



การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีเลื่อยไม้  
ภายใต้สภาวะการใช้งานที่มีความชื้น

Changes of Mechanical Properties in Wood/PVC  
Composites under Moisture Application Condition

โดย

ดร.กัลทิมา เซาว์ชาญชัยกุล

ดร.ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

นางสาววรรณช ดีละมัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้  
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๘ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ (WPVC) ชีงงานวัสดุผสม WPVC ในอัตราส่วนของพีวีซีและผงไม้ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ สภาวะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบแช่ชีงงาน WPVC ถูกปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ 30-70 องศาเซลเซียส และเวลาในการแช่ชีงงาน 0-120 ชั่วโมง และทำการตรวจสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดและค่าความแข็งของ WPVC โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีชีงงานพีวีซี จากผลการทดลองพบว่า ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสม WPVC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่น้ำเพิ่มมากขึ้น และเริ่มมีแนวค้งที่เมื่อเวลาในการแช่ชีงงานมากกว่า 72 และ 48 ชั่วโมง สำหรับการแช่ชีงงานที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การลดลงของค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดมีการลดลงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำเพิ่มสูงขึ้น สำหรับค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดของพีวีซีไม่เปลี่ยนแปลงมากนักทั้งในกรณีของการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิ ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด พบว่า ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชีงงานพีวีซีและ WPVC เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเท่านั้น ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของพีวีซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่ชีงงานเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของ WPVC มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่ชีงงานเพิ่มมากขึ้น ค่าความแข็งของชีงงานพีวีซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาในการแช่ชีงงานเพิ่มมากขึ้น ทั้งกรณีการแช่ชีงงาน ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าความแข็งของชีงงาน WPVC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่ชีงงานนานขึ้น และพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความแข็งของชีงงาน WPVC ยังมีค่าลดลงมากขึ้น

คำสำคัญ: วัสดุผสม/พอลิไวนิลคลอไรด์/เส้นใยธรรมชาติ/สมบัติทางกล/ความชื้น

## Abstract

This research work was to study the effect of moisture on mechanical properties of wood/polyvinylchloride composites (WPVC). WPVC specimens in ratio of PVC and wood (100:100 by weight) were prepared by using twin screw extruder. The water conditions for WPVC specimen immersion testing were varied for temperatures of 30-70 °C and specimen immersion time of 0-120 h. The moisture effect was investigated by measuring flexural properties and hardness of WPVC as comparing with case of PVC specimen. The result suggested that flexural modulus of WPVC tended to decrease with increasing time of water immersion and then remained unchanged at immersion time of more than 72 and 48 h for water temperature of 30 and 70 °C, respectively. The decrease rate in flexural modulus enhanced when water temperature increased. Flexural modulus of PVC slightly changed with increasing both immersion time and water temperature. Flexural strength for both PVC and WPVC specimens were found the change at water temperature of 70 °C only. Flexural strength of PVC tended to slightly increase with increasing immersion time whereas flexural strength of WPVC slightly decreased with increasing immersion time. Hardness of PVC specimen in cases of both water temperature of 30 and 70 °C slightly increased with increasing immersion time. For WPVC, hardness tended to decrease with increasing immersion time and water temperature.

Keywords: Composite/Polyvinyl chloride/Natural fiber/Mechanical properties/Moisture

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 และขอขอบคุณสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม และสาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์เคมี

คณะวิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	จ
บัญชีรูป	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 พีวีซี	5
2.2 เส้นใยธรรมชาติ	10
2.3 วัสดุผสม	13
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	17
<b>3. วิธีดำเนินการวิจัย</b>	<b>184</b>
3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปและเตรียมชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC	19
3.2 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการใช้งาน	21
3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล	22
<b>4. ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	<b>24</b>
4.1 ผลของค่าความต้านทานแรงดึง	24
4.2 ผลของค่าความแข็ง	30
<b>5. สรุปและวิเคราะห์ผล</b>	<b>31</b>
เอกสารอ้างอิง	32

## บัญชีตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แผนงานกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และผลการดำเนินงาน	3
2 รายละเอียดของพีวีซีและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานพีวีซีและWPVC	19

## บัญชีรูป

รูปที่	หน้า
1 ตัวอย่างการนำวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายจากบริษัท วี.พี. วู้ด จำกัด	2
2 ผลของน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีที่มีต่อสมบัติทางกล	3
3 จุดบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ในสายโซ่พีวีซี	8
4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอริเนชันที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่ผิดปกติของพีวีซี	9
5 การเสื่อมสภาพของพีวีซีที่เกิดขึ้นแบบสุ่มที่พบในสายโซ่พีวีซีแบบปกติ	9
6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	10
7 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	11
8 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	11
9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ามอดุลัสของไม้ (แถบความกว้างของเส้นกราฟแสดงถึงช่วงเบี่ยงเบนของผล และ MC คือ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในไม้)	12
10 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความแข็งแรงในด้านต่างๆ ของไม้และปริมาณความชื้นภายในไม้ โดย A คือ มอดุลัสของการแตกหัก B คือ มอดุลัสของการกดอัดในทิศทางที่ขนานกับเกรน C คือ มอดุลัสของการกดอัดที่ตั้งฉากกับเกรน และ D คือ มอดุลัสของแรงดึงที่ตั้งฉากกับเกรน	13
11 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น	15
12 ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส	16
13 แผนการดำเนินงานวิจัยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ ภายใต้สภาวะการใช้งานที่มีความชื้น	18
14 เครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง	19
15 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่	20
16 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีด	20
17 ชิ้นงานทดสอบ	21
18 การจำลองสภาวะการใช้งานโดยการใช้ตุ้บ	21
19 เครื่อง Instron Universal Testing รุ่น Instron 5566	22
20 เครื่องวัดค่าความแข็ง แบบ Shore D	23
21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงและเวลาในการแช่น้ำสำหรับกรณีชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	24
22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงและเวลาในการแช่น้ำสำหรับกรณีชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	25
23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงและเวลาในการแช่น้ำสำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน	26
24 ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานในน้ำที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	27

รูปที่	หน้า	
25	ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานในน้ำที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดสำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	28
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดและเวลาในการแช่สำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน	29
27	ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานในน้ำที่มีต่อค่าความแข็งของชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน	30

