแนวโน้มลดลง เพราะว่าการรีไซเคิลเกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชันผ่านกลไกการขจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ เนื่องจากพีวีซีคอมโพสิตมีไฮโดรเจนคลอไรด์อยู่ ปลวกจึงเข้าทำลายพีวีซีคอมโพสิตลดลง

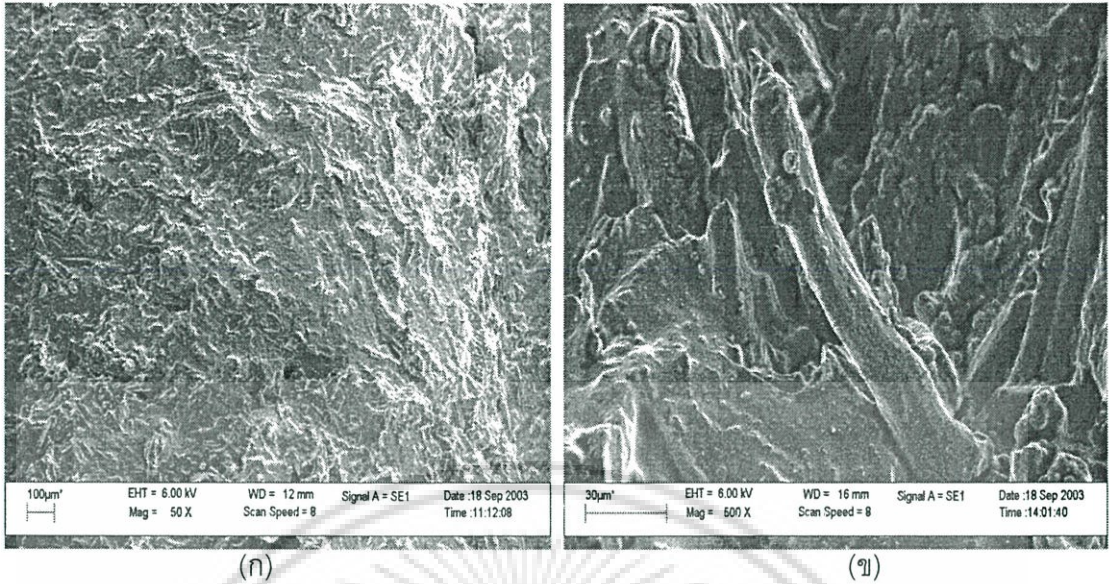
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.5 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล

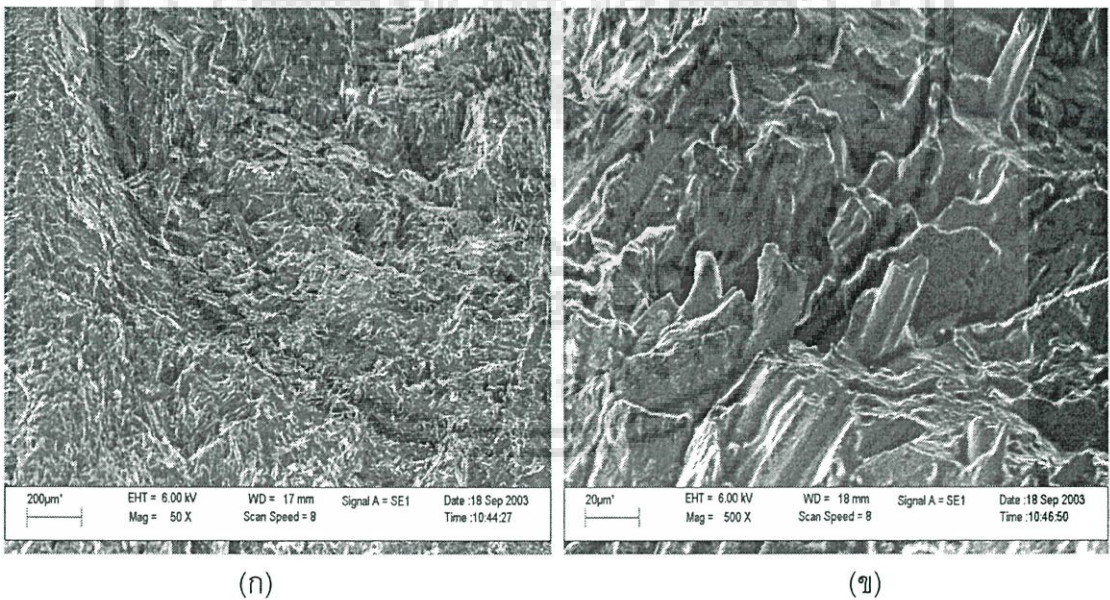
จากรูปที่ 4.70-4.72 แสดงสัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิล (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าเมื่อทำการหักชิ้นงานพีวีซีคอมโพสิตจะพบช่องที่เส้นใย ETMP หลุดออกจากพีวีซีคอมโพสิตมากขึ้นตามจำนวนครั้งที่รีไซเคิล เพราะว่าการรีไซเคิลทำให้สายโซ่ของพีวีซีสั้นลงและเส้นใย ETMP มีขนาดเล็กกลง ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างพีวีซีกับเส้นใยไม่ดีนัก ดังนั้นสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตจึงมีค่าลดลงตามจำนวนครั้งในการรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.70 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อไม่มีการรีไซเคิล (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.71 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 1 ครั้ง (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.72 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยเติม DOP 5 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 2 ครั้ง (ก) กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของพีวีซีคอมโพสิต

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของพีวีซีคอมโพสิต โดยคิดต้นทุนของพีวีซีคอมโพสิตที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพีวีซีคอมโพสิต

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>a</sup>	คิดเป็นเงิน (บาท)
1. PVC resin ชนิด Suspension เกรด <sup>®</sup> 266 GS	1,000 กรัม	56 บาท/กก.	56.00
2. Cereclor <sup>®</sup> S52	30 กรัม	40 บาท/กก.	1.20
3. Cd-Zn stabilizer	30 กรัม	125 บาท/กก.	3.75
4. Stearic acid	20 กรัม	26 บาท/กก.	0.52
5. PE wax	15 กรัม	80 บาท/กก.	1.20
6. Epoxydized soybean oil	50 กรัม	57 บาท/กก.	2.85
7. Sythetic precipitated silica เกรด Hi-Sil <sup>®</sup> 255-S	100 กรัม	28 บาท/กก.	2.80
8. Dioctyl phtalate (DOP)	50 กรัม	58 บาท/กก.	2.90
9. เส้นใย ETMP ขนาด 20-50 mesh	300 กรัม	8 บาท/กก. <sup>b</sup>	2.40
5. ค่าแรง	1 ชั่วโมง	173 บาท/วัน <sup>c</sup>	7.21
6. ค่าไฟฟ้า	5 unit	2.5 บาท/unit	12.50
รวมน้ำหนัก 1.595 กก.			93.33

หมายเหตุ<sup>a</sup> เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนตุลาคม 2547

<sup>b</sup> เป็นค่าแรงที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย ETMP และการขนส่ง

<sup>c</sup> เป็นราคาค่าแรงขั้นต่ำ

<sup>d</sup> ราคานี้ไม่รวมต้นทุน เครื่องจักรและค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร

$$\begin{aligned} \text{รวมต้นทุนของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมเส้นใย ETMP 30 phr และซิลิกา 10 phr}^d &= 93.33/1.595 \\ &= 58.5 \text{ บาท/กก} \end{aligned}$$