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันวัสดุผสมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติ (Wood/Plastic composites หรือ WPC) เป็นหนึ่งในวัสดุทดแทนไม้ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถขึ้นรูปให้มีขนาดและรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการได้ง่าย สามารถกลึง ไส หรือเลื่อยได้เช่นเดียวกับไม้จริง รวมถึงการตัดให้โค้งงอได้ มีความทนต่อการกัดกินของปลวก และน้ำหนักรบกวน WPC เป็นวัสดุผสมที่ได้จากการนำพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี เป็นต้น [1-5] มาผสมกับเส้นใยธรรมชาติด้วยกระบวนการขึ้นรูปทางพลาสติกแบบทั่วไป วัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ (Wood/poly(vinyl chloride) หรือ WPVC) เป็น WPC ที่สามารถถูกนำมาใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย ดังรูปที่ 1 อาทิเช่น ระแนง ศาลากลางแจ้ง เก้าอี้สนาม สะพานภายในสวน ไม้ปูพื้นที่ใช้ภายในและภายนอกอาคาร เป็นต้น ทั้งนี้เพราะ WPVC มีความคงรูปสูง ทนทานต่อสารเคมีได้ดี และมีสมบัติการลามไฟต่ำซึ่งเป็นผลมาจากการมีคลอรีนในโครงสร้างของพีวีซี [1] จากตัวอย่างรูปแบบการนำไปใช้งานข้างต้นของ WPVC ชิ้นงาน WPVC จำเป็นต้องมีสมบัติทางกลที่ดี เนื่องจากต้องสามารถรับแรงกระทำได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวกับ WPVC จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ WPVC [1, 5-10] เช่น ผลของชนิดและปริมาณของเส้นใยธรรมชาติ สารเติมแต่ง การปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ สภาพที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของสภาวะการนำไปใช้งานที่มีต่อสมบัติทางกลของ WPVC ยังมีอยู่ไม่มากนัก และจากงานวิจัยของ WPC ที่มีพลาสติกชนิดอื่นๆ เป็นเมทริกซ์ได้แสดงให้เห็นว่าสภาวะการนำไปใช้งานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของ WPC [2, 11-13] ดังนั้นการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของสภาวะการนำไปใช้งานที่มีต่อสมบัติทางกลของ WPVC จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำชิ้นงาน WPVC ไปใช้งานกลางแจ้งที่ต้องเผชิญกับแสงแดด ความร้อน และความชื้น ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นโอกาสที่ชิ้นงาน WPVC จะถูกนำไปใช้งานที่ต้องเผชิญกับความชื้นสูงจึงมีโอกาสเป็นไปได้สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกลของ WPVC ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้งาน รวมถึงเข้าใจถึงกลไกของความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ WPVC อันจะนำไปสู่แนวทางการปรับปรุงสมบัติของ WPVC ให้สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้น

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ WPVC ภายใต้สภาวะจำลอง โดยทำการปรับเปลี่ยนเวลา และอุณหภูมิของน้ำในการแช่ชิ้นงาน WPVC เพื่อเป็นการเร่งสภาวะ และทำการประเมินสมบัติทางกลโดยการทดสอบความทนต่อแรงดัด และความแข็งของชิ้นงาน WPVC เปรียบเทียบกับกรณีชิ้นงานพีวีซี



รูปที่ 1 ตัวอย่างการนำวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายจากบริษัท วี.พี. วู้ด จำกัด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิของน้ำที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์
ทราบถึงสมบัติความทนต่อแรงดัด และค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเวลาและอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่วัสดุผสมพีวีซีและผงไม้	ศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิของน้ำที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้

ตารางที่ 1 แผนงานกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และผลการดำเนินงาน

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	คิดเป็น
1. เตรียมชิ้นงานวัสดุผสม WPVC	<ul style="list-style-type: none"> <li>ชิ้นรูปวัสดุผสม WPVC อัตราส่วนพีวีซี:ผงไม้ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก และพีวีซี</li> <li>เตรียมชิ้นงานทดสอบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้ชิ้นงานวัสดุผสม WPVC และพีวีซี</li> <li>ได้ชิ้นงานทดสอบ WPVC และพีวีซี สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดัด และค่าความแข็ง</li> </ul>	100%
2. ทำการจำลองสถานะการใช้งานของชิ้นงาน WPVC	<ul style="list-style-type: none"> <li>การทดสอบการจำลองสถานะการใช้งานของชิ้นงานทดสอบในน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้ทำการทดสอบจำลองสถานะการใช้งานของชิ้นงาน WPVC และพีวีซี โดยการแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำ ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส</li> </ul>	100%
3. ทำการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน WPVC ที่ผ่านการแช่น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน WPVC และพีวีซีที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ กัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้ทราบผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัด และค่าความแข็งของชิ้นงาน WPVC และพีวีซี</li> </ul>	100%
4. ทำการวิเคราะห์ผลของการทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> <li>การวิเคราะห์ผลของสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน WPVC และพีวีซีที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ กัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้ผลการวิเคราะห์สมบัติความต้านทานแรงดัด และค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน WPVC และพีวีซีที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ กัน</li> </ul>	100%
5. สรุปผลและรายงานผลการดำเนินงาน	<ul style="list-style-type: none"> <li>สรุปผลการทดลอง และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้ข้อสรุปผลการทดลอง และรายงานฉบับสมบูรณ์</li> </ul>	100%

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุหลักที่ใช้ คือ พีวีซีชนิดแข็ง เกรดอัดรีด และผงไม้
- 1.3.2 วิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ ขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ โดยมีอัตราส่วนพีวีซีและผงไม้ คือ 100:0 และ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก
- 1.3.3 สภาวะจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ มีดังนี้
  - อุณหภูมิของน้ำ อยู่ในช่วง 30 – 70 องศาเซลเซียส
  - เวลาที่ใช้ในการแช่ชิ้นงานวัสดุผสม คือ 0 – 120 ชั่วโมง
- 1.3.4 สมบัติทางกลที่ทำการทดสอบ มีดังนี้
  - ความทนต่อแรงดัด ตาม ASTM D790
  - ความแข็ง ตาม ASTM D2240

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงผลของความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ และกลไกของความชื้นที่มีต่อสมบัติของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้
- 1.4.2 เผยแพร่ผลงานวิจัยโดยการนำเสนอผลงานในการจัดนิทรรศการต่างๆ

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

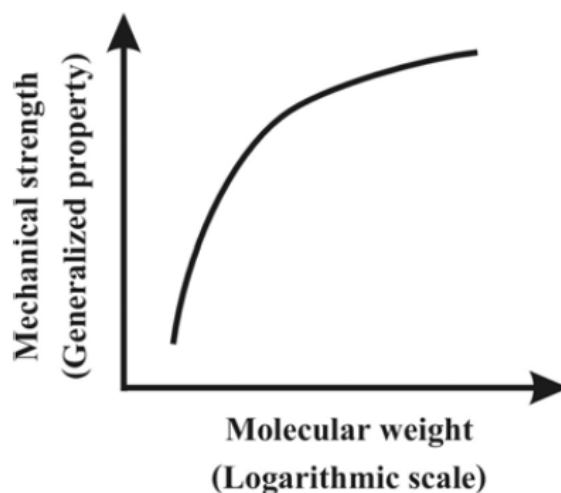
### 2.1 พีวีซี (poly(vinyl chloride), PVC)

พีวีซีหรือพอลิไวนิลคลอไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสมบัติอยู่ในช่วงกว้างซึ่งขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ประกอบอยู่ในสูตรของสารคอมพาวด์ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พีวีซีสามารถถูกนำไปใช้งานได้ในรูปแบบที่หลากหลาย

สูตรโครงสร้างทางเคมีของพีวีซี คือ 
$$\left[ \text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right]_n$$

#### สมบัติทางกลของพีวีซี [14]

สมบัติทางกลของพีวีซีนั้นเป็นสมบัติที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องหลายตัวแปรด้วยกัน ณ ที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะตัวแปรหลักๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของพีวีซี เท่านั้น นั่นคือ บทบาทของน้ำหนักโมเลกุล สารพลาสติกไซเซอร์ ดิกรีการหลอมตัว และผลของการบ่ม (annealing) ทั้งกรณีที่อยู่เหนืออุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและสมบัติทางกลของพีวีซี พบว่า น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มมากขึ้น และจากกราฟพบว่า ณ ช่วงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ น้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีมีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกล แต่เมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูง การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีที่มีต่อสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำหนักโมเลกุลที่มากขึ้นมีผลทำให้พีวีซีไหลได้ยากขึ้น ความสามารถในการขึ้นรูปลดลง พีวีซีจึงเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนมีมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้พีวีซีมีสมบัติทางกลที่ลดลง ดังนั้นในการเลือกพีวีซีมาผลิตชิ้นงานจึงควรเลือกพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมโดยต้องคำนึงถึงสมบัติทางกลที่ต้องการและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี



รูปที่ 2 ผลของน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีที่มีต่อสมบัติทางกล [14]

ส่วนการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงในพีวีซีมีผลทำให้พีวีซีมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง และ

เปลี่ยนแปลงจากวัสดุที่แข็งและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำกลายเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวมีความสามารถในการยึดตัวสูงขึ้น แต่มีความทนแรงดึงต่ำลง ดังนั้นการนำพลาสติกไฮเซอร์มาใช้ในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์จะช่วยปรับปรุงสมบัติในการไหลตัวของพีวีซีให้ดีขึ้น ทำให้สามารถนำพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกลของพีวีซีอย่างมาก คือ ดิกรีการหลอมตัวของพีวีซี Gothan และ Hitch ได้ทำการศึกษาความต้านทานต่อการล้าของพีวีซีที่หลอมตัวเข้ากันดีเปรียบเทียบกับพีวีซีที่หลอมตัวไม่ดี พบว่า พีวีซีที่หลอมตัวดีมีความสามารถในการรับแรงแบบเป็นวัฏจักร (cycle) ได้ดีขึ้น Menges และ Borndsten ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับความทนแรงกระแทกของพีวีซีที่มีการใช้พอลิเอทิลีน/พอลิไวนิลอะซิเตต (polyethylene/polyvinyl acetate, EVA) เป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 187 องศาเซลเซียส มีสมบัติความทนแรงกระแทกมากกว่ากรณีใช้อุณหภูมิ 180 และ 210 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 187 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า อนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) ของพีวีซีสามารถหลอมรวมเข้ากับพอลิเอทิลีน/พอลิไวนิลอะซิเตตได้ดีกว่า ส่วนผลของการบ่มชิ้นงานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพีวีซีทั้งกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เช่นในงานวิจัยของ Shinozaki และคณะ พบว่า การบ่มชิ้นงานพีวีซีที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว) เป็นเวลา 20 นาที มีผลทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น 15 % และความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง 40 % ทั้งนี้เป็นเพราะการบ่มมีผลทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ส่วนงานวิจัยของ Illers ได้รายงานผลของการนำชิ้นงานพีวีซีไปบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน มีผลทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเกือบ 400 % จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมบัติทางกลของพีวีซี คือ น้ำหนักโมเลกุลของพีวีซี สารเติมแต่งที่มีอยู่ในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์ และสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป

#### สารเติมแต่งของพีวีซี [15-17]

สารเติมแต่งมีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซี เนื่องจากผลิตภัณฑ์พีวีซีสามารถผลิตให้มีสมบัติที่หลากหลายได้ สามารถผลิตเป็นวัสดุที่มีความแข็งหรืออ่อนนุ่มได้ ขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่เลือกใช้ นอกจากนี้พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ดังนั้นในสูตรของพีวีซีคอมปาวด์จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพและสารหล่อลื่น

##### 1. สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant)

สารหล่อลื่นภายในเป็นสารหล่อลื่นที่สามารถผสมเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง (viscosity reduction) ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการไหลดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์ลงด้วยซึ่งมีผลทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในระหว่างการได้รับแรงเฉือนมีลดลง (reduction of heat dissipation) แต่สารหล่อลื่นภายในมีผลทำให้อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ (heat distortion temperature) ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นในการเติมสารหล่อลื่นจึงควรเติมในปริมาณน้อยๆ (โดยทั่วไปประมาณ 0.3-3 %) สารหล่อลื่นภายในของพีวีซี เช่น fatty acid esters, glycerol esters ส่วน fatty acid salt โดยเฉพาะ calcium stearate สามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก

##### 2. สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant)

สารหล่อลื่นภายนอกเป็นสารหล่อลื่นที่ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (friction-reducing effect) ช่วยลดการเกิดความร้อนที่มากเกินไป การเกิดเป็นฟิล์มของสารหล่อลื่นชั้นระหว่างพื้นผิวโลหะและพอลิเมอร์ช่วยลดการเกาะติดระหว่างพอลิเมอร์และพื้นผิวโลหะ (release effect) และยังช่วยป้องกันการเกิดการเสีรูปของพอลิเมอร์หลอม (prevention of melt fracture) เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นมีผลทำให้อัตราการเลื่อนผ่านผนังโลหะของพอลิเมอร์ (wall slippage) มีเพิ่มมากขึ้น และต้านการเกาะติดของพอลิเมอร์ที่ผนัง (stick-slip effect) สารหล่อลื่นภายนอกของพีวีซีเช่น paraffin wax, polyethylene wax เป็นต้น

### 3. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer)

สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันหรือหน่วงให้เกิดซ้ำลง โดยสารเพิ่มเสถียรภาพเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน หรือการดูแลเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซีโดยสารเพิ่มเสถียรภาพเข้าไปทำปฏิกิริยากับพอลิอินทำให้ความยาวของพอลิอินสั้นลง สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซี ได้แก่สารประกอบตะกั่ว สารประกอบดีบุก แคลเซียม แบเรียม เช่น tribasic lead sulphate, calcium stearate, zinc stearate เป็นต้น

### 4. สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี (UV stabiliser)

แสงยูวีเป็นองค์ประกอบหนึ่งของแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลก แสงยูวีมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-400 nm ซึ่งแสงยูวีเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้พีวีซีเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (photodegradation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 310-320 nm ดังนั้นการนำพีวีซีไปใช้งานกลางแจ้งอาจต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงลงไปด้วย สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงที่ใช้กับพีวีซี แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ สารดูดซับแสงยูวีประเภทสารอินทรีย์ (organic UV absorber) สารกรองแสงยูวีประเภทสารอนินทรีย์ (inorganic UV-screening agent) และสารที่ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระ (free-radical scavengers)

### 5. สารช่วยขึ้นรูป (processing aids)

สารช่วยขึ้นรูปส่วนใหญ่ถูกใช้ในพีวีซีชนิดแข็งเป็นหลัก สารช่วยขึ้นรูปมีหน้าที่ช่วยทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปมีมากขึ้น โดยมีส่วนช่วยทำให้พีวีซีสามารถหลอมตัวได้ง่ายขึ้น มีอัตราการผลิตที่เร็วขึ้น พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยขึ้นรูปของพีวีซี เช่น สารช่วยขึ้นรูปพวกอะคริลิก ABS SAN copolymer

### 6. สารปรับปรุงแรงกระแทก (impact modifier)

สารปรับปรุงแรงกระแทกมีหน้าที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ทำให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระแทกของพีวีซีถูกปรับให้ดีขึ้นโดยการเติมยางลงไปซึ่งยางที่เติมลงไปนั้นไม่สามารถเข้ากันได้กับพีวีซีเมทริกซ์ จึงพบว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเป็นสองเฟส เมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทกในช่วงแรกเมทริกซ์จะดูดซับแรงเอาไว้หลังจากนั้นจึงส่งผ่านแรงไปยังเฟสของยางยางทำหน้าที่ดูดซับพลังงานการกระแทกเอาไว้ทำให้วัสดุไม่เกิดการแตกหักแบบเปราะ

### 7. สารเพิ่มเนื้อ (filler)

สารเพิ่มเนื้อเป็นสารเติมแต่งที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความแตกต่างจากเมทริกซ์ทั้งในด้านองค์ประกอบและโครงสร้าง สารเพิ่มเนื้อส่วนใหญ่เป็นพวกสารอนินทรีย์ สารเพิ่มเนื้อถูกเติมลงในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อและลดต้นทุน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์อีกด้วย สารเพิ่มเนื้อที่นิยมใช้ในพีวีซี คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO<sub>3</sub>) เป็นสารเพิ่มเนื้อที่มีความสมดุล

ระหว่างราคาถูก และยังคงสมบัติทางกลและทางกายภาพของพีวีซีเอาไว้ แคลเซียมคาร์บอเนตมีแหล่งกำเนิดมาจากซากของสัตว์หรือเปลือกหอยในทะเลที่ทับถมกัน ซอล์ก (chalk) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในพีวีซีมากที่สุด ซึ่งซอล์กประกอบด้วยผลึกของหินปูนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างหลวมๆ แคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อสมบัติของพีวีซีหลายประการ เช่น ปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทก ทำให้ผิวชิ้นงานมีความมันเงามากขึ้น มีความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาดมากขึ้น ความทนแรงดึงสูงขึ้น ค่ามอดูลัสของอีลาสติคสูงขึ้น เป็นต้น

การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี [15, 18-19]

ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยปกติแล้วพีวีซีนั้นไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากพลังงานจำเพาะ (specific energy) ที่ใช้ในการทำให้พีวีซีหลอมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันมีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 20 กิโลแคลลอรี่ต่อโมล และ 25.9 กิโลแคลลอรี่ต่อโมล ด้วยเหตุนี้ในการขึ้นรูปพีวีซีจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในพีวีซีด้วย

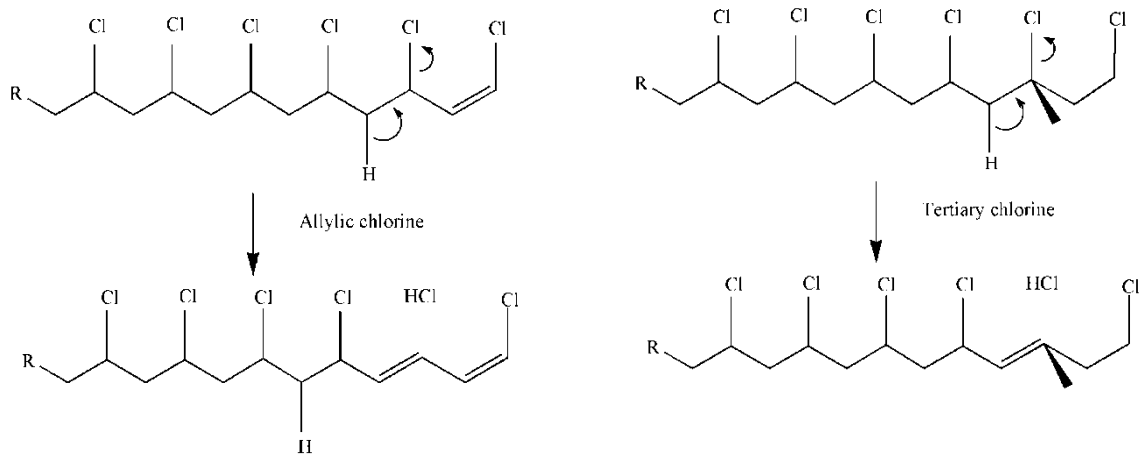
การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชัน (Dehydrochlorination reaction)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงปานกลาง (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริกขึ้น กรดไฮโดรคลอริกมีผลทำให้ปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเกิดเร็วขึ้น คือ มันทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (auto-catalyst) เช่นเดียวกับกรดตัวอื่นๆ พีวีซีมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำมีสาเหตุมาจากโครงสร้างที่ผิดปกติในพอลิเมอร์ซึ่งพวกมันทำหน้าที่กระตุ้นให้พันธะระหว่างคลอรีนและคาร์บอนสร้างโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ (labile structure) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการดีไฮโดรคลอรีเนชัน โครงสร้างที่ผิดปกติ เช่น ส่วนที่หลุดจากตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปลายสายโซ่ที่มีพันธะไม่อิ่มตัว พันธะไม่อิ่มตัวภายในสายโซ่ กิ่งก้านของสายโซ่ โครงสร้างที่ต่อกันแบบหัวต่อหัว และโครงสร้างที่เกิดออกซิเดชัน เป็นต้น โครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดดีไฮโดรคลอรีเนชัน มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 คือ คลอรีนที่ทำพันธะกับคาร์บอนที่เป็นส่วนของกิ่ง (tertiary chlorine) ประมาณ 70-80 % และกรณีคลอรีนที่อยู่ใกล้ตำแหน่งของพันธะคู่ภายในสายโซ่ (internal allylic chlorine) อีกประมาณ 10-15 % การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันที่เกิดจากโครงสร้างที่ผิดปกติเหล่านี้มีขั้นตอนการเกิดดังรูปที่ 4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีเนชันเริ่มต้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของโครงสร้างที่มีความผิดปกติ ส่วนกรณีที่โมโนเมอร์ต่อกันด้วยรูปแบบปกติการเกิดดีไฮโดรคลอรีเนชันเริ่มต้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งโดยเกิดขึ้นในแบบสุ่ม (random) พันธะคู่แบบ conjugated หรือ polyene sequence ถูกสร้างขึ้นภายในสายโซ่ของพีวีซีขณะที่อะตอมของไฮโดรเจนและคลอรีนหลุดออกจากสายโซ่ หรือเรียกว่า unzipped ผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปถูกแสดงในรูปที่ 5

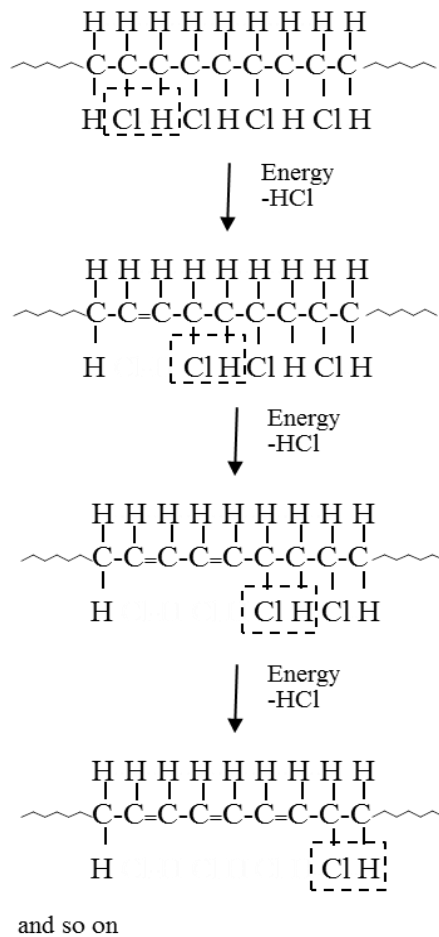


รูปที่ 3 จุดบกพร่องที่เกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะไม่คงที่ในสายโซ่พีวีซี [19]