ซึ่งต้นทุนของพีวีซีคอมโพสิตนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับราคาไม้ที่มีขายตามท้องตลาด เอกสารนี้โดยคิดเทียบราคาต่อน้ำหนักการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพีวีซีและเส้นใยธรรมชาติ (ยูคาลิปตัสและหญ้าแฝก) โดยทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ ผลของปริมาณ DOP ผลของชนิดเส้นใยไม้ ผลของสารตัวเติม และผลการรีไซเคิล ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
  - ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสม คือ 30 phr
  - ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของพีวีซีคอมโพสิต
  - ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อนดีขึ้น โดยมีค่า HDT และ  $T_g$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
  - อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากและปริมาณเส้นใย VMP ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิต
  - จากฐานฐานวิทยาเห็นได้ว่า การกระจายตัวของเส้นใยไม้ไม่ดีเมื่อปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มขึ้น บางบริเวณมีเส้นใยไม้มาก บางบริเวณไม่มีเส้นใยไม้อยู่ ทำให้เกิดช่องว่างภายในพีวีซีคอมโพสิต
2. การศึกษาผลของปริมาณ DOP ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
  - ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีค่าลดลง ปริมาณ DOP ที่เหมาะสมในการผลิตพีวีซีคอมโพสิตคือ 5 phr
  - ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แต่ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อนลดลง โดยทำให้ค่า HDT และ  $T_g$  ลดลง
- อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมาก และปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิต
- จากหลักฐานวิทยาเห็นได้ว่า ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น โดยพบช่องว่างที่เส้นใย VMP หลุดออกมากขึ้น

### 3. การศึกษาผลของชนิดเส้นใยไม้ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต

- สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP คือ ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยอีก 3 ชนิด (EMP, VTMP และ VMP) เนื่องจากเส้นใย ETMP มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาณลิกนินสูงสุด เส้นใยที่เหมาะสมในการผลิตพีวีซีคอมโพสิต คือ เส้นใย ETMP
- เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VTMP มีค่ามากที่สุด แต่ชนิดของเส้นใยไม้ที่ใช้ไม่มีผลต่อความถ่วงจำเพาะ
- พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยชนิดต่าง ๆ มีค่า HDT และ  $T_g$  ไม่แตกต่างกัน
- อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากและพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย EMP มีอัตราการเข้าทำลายของปลวกมากที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยอีก 3 ชนิด (VMP, VTMP และ ETMP)

### 4. การศึกษาผลของสารตัวเติมที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

- พีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกาจะมีค่ามอดุลัสที่ 3% การยืด ความแข็งแรง ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับพีวีซีคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมอีก 2 ชนิด (แคลเซียมคาร์บอเนตและทัลคัม) สารตัวเติมที่เหมาะสมในการเติมในพีวีซีคอมโพสิต คือ ซิลิกา 10 phr ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด
- พีวีซีคอมโพสิตที่เติมทัลคัมมีความถ่วงจำเพาะมากที่สุด ส่วนพีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกามีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมากที่สุด
- สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตที่เติมซิลิกามีสมบัติทางความร้อนดีที่สุด (ให้ค่า HDT และ  $T_g$  มากที่สุด)
- อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากและชนิดของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากหลักฐานวิทยาเห็นได้ว่า ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายตัวในพีวีซีคอมโพสิตไม่ดี
5. การศึกษาผลของการรีไซเคิลพีวีซีคอมโพสิต
- เมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนมีค่าลดลง
  - จำนวนครั้งในการรีไซเคิลไม่มีผลต่อความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิต
  - อัตราการเข้าทำลายของปลวกในพีวีซีคอมโพสิตมีค่าน้อยมากและจำนวนครั้งในการรีไซเคิลไม่มีผลต่อความทนทานต่อปลวกของพีวีซีคอมโพสิต
  - จากหลักฐานวิทยาเห็นได้ว่า ช่องว่างที่เส้นใย ETMP หลุดออกเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงให้เส้นใย และสารตัวเติมมีการกระจายตัวและความแข็งแรงในการยึดเกาะให้เพิ่มขึ้นเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยเพื่อให้เกิดการเปียกของพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ง่าย การใส่สารคู่ควบ (Coupling agents) ฯลฯ
2. ควรทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่มีประโยชน์ เช่น แผ่นไม้กรอบหน้าต่าง และทดสอบสมบัติเทียบกับไม้จริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อิทธิพล แจ่มชัด "เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต" ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1. 2544.
- [2] วรธรรม อุ๋นจิตติชัย "รายงานความก้าวหน้าโครงการวิจัยเรื่องวัสดุประกอบพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยหญ้าแฝกและเทอร์โมพลาสติก" ชุดโครงการวิจัยการวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาปฏิสัมพันธ์ของหญ้าแฝกกับปลวกเพื่อสนองพระราชดำริพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ เพื่อเสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม: โครงการที่ 1. 2545.
- [3] มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ "เคมีพอลิเมอร์" โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 3. 2543.
- [4] F.L.Methews and R.D.Rawlings, "Composite Materials", *Engineering and Science.*, 1<sup>st</sup> ed., Oxford, 1994.
- [5] W.V.Titow, "PVC plastics properties, processing and applications", McGraw-Hill, New York, 1926.
- [6] A.Charles, "Handbook of plastic elastomers and composites", 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, New York, 1996.
- [7] W.Fred, "Textbook of polymer science", 3<sup>rd</sup> ed., Troy, New York, 1984.
- [8] J.A.Brydson, "Plastics materials", 6<sup>th</sup> ed., Sthed-Butterworths, London, 1995.
- [9] สมศักดิ์ วรมงคลชัย "สารปรับแต่งพอลิเมอร์" ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำนักพิมพ์บู๊คเน็ต พิมพ์ครั้งที่ 1. 2547.
- [10] A.K.Bledzki and J.Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibers" *Prog.Polym.Sci.*, 24, 1999, 221-274.
- [11] W.B.Banks and J.M.Lawther, "Derivatization of Wood in Composition in Cellulose" *Polymers Blends and Composites.*, Hanser Publishers, New York, 1994, 131-153.
- [12] J.I.Kroschwitz, "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", 2<sup>nd</sup> ed., John-Wiley & Sons, New York, Vol 6, 1990, 655.
- [13] "ยูคาลิปตัสคามาเดนซิส (โครงการไม้ใช้สอยชุมชน)", กรมป่าไม้และกรมพัฒนาที่ดิน,

เอกสารนี้เป็นเอกสารกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่ 2527. ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] มูลนิธิชัยพัฒนา 1996 [Online]. Available :  
<http://www.chaipat.or.th/noframe/thai/index.html>.
- [15] นวภรณ์ อนันตรณวิชัย นุชรี ปัญจะผลินกุล และพัชรี มณฑาทิพย์ "การศึกษาไม้เทียมคอมโพสิตจากผงหญ้าแฝกกับพอลิพรอพิลีน (พีพี) และเส้นใยหญ้าแฝกกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี)" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [16] วิไลพร เจตน์จันทร์ นวลจันทร์ ฉันทศาสตร์รัศมี และเรณูภา สินเสริมสุขสกุล "ไวนิลดูด: นวัตกรรมใหม่สำหรับงานตกแต่งและก่อสร้าง" เอกสารการประชุมกรมป่าไม้ด้านวัสดุทนแทนไม้ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2545. 152-160.
- [17] วรณิยา ชาญณรงค์ "ผลของปริมาณไม้และพลาสติกไซเบอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และเส้นใยไม้ยางพารา" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [18] สมภาพ เลิศลักษณ์กุล "ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และเส้นใยยูคาลิปตัส" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [19] H.G.B.Premalal, H.Ismail and A.Baharin, "Comparison of the mechanical properties of rice husk powder filled polypropylene composites with talc filled polypropylene composites", *Polymer Testing.*, 21, 2002, 833-839.
- [20] Q.Lin, X.Zhou and G.Dai, "Effect of Hydrothermal Environment on Moisture Absorption and Mechanical Properties of Wood Flour-Filled Polypropylene Composites", *Applied Polymer Science*, 85, 2001, 2824-2832.
- [21] ธีรพัฒน์ อุณหโชค และพจณี ศรีธรรมลี "การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเส้นใยผักตบชวา" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [22] ปิยะวรรณ เจียวก๊ก และพงษ์ศักดิ์ แพน้อย "การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตไม้เทียมจากพอลิพรอพิลีนและไม้ยูคาลิปตัส" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] B.V.Kokta, R.G.Raj and C.Daneault, "Use of Wood Flour as Filler in Polypropylene: Studies on Mechanical Properties", *Polym.-Plast.Technol.Eng.*, 28(3), 1989, 247-259.
- [24] K.Joseph, S.Thomas and C.Pavethran, "Tensile Properties of Short Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composites", *Appl.Polym.Sci.*, 47, 1993, 1731-1739.
- [25] พิชัย พันธ์พัฒนา และศิริพงษ์ โรจนวีระ "วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิพรอพิลีน" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2533.
- [26] J.R.Simpson and S.E.Selke, "Composite Materials from Recycle Multilayer Propylene Bottles and Woods Fibers", *American Chemical Society.*, 1992, 232-240.
- [27] J.George, K.Joseph, S.Thomas and S.S.Bhagavan "Mechanical and Viscoelastic Properties of Short Pineapple Fiber Reinforced Low Density Polyethylene Composites", *Polymer Science Recent Advances.*, 1994, 526-531.
- [28] รัชดา ขวัญตุน "คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและเส้นใยอ้อย" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [29] กมลรัตน์ คุรัตน์ชัชวาล และดุจดาว ปรีชาวงศ์ "บทบาทของมัลติฟังก์ชันนัลมอนอเมอร์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วกับพอลิพรอพิลีนผสมกับชานอ้อย" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [30] นันทพร พันธุ์ภักดี และเรวดี สกกุลอาริยะ "วัสดุคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยอ้อย" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [31] "รายงานผลองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ" ฝ่ายเทคโนโลยีเส้นใยธรรมชาติ สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2547.
- [32] ASTM D 638, "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)", *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [33] ASTM D 256, "Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials", *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.
- [34] ASTM D 2240, "Standard Test Methods for Rubber Property-Durometer Hardness", *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.
- [35] ASTM D 790, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.
- [36] ASTM D 1500-85, "Standard Test Methods for Density of Plastic by the Density-Gradient Technique" *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.
- [37] ASTM D 570, "Standard Test Methods for Water absorption of Plastics", *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.
- [38] ASTM D 648, "Standard Test Methods for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load", *Philadelphia : American Society for Testing and Materials.*, 1993.
- [39] N.E.Marcovich, M.M.Reboredo and M.I.Aranguren, "Modified Woodflour as Thermoset Fillers : II. Thermal degradation of woodflours and composites", *Thermochimica Acta.*, 372, 2001, 45-57.
- [40] P.N.Balaguru and S.P.Shah, "Fiber Reinforcement Cement Composite", McGraw-Hill, Singapore, 1992.
- [41] H.Zweifel, "Plastics Additives Handbook", 5<sup>th</sup> ed., Hanser Publishers, Munich, 2001.
- [42] ณรงค์ โทณานนท์ ศิริ เจือวิจิตรจันทร์ สุชาติ ไทยเพ็ชร และศักดิ์พิชิต จุลฤกษ์ "ไม้เนื้อแข็งของประเทศไทย" ฝ่ายวิจัยไม้ชั้นพื้นฐาน กองการวิจัยผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 2528.

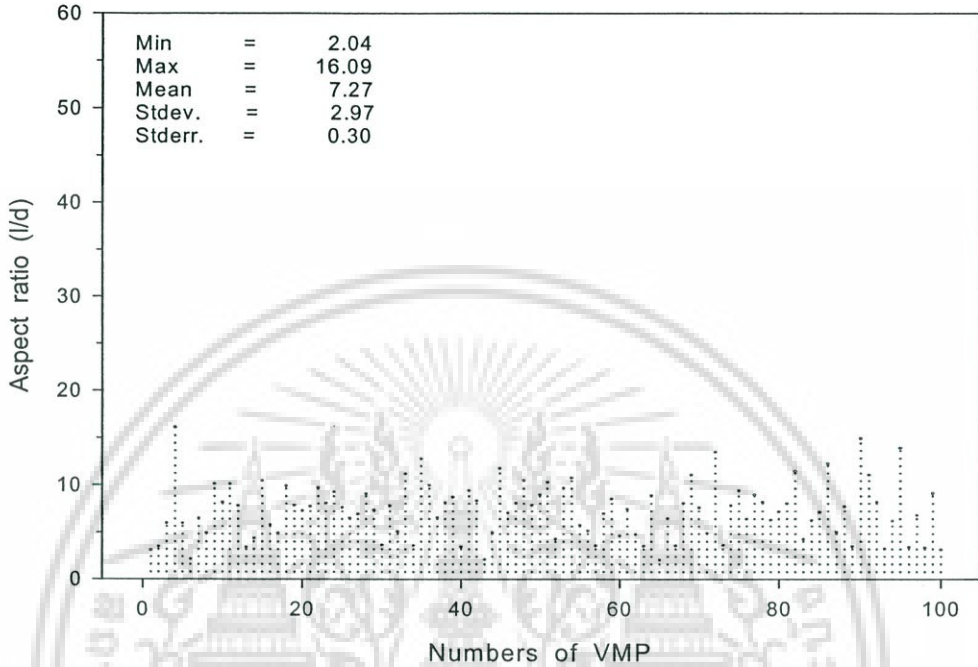
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



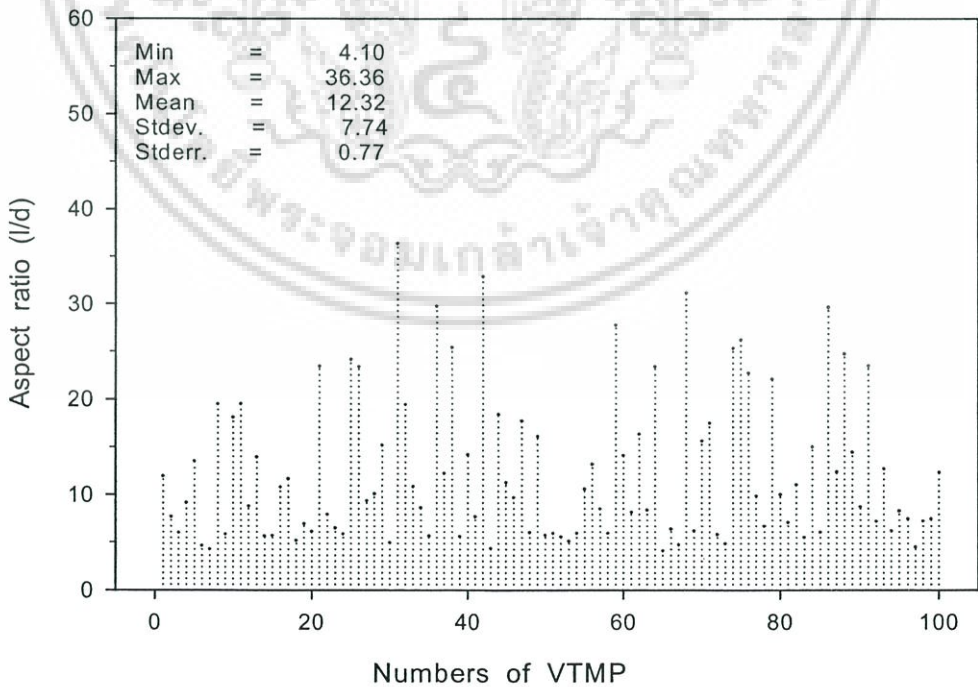
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก. อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยธรรมชาติ

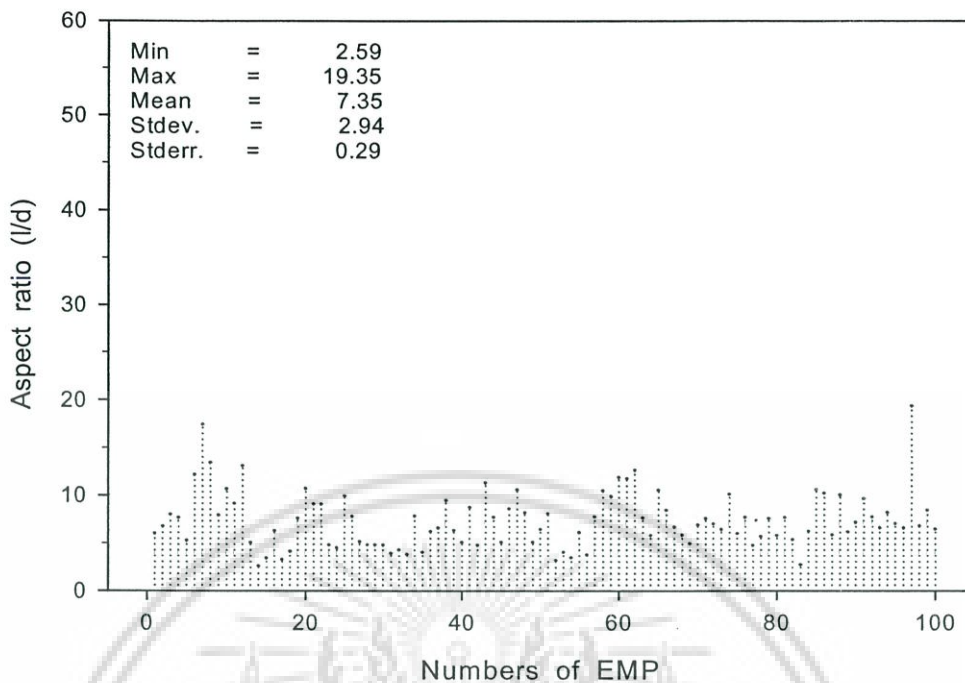


รูปที่ ก-1 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย VMP ขนาด 20-50 mesh

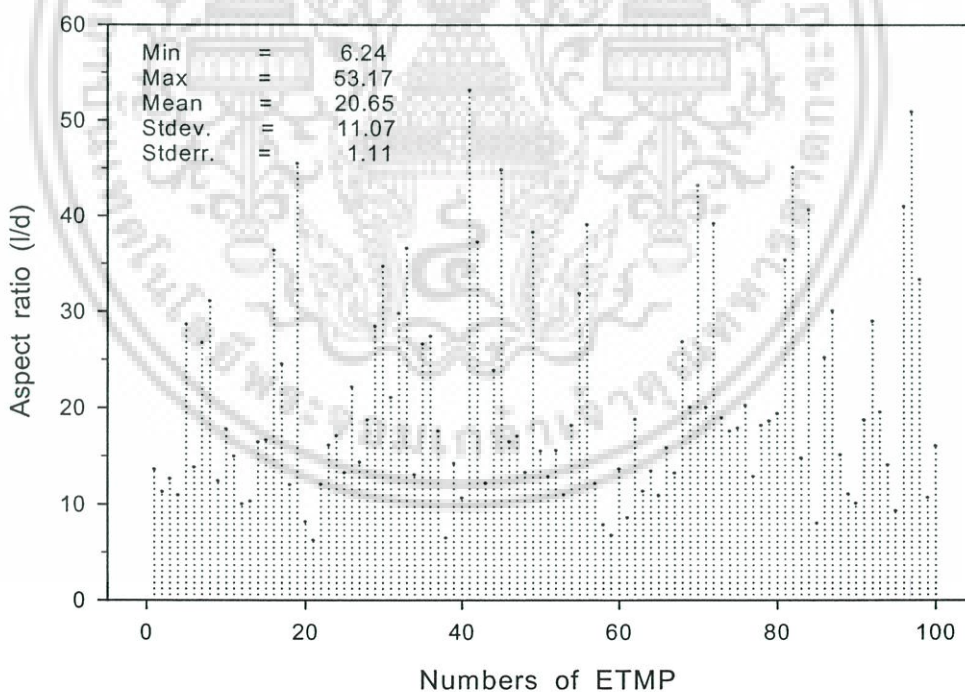


รูปที่ ก-2 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย VTMP ขนาด 20-50 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



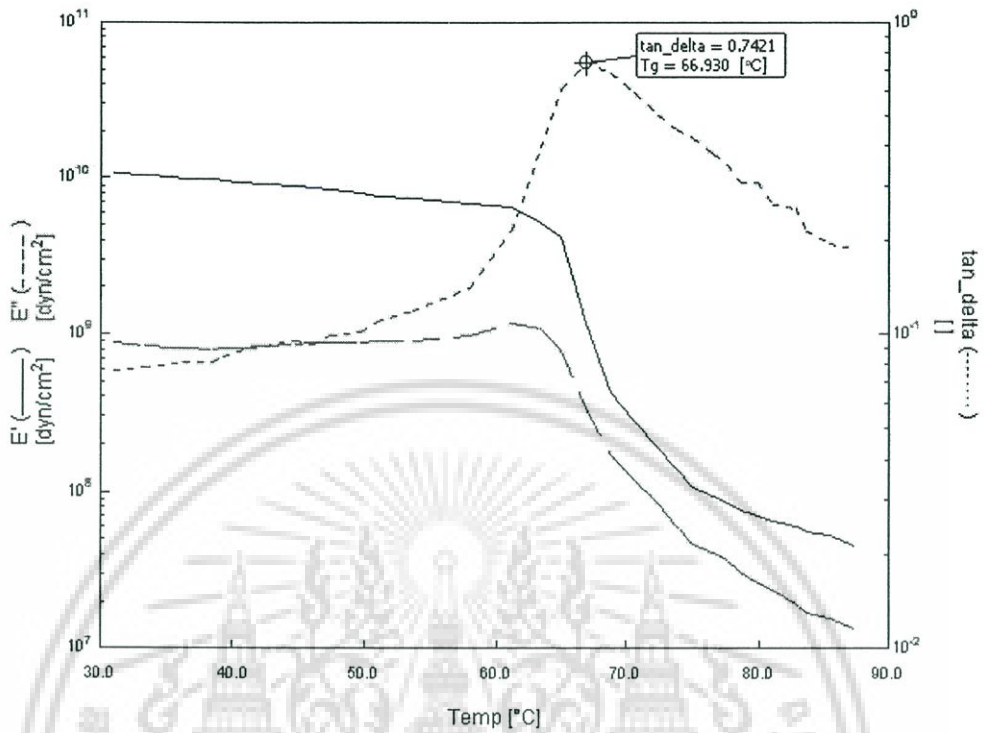
รูปที่ ก-3 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย EMP ขนาด 20-50 mesh