- (a) Internal allylic chloride
- (b) tertiary chloride



รูปที่ 4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอริเนชันที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่ผิดปกติของพีวีซี [18]



รูปที่ 5 การเสื่อมสภาพของพีวีซีที่เกิดขึ้นแบบสลุ่่มที่พบในสายโซ่พีวีซีแบบปกติ [18]

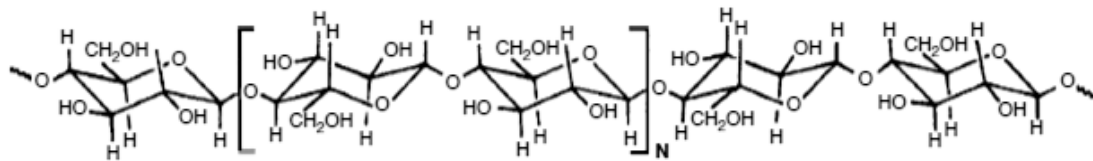
## 2.2 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ในปริมาณมาก คือ ไม้ ไม้ถูกจัดว่าเป็นพวกวัสดุผสม (composite) ประเภทพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารสกัดและเถ้า โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของเมทริกซ์แทรกอยู่ระหว่างไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (cellulose microfibrils) ส่วนลิกนินนั้นถือเป็นส่วนของเปลือกด้านนอกทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง

### องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ [20-23]

#### 1. เซลลูโลส (Cellulose)

องค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ไม้ คือ เซลลูโลส โดยมีอยู่ประมาณ 40-50 % ในไม้แห้ง เซลลูโลสเป็นพอลิโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยของ  $\beta$ -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4- $\beta$ -glucosidic bonds ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีแรงดึงดูดระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง การรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลเซลลูโลสเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibrils) และไมโครไฟบริลรวมตัวกันเป็นไฟบริล (fibril) และในท้ายที่สุดได้เป็นเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี



รูปที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [23]

#### 2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มของเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่ง เฮมิเซลลูโลสมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 20-30 % เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย ส่วนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose D-galactose D-xylose L-arabose เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ประการแรก คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดแต่เซลลูโลสมีเพียง 1,4- $\beta$ -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันเท่านั้น ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านในขณะที่เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนประการที่สาม คือ อนาคตการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของเซลลูโลสโดยธรรมชาติแล้วมีค่ามากกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า เฮมิเซลลูโลสส่วนมากมีอนาคตการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันประมาณ 200 เท่านั้น ในไม้สามารถมีเฮมิเซลลูโลสที่มีส่วนประกอบในโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ เช่น ในไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส ชนิด galactoglucomannans อยู่ประมาณ 20 % และมี

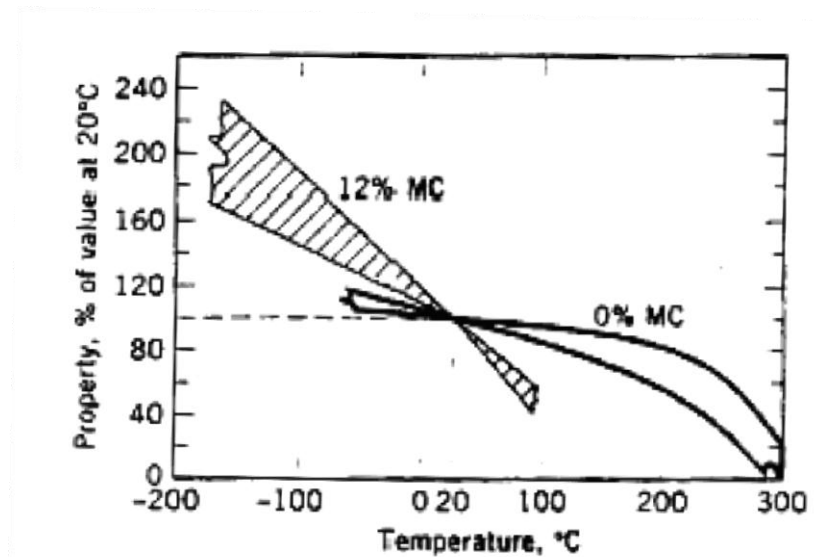


ประมาณ 0.2-2 % โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักของเถ้าในไม้ คือ แคลเซียม โพแทสเซียม และปริมาณเล็กน้อยของธาตุแมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และเหล็ก

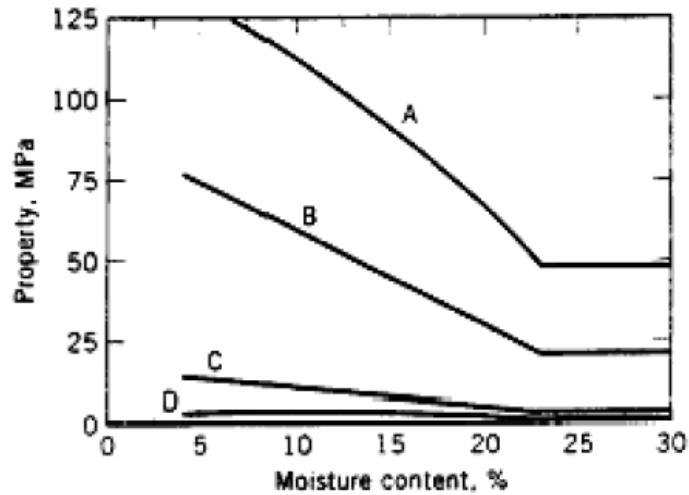
### สมบัติทางกลของไม้ [20-22]

สมบัติทางกลของไม้ ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบหลายประการ ดังนี้

1. ชนิดของไม้: ไม้ต่างชนิดกันอาจมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปริมาณของเนื้อไม้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ไม่เท่ากัน เช่น ต้นโอ๊กซึ่งเป็นไม้ที่มีน้ำหนักมาก มีความแข็งแรงและความคงรูปร่างมากกว่าต้นสนซึ่งจัดเป็นไม้ที่มีน้ำหนักเบา
2. สัดส่วนขององค์ประกอบที่มีอยู่ในไม้: องค์ประกอบที่มีอยู่ในไม้นั้นจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางกลของไม้ ไม้ที่มีสัดส่วนของเซลลูโลสมาก มีแนวโน้มที่จะมีความแข็งแรงมากกว่าไม้ที่มีสัดส่วนของเซลลูโลสน้อย เนื่องจากเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง
3. สภาพแวดล้อมของการนำไปใช้งาน: อุณหภูมิและปริมาณความชื้นล้วนแล้วแต่มีผลต่อสมบัติทางกลของไม้ โดยสมบัติทางกลของไม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมันถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 9 และไม้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อไม้มีปริมาณความชื้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ามอดูลัสของไม้ (แถบความกว้างของเส้นกราฟแสดงถึงช่วงเบี่ยงเบนของผล และ MC คือ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในไม้) [22]



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความแข็งแรงในด้านต่างๆ ของไม้และปริมาณความชื้นภายในไม้ โดย A คือ โมดูลัสของการแตกหัก B คือ โมดูลัสของการกดอัดในทิศทางที่ขนานกับเกรน C คือ โมดูลัสของการกดอัดที่ตั้งฉากกับเกรน และ D คือ โมดูลัสของแรงดึงที่ตั้งฉากกับเกรน [22]