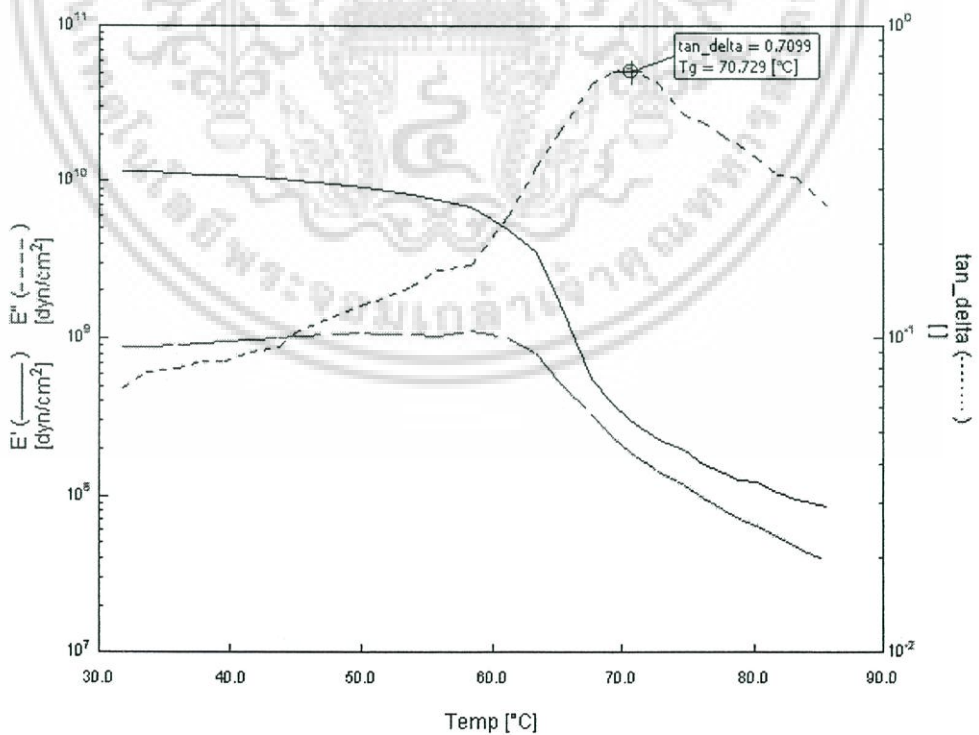
รูปที่ ก-4 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ETMP ขนาด 20-50 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA



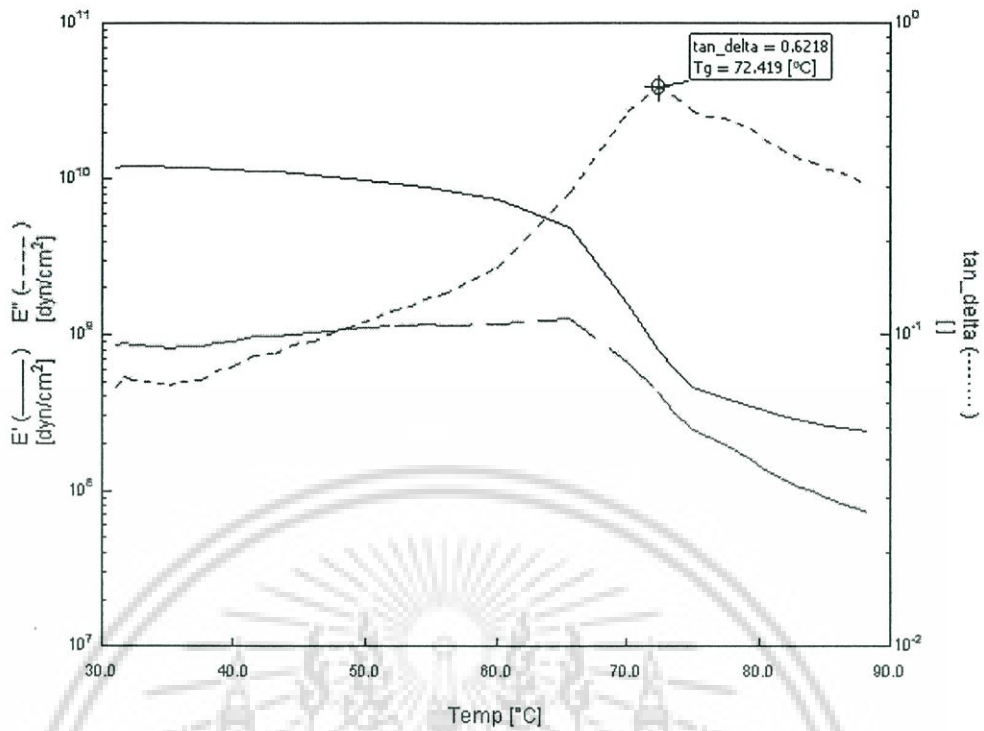
รูปที่ ข-1 กราฟ DMTA ของพีวีซีที่เติม DOP 5.0 phr และ CaCO<sub>3</sub> 40 phr



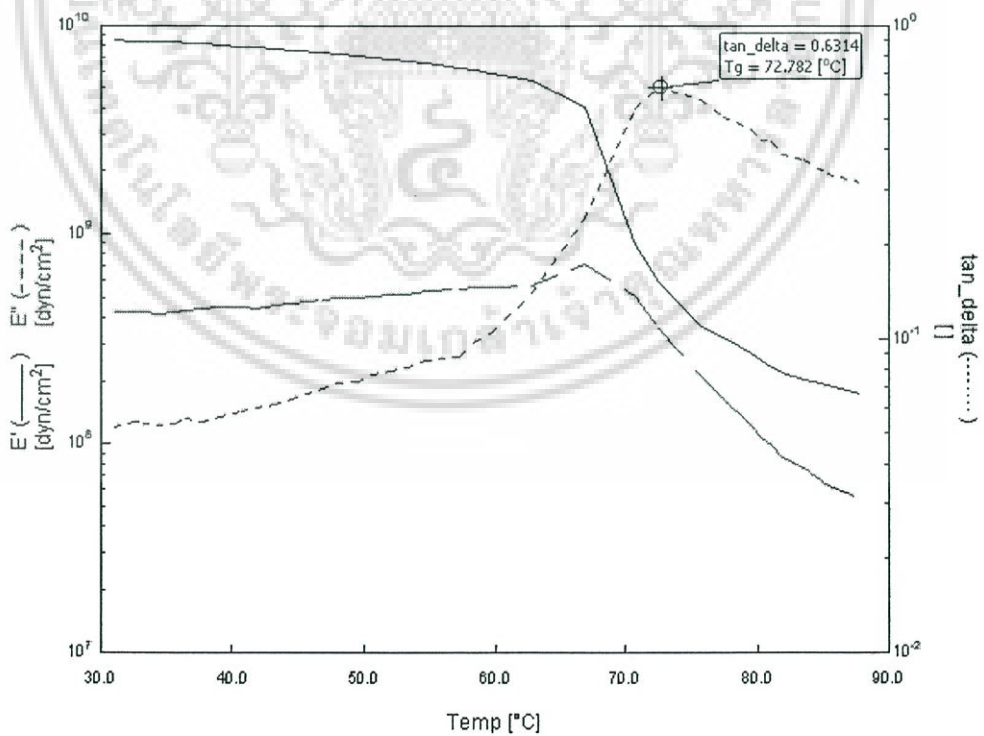
รูปที่ ข-2 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเติม CaCO<sub>3</sub> 40 phr เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

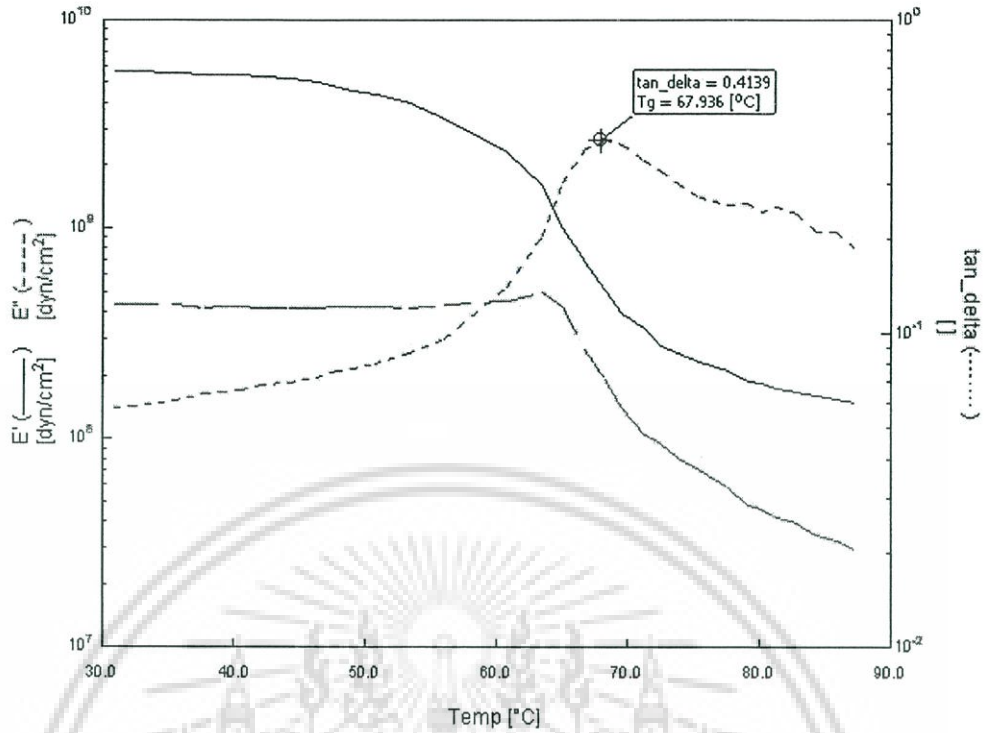


รูปที่ ข-3 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 70 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม  $\text{CaCO}_3$  40 phr