### 2.3 วัสดุผสม [24]

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากของผสมที่ประกอบด้วยส่วนผสมหรือเฟสตั้งแต่ 2 เฟสหรือมากกว่านั้น มีลักษณะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้การพิจารณาว่าวัสดุเป็นวัสดุผสมหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากหลัก 3 ประการ ดังนี้

- ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องมีอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากกว่า 5 %
- ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุผสมจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากสมบัติของส่วนผสม เช่น ในกรณีของพลาสติก ถึงแม้จะมีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นและเหตุผลในทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุผสม
- ส่วนผสมต้องไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งแยกเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบของวัสดุผสม สามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. เมทริกซ์ (matrix) คือ ส่วนผสมที่โดยส่วนใหญ่แล้วมีสัดส่วนที่มาก และอยู่ในลักษณะต่อเนื่องโดยปกติแล้วสมบัติของเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยส่วนผสมตัวอื่นที่นำ เข้ามาผสมรวมด้วย
2. สารเสริมแรง (reinforcement, reinforcing phase) คือ ส่วนผสมที่ทำหน้าที่ส่งเสริมสมบัติทางกลของเมทริกซ์ให้ดีขึ้น รูปร่างของสารเสริมแรงมีผลต่อประสิทธิภาพของสารเสริมแรง โดยปกติสารเสริมแรงมีรูปร่างที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หรืออนุภาค

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม

- สัดส่วนของส่วนผสม (volume fraction) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด กฎของการผสม เป็นดังแสดงในสมการที่ 1

$$\chi_c = \chi_m v_m + \chi_f v_f \quad (1)$$

โดยที่	$\chi_c$	คือ สมบัติของวัสดุผสมที่ต้องการทราบ
	$\chi_m$	คือ สมบัติที่ต้องการทราบของเมทริกซ์
	$\chi_f$	คือ สมบัติที่ต้องการทราบของสารเสริมแรง
	$V_m$	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์
	$V_f$	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเสริมแรง

- ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส (interface) ของเมทริกซ์และสารเสริมแรงมีบทบาทที่มีความสำคัญ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การนำกฎการผสมมาใช้ได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสด้วย
- รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- ขนาดของเกรนของเมทริกซ์
- สมบัติของส่วนผสมเอง

### ความแข็งแรงระหว่างเฟส

ความแข็งแรงระหว่างเฟส มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุผสม เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเฟสที่แข็งแรงสามารถทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ มีการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังสารเสริมแรงได้โดยผ่านทางพันธะระหว่างเฟส

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงระหว่างเฟส คือ

#### 1. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุผสมในสถานะหนึ่งเมทริกซ์สามารถไหลได้ และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับของเหลว ความสามารถในการเปียก ณ ที่นี้อธิบายเกี่ยวกับความสามารถที่ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถแพร่ขยายไปบนพื้นผิวของของแข็ง (สารเสริมแรง) ความสามารถในการเปียกที่ดี หมายความว่าของเหลว (เมทริกซ์) สามารถไหลไปบนพื้นผิวของสารเสริมแรงปกคลุมไปทั่วทุกตำแหน่งที่ไหลไปกระทบ ณ ตำแหน่งพื้นผิวที่ไม่เรียบของสารเสริมแรง ของเหลวสามารถไหลเข้าไปแทนที่อากาศทั้งหมดได้ การเปียกเกิดขึ้นได้ถ้าความหนืดของเมทริกซ์ไม่สูงมากเกินไปและถ้าการเปียกนั้นส่งผลทำให้ค่าพลังงานอิสระ (free energy) ของระบบลดลง การกระจายตัวของของเหลวที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ต้องมีสมการเป็นดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \gamma_{SL} dA + \gamma_{LG} dA < \gamma_{SG} dA \quad (2)$$

$$\text{หรือ} \quad \gamma_{SL} + \gamma_{LG} < \gamma_{SG} \quad (3)$$

โดยที่  $\gamma_{LG}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ

$\gamma_{SL}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

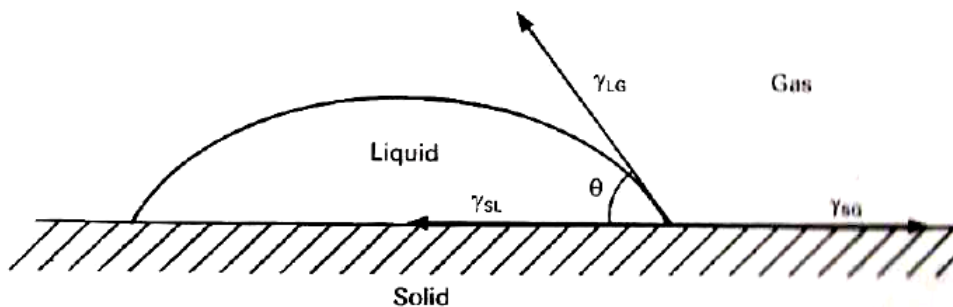
$\gamma_{SG}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและก๊าซ

$dA$  คือ พื้นที่ผิวของของแข็งที่สัมผัสกับของเหลว

สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (spreading coefficient,  $SC$ ) เป็นดังสมการที่ 4

$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (4)$$

เมทริกซ์สามารถเปียกสารเสริมแรงได้ เมื่อสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 11 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น [24]

จากรูปที่ 11 ค่ามุมสัมผัส (contact angle) มีค่าอยู่ในช่วง  $0^\circ < \theta < 180^\circ$  และองศาของการเปียกมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อมุม  $\theta$  ลดลง และถ้ามุม  $\theta > 90^\circ$  มักถือว่าของเหลวไม่สามารถเปียกของแข็งได้

## 2. การยึดเกาะระหว่างเฟส (Interfacial bonding)

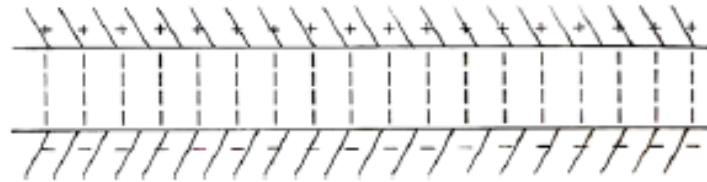
เมื่อเมทริกซ์สามารถสัมผัสกับสารเสริมแรงหรือเปียกสารเสริมแรงนั้นทำให้มีพันธะระหว่างเฟสเกิดขึ้น พันธะชนิดต่างๆ อาจถูกสร้างขึ้นในเวลาเดียวกัน เช่น พันธะทางเชิงกลและทางไฟฟ้า และกลไกของพันธะสามารถเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างขั้นตอนการผลิตที่หลากหลาย เช่น ในกรณีที่มีการนำสารคู่ควบ (coupling agent) มาใช้ในการปรับปรุงผิว

### 1. พันธะทางเชิงกล (mechanical bonding)

การเชื่อมต่อกันในทางเชิงกล (mechanical interlocking หรือ keying) ของสองพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 12(a) ลักษณะของพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสยังมีความขรุขระมากขึ้น ยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยการหดตัวของเมทริกซ์บนสารเสริมแรงยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลเกิดได้ง่ายขึ้น พันธะทางเชิงกลจะมีประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อระหว่างเฟส ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นความแข็งแรงของการได้รับแรงเฉือน แต่ถ้าได้รับแรงในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างเฟส หรือการที่รอยต่อได้รับแรงดึง ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีค่าต่ำ เว้นเสียแต่ว่า ณ บริเวณรอยต่อนั้นมีลักษณะของพื้นผิวรอยต่อคล้ายกับบริเวณ A ในรูปที่ 12(a) จำนวนมากๆ ซึ่งมีมุมแบบวกกลับเข้าไปข้างใน (re-entrant angle)



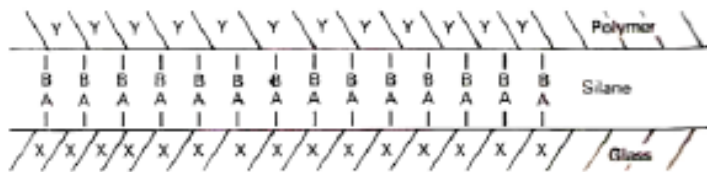
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 12 ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส [24]

- (a) mechanical bonding
- (b) electrostatic bonding
- (c) chemical bonding
- (d) chemical bonding as applied to a silane coupling agent
- (e) interdiffusion bonding

## 2. พันธะที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic bonding)

ไฟฟ้าสถิตย์เป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงที่มีพื้นผิวที่มีประจุแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 12(b) จึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าขึ้น แรงกระทำ ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในระยะทางการจัดเรียงของอะตอมในช่วงสั้นๆ เท่านั้น การปนเปื้อน อนุภาคนิวเคลียสและการที่มีก๊าซถูกดักไว้ที่ผิวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกลไกดังกล่าวลดลง

## 3. พันธะทางเคมี (chemical bonding)

พันธะทางเคมีเกิดขึ้นจากหมู่ทางเคมีของเมทริกซ์และสารเสริมแรงสามารถเข้ากันได้ ดังแสดงในรูปที่ 12(c) ความแข็งแรงของพันธะทางเคมี ขึ้นอยู่กับ ปริมาณหรือจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ และชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้เมทริกซ์และสารเสริมแรงไม่มีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์และสารคู่ควบ เช่น สารไซเลน (silane) ซึ่งมีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์และสารเสริมแรงอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล มันจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 12(d)

## 4. พันธะที่เกิดจากการแพร่เข้าหากัน (interdiffusion bonding)

พันธะนี้เกิดขึ้นจากการที่สายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบทั้งสองชนิดสามารถแพร่เข้าหากันและทำให้เกิดการพันกันขึ้นระหว่างเฟส ดังแสดงในรูปที่ 12(e) ความแข็งแรงของพันธะนี้ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของการพันกัน ชนิดและจำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเกิดการพันได้

## 2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Arbelaiz, A. และคณะ (2005) [11] ได้ทำการศึกษาผลของการนำชิ้นงานวัสดุผสมพอลิพรอพิลีนและเส้นใยแฟลกซ์แช่น้ำที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง พบว่า สมบัติทางกลของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติและการยึดเกาะระหว่างเฟส

Stark, N.M. และ Matuana, L.M. (2007) [2] ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการขึ้นรูปที่มีการเชื่อมสภาพของชิ้นงานวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและผงไม้ พบว่า ชิ้นงานวัสดุผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (extrusion process) มีการสูญเสียเนื้อไม้ออกจากผิวชิ้นงานมากกว่ากรณีชิ้นงานวัสดุผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection process)

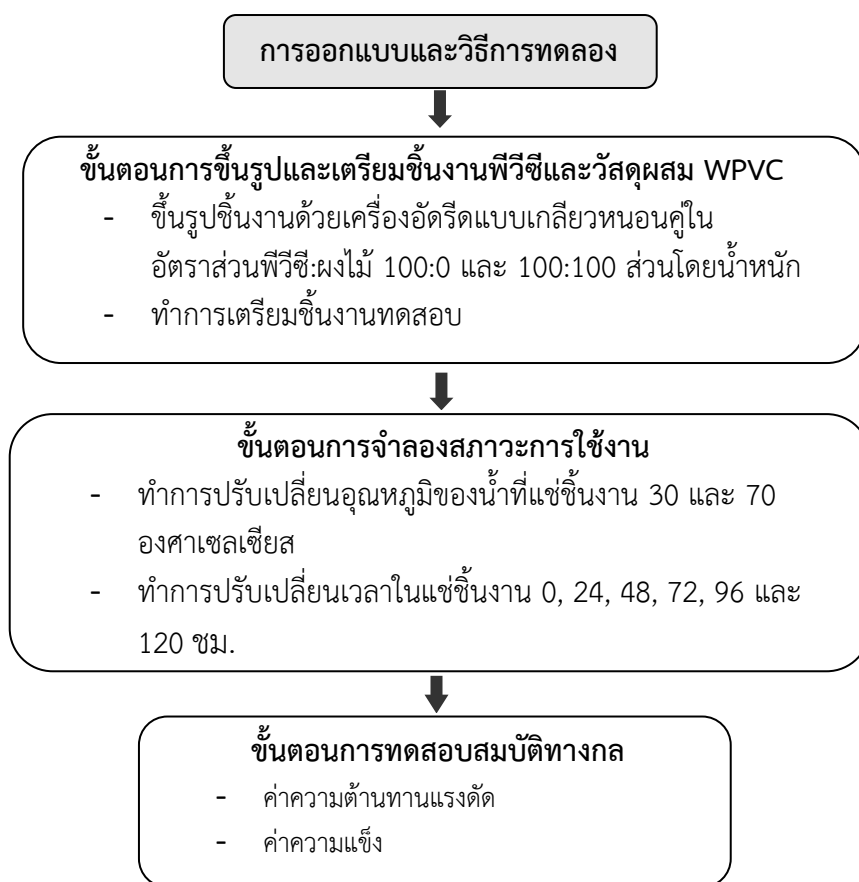
Ndiaye, D. และคณะ (2008) [12] ได้อธิบายว่าการมีอยู่ของผงไม้ในวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและผงไม้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเกิดโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ของ HDPE แต่ผงไม้ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสงในช่วง UV-VIS ซึ่งนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของการเชื่อมสภาพของ HDPE

Du, H. และคณะ (2010) [13] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมผงสีที่มีต่อการเชื่อมสภาพทางแสงของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและผงไม้ พบว่า การเติมผงสีมีส่วนช่วยในการปกป้องการเชื่อมสภาพของ HDPE เนื่องจากแสงยูวี

Chaochanchaikul, K. และ Sombatsompop, N. (2011) [1] ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงการเชื่อมสภาพเนื่องจากแสงของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้โดยการใช้ Tinuvin P และ Tinuvin XT833 และไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสงทั้ง 3 ชนิดมีส่วนช่วยในการปรับปรุงการเชื่อมสภาพเนื่องจากแสงให้กับวัสดุผสม โดยสารเพิ่มเสถียรภาพที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือ Tinuvin P

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เริ่มต้นจากการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีล้อยไม้ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยทำการขึ้นในอัตราส่วนพีวีซี:ผงไม้ 100:0 และ 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมาทำการเตรียมชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาจำลองสภาวะการใช้งาน โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และเวลาในการแช่ชิ้นงานทดสอบ และนำชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ และเวลาในการแช่ต่างๆ กัน มาทำการทดสอบสมบัติทางกล รายละเอียดของแผนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนการดำเนินงานวิจัยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีล้อยไม้ ภายใต้สภาวะการใช้งานที่มีความชื้น