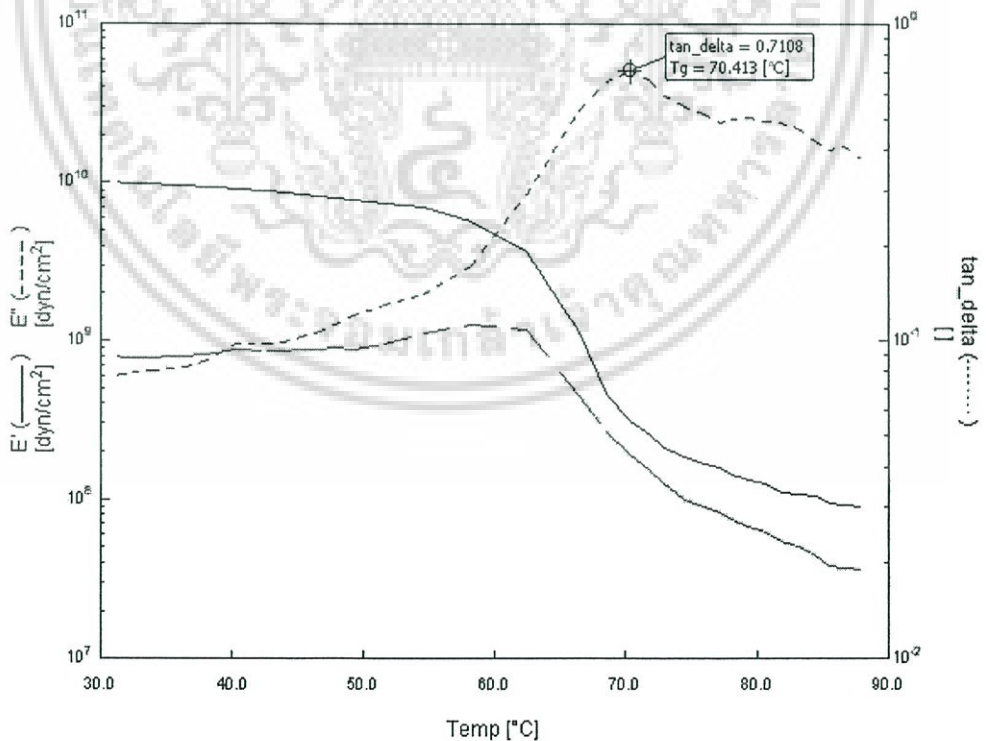


รูปที่ ข-4 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติมซิลิกา 40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

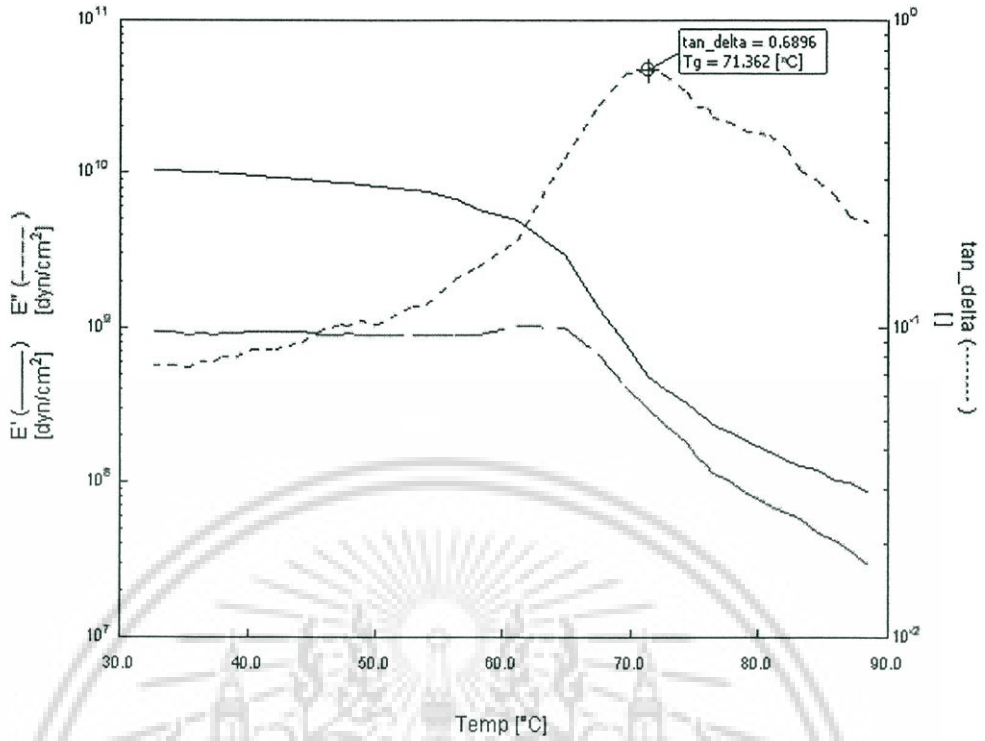


รูปที่ ข-5 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 12.5 phr โดยเติมซิลิกา 40 phr

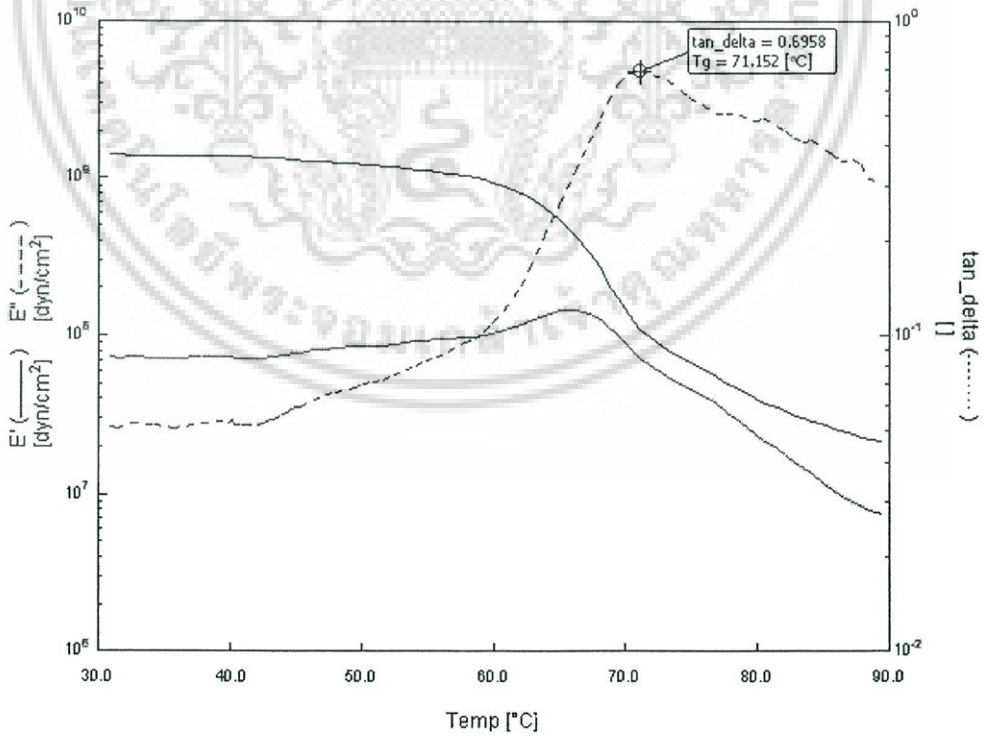


รูปที่ ข-6 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VTMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม  $\text{CaCO}_3$  40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

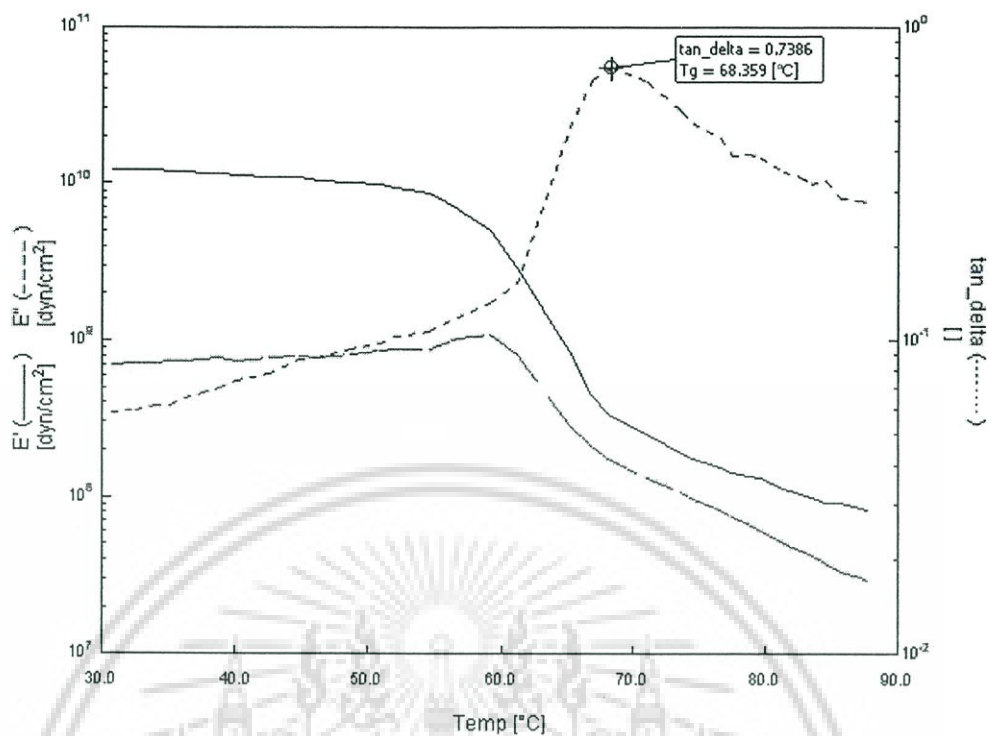


รูปที่ ข-7 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย EMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO<sub>3</sub> 40 phr

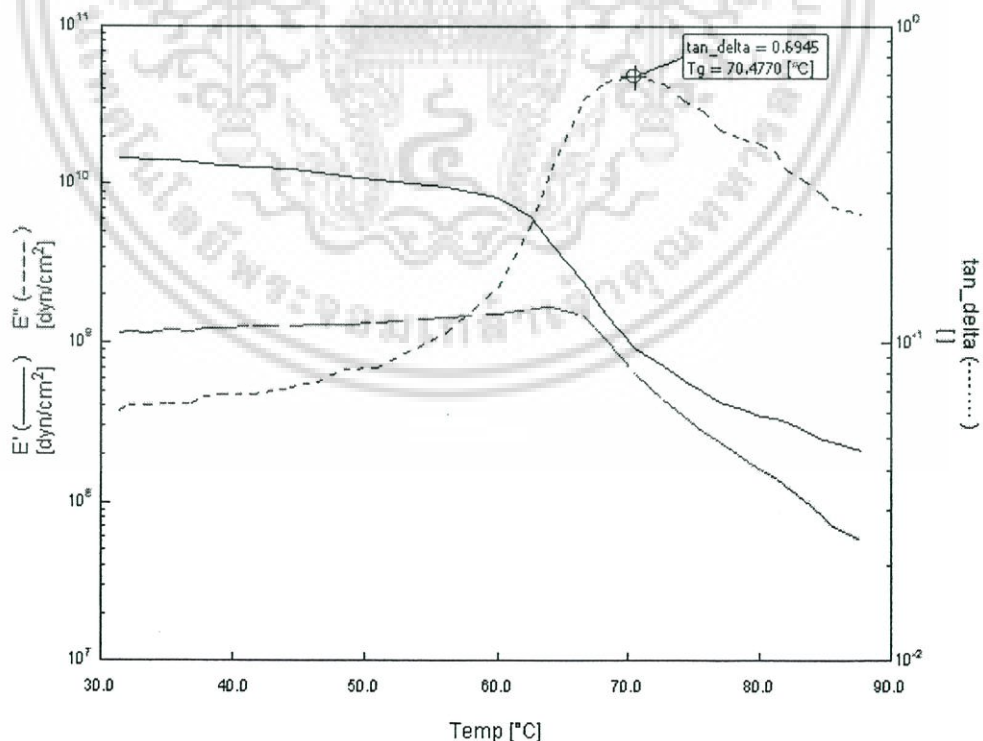


รูปที่ ข-8 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยเติม CaCO<sub>3</sub> 40 phr

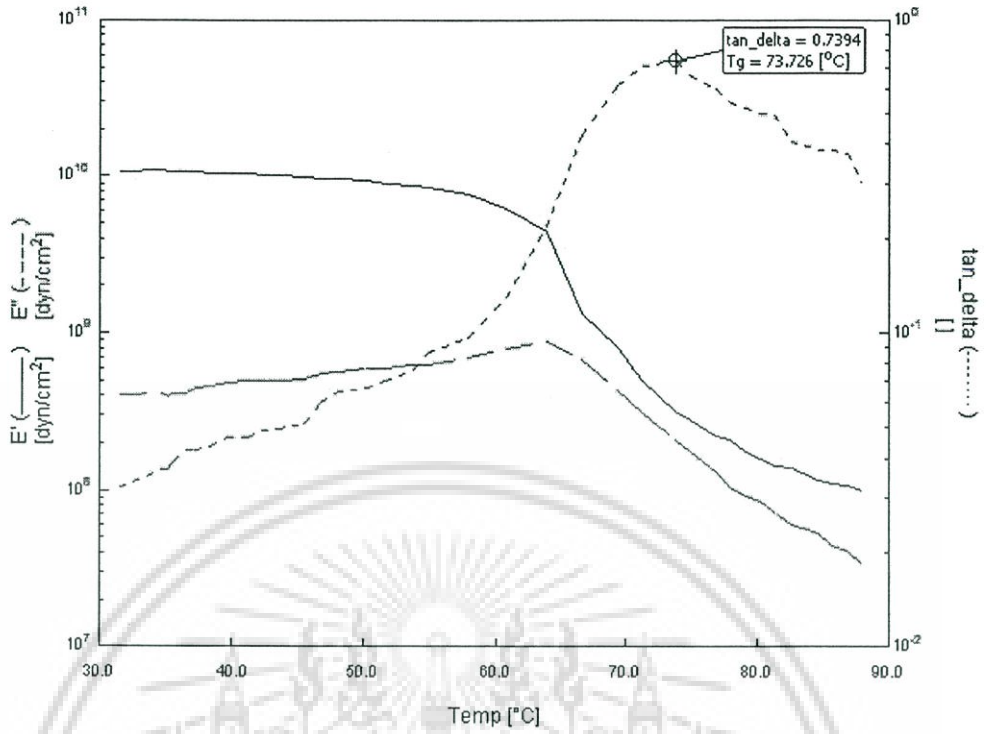
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



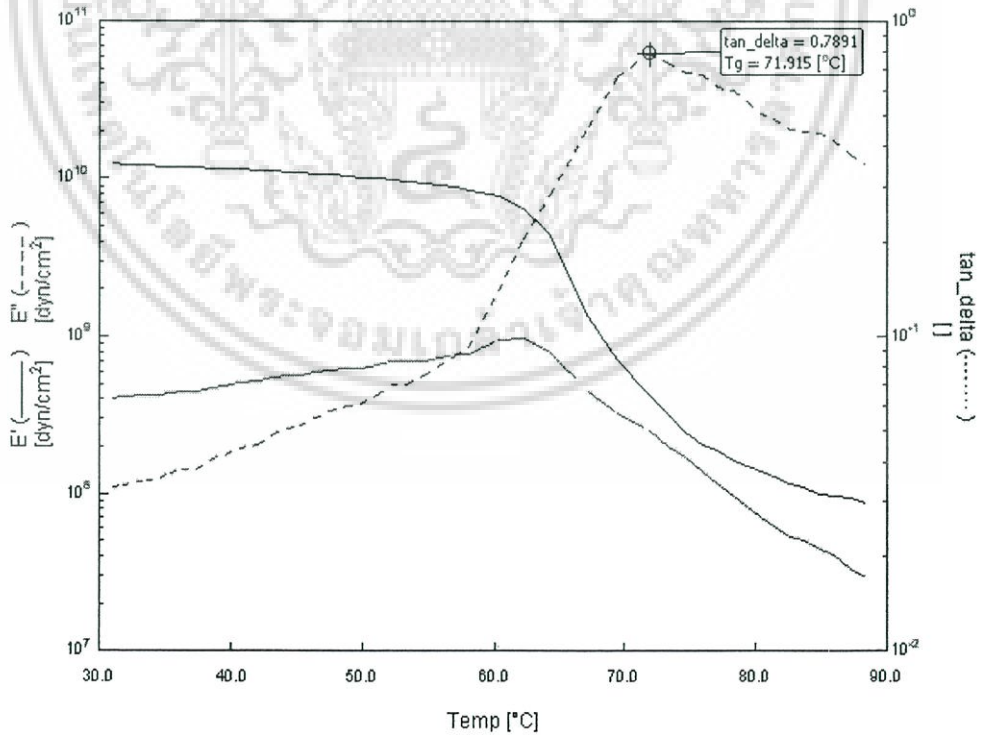
รูปที่ ข-9 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr โดยไม่มีการเติมสารตัวเติม



รูปที่ ข-10 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย VMP 30 phr และ DOP 5.0 phr เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

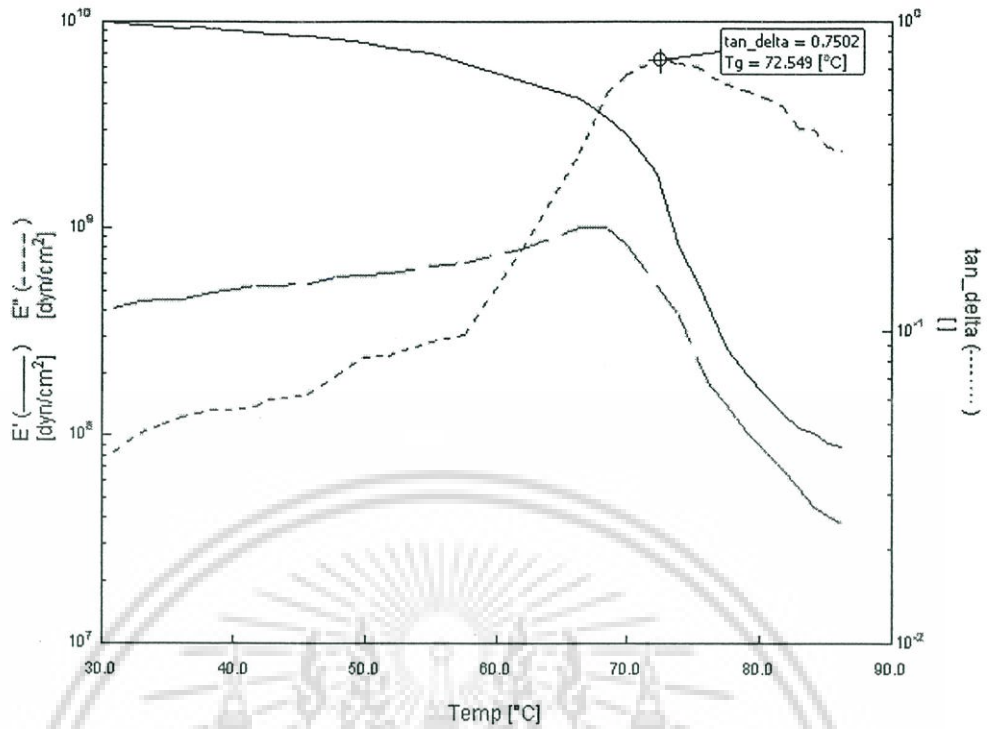


รูปที่ ข-11 กราฟ DMTA ของพรีพอลิเมอร์โพลีไอซอไซเนตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยใส่ DOP 5.0 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อไม่มีการรีไซเคิล



รูปที่ ข-12 กราฟ DMTA ของพรีพอลิเมอร์โพลีไอซอไซเนตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยใส่ DOP 5.0 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-13 กราฟ DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย ETMP 30 phr โดยใส่ DOP 5.0 phr และซิลิกา 10 phr เมื่อมีการรีไซเคิล 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค. ไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานกรมป่าไม้

### ตารางที่ ค1 ไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้ [42]

ชนิดไม้	ปริมาณความชื้น (%)	ความแข็งแรง (kg/cm <sup>2</sup> )			ความตื้อ x100 (kg/cm <sup>2</sup> )
		การดัด	การบีบ	การเชือด	
1. เต็ง ( <i>Shorea obtusa</i> Wall.)	12.00	1732	723	143	1751
2. ยางพารา ( <i>Hevea brasiliensis</i> Muell. Arg.)	12.00	973	478	162	960
3. สัก ( <i>Tectona grandis</i> Linn.f.)	12.00	1045	533	169	1137
4. ยูคาลิปตัส ( <i>Eucalyptus camaldulensis</i> )	11.82	1344	713	199	1509

#### หมายเหตุ

- ปริมาณความชื้น (Moisture content) หมายถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในไม้ ไม้ที่มีความชื้นต่ำ 16% ถือว่าเป็นไม้แห้ง ถ้าเกินกว่า 25% ถือว่าเป็นไม้เปียก
- ความแข็งแรง (Strength)
  - ในการดัด (Static bending) คือค่าสัมประสิทธิ์ในการหัก (Modulus of rupture)
  - ในการบีบขนานเส้น (Compression parallel to grain) คือแรงบีบสูงสุดตามแนวเส้น (Maximum crushing strength)
  - ในการเชือดตามแนวเส้น (Shear along grain) คือแรงเชือดเฉลี่ยสูงสุดตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส
- ความตื้อ (Stiffness) คือค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ที่ได้จากการดัด (Static bending)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายเด่นศักดิ์ แสงพุทธเงินฐานะ
วัน เดือน ปีเกิด	27 กันยายน 2514 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2537 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปี พ.ศ. 2544 บริหารธุรกิจบัณฑิต สาขาการบริหารทั่วไป มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประวัติการทำงาน	
ปี พ.ศ.2538-2541	ตำแหน่งวิศวกร บริษัทไทยเซ็นทรัลเคมี จำกัด (มหาชน)
ปี พ.ศ.2542-2542	ตำแหน่งวิศวกร บริษัทไทยไฮยีนโปรดักท์ จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้