## วิธีการทดลอง

### 3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปและเตรียมชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC

#### 3.1.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

เริ่มต้นจากการนำพีวีซี สารเคมี ดังตารางที่ 2 และผงไม้ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่มาบ่นผสมด้วยเครื่องบ่นผสมแบบความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 14 เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำของผสมมาผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากบริษัท Enmach จำกัด ดังรูปที่ 15 เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ดังแสดงในรูปที่ 16 และใช้ความเร็วรอบสกรู 40 รอบ/นาที่ และอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจากตำแหน่งบ่อนเม็ดถึงหัวขึ้นรูป คือ 170, 160, 150, 140, 135 และ 175 องศาเซลเซียส ภายหลังจากที่ชิ้นงานออกจากหัวขึ้นรูปถูกทำให้เย็นตัวด้วยน้ำหล่อเย็น

#### ตารางที่ 2 รายละเอียดของพีวีซีและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานพีวีซีและWPVC

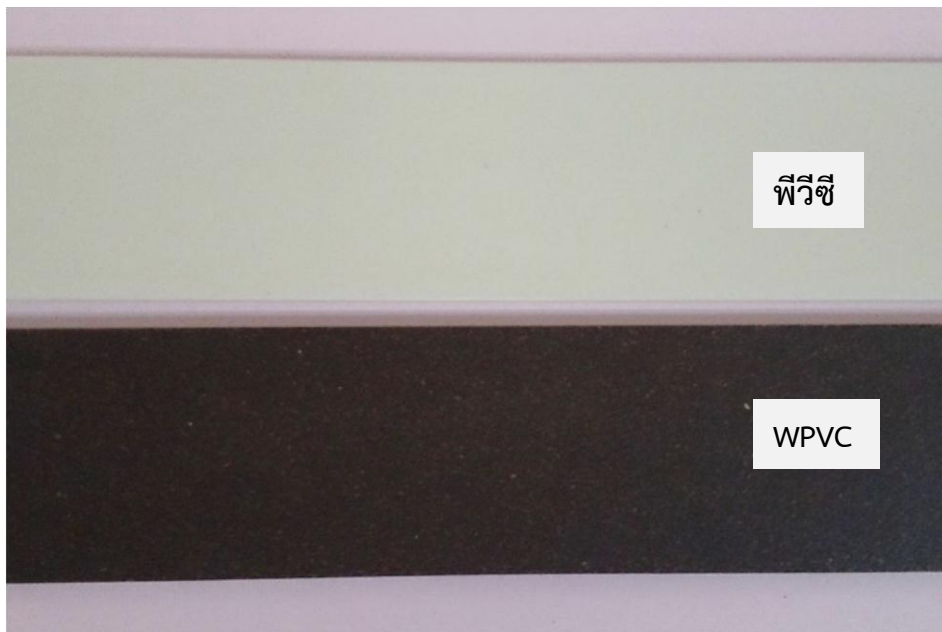
รายละเอียดของสาร	ปริมาณ (phr)
พีวีซี เกรดอัดรีด (SIAMVIC® 258RB)	100.0
สารหล่อลื่นภายนอก	0.6
สารหล่อลื่นภายใน (Ca-St)	0.6
สารช่วยขึ้นรูป (PA-20)	6.0
สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (PF608)	3.6
สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง (Tinuvin P)	2.0
ผงไม้	0.0 และ 100.0



รูปที่ 14 เครื่องบ่นผสมแบบความเร็วสูง



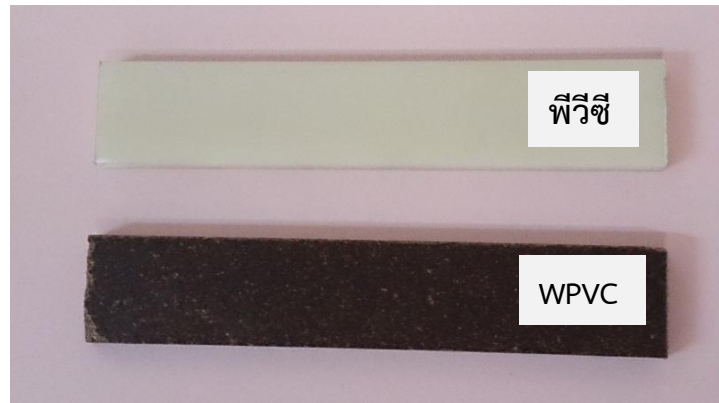
รูปที่ 15 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่



รูปที่ 16 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีด

### 3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนค้อนมาทำการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน และขัดด้วยกระดาษทราย โดยทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 15 x 80 x 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ชิ้นงานทดสอบ

### 3.2 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการใช้งาน

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการจำลองสภาวะการใช้งานของชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ที่ต้องใช้งานการแจ้งและต้องเผชิญกับสภาวะที่มีความชื้น ทำการจำลองสภาวะโดยการนำชิ้นงานพีวีซีและ WPVC ไปแช่ในน้ำกลั่นที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำที่แช่ชิ้นงานที่ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในแช่ชิ้นงาน ตั้งแต่ 0, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง โดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำ ทำโดยการทดลองจำลองสภาวะโดยการใช้ตู้อบ ดังแสดงในรูปที่ 18 และทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานทดสอบพีวีซีและวัสดุผสม WPVC แต่ละสภาวะการจำลองการใช้งาน จำนวนสุตรละ 8 ชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อนำมาทดสอบสมบัติทางกล



รูปที่ 18 การจำลองสภาวะการใช้งานโดยการใช้ตู้อบ

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล

#### 3.3.1 การทดสอบความต้านทานแรงดัด

นำชิ้นงานทดสอบพีวีซีและ WPVC แต่ละสภาวะการจำลองการใช้งาน จำนวนอย่างละ 5 ชิ้นงาน ทดสอบ มาทำการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดด้วยเครื่อง Instron Universal Testing รุ่น Instron 5566 ของบริษัท Instron ประเทศอังกฤษ ดังรูปที่ 19 ขนาดชิ้นงานตัวอย่าง  $15 \times 80 \times 4$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> ทำการทดสอบแรงดัดแบบกุด 3 จุด ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790 [25] โดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวรองรับ 55 มิลลิเมตร ความเร็วในการกด 2.4 มิลลิเมตรต่อนาที รายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัด และค่าความต้านทานแรงดัด



รูปที่ 19 เครื่อง Instron Universal Testing รุ่น Instron 5566

#### 3.3.2 การวัดค่าความแข็ง

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบพีวีซีและ WPVC ที่สภาวะการจำลองการใช้งานต่างๆ กัน ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าแข็ง แบบ Shore D ดังแสดงในรูปที่ 20 ทำการวัดค่าความแข็งโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 [26] ขนาดของชิ้นงานทดสอบมีขนาดเท่ากับกรณีการทดสอบความต้านทานแรงดัด แต่ละสภาวะการทดสอบใช้ชิ้นงานทดสอบอย่างละ 3 ชิ้นงานทดสอบ แต่ละชิ้นงานทดสอบทำการวัดทั้งหมด 5 จุด และทำการรายงานผลค่าความแข็ง แบบ Shore D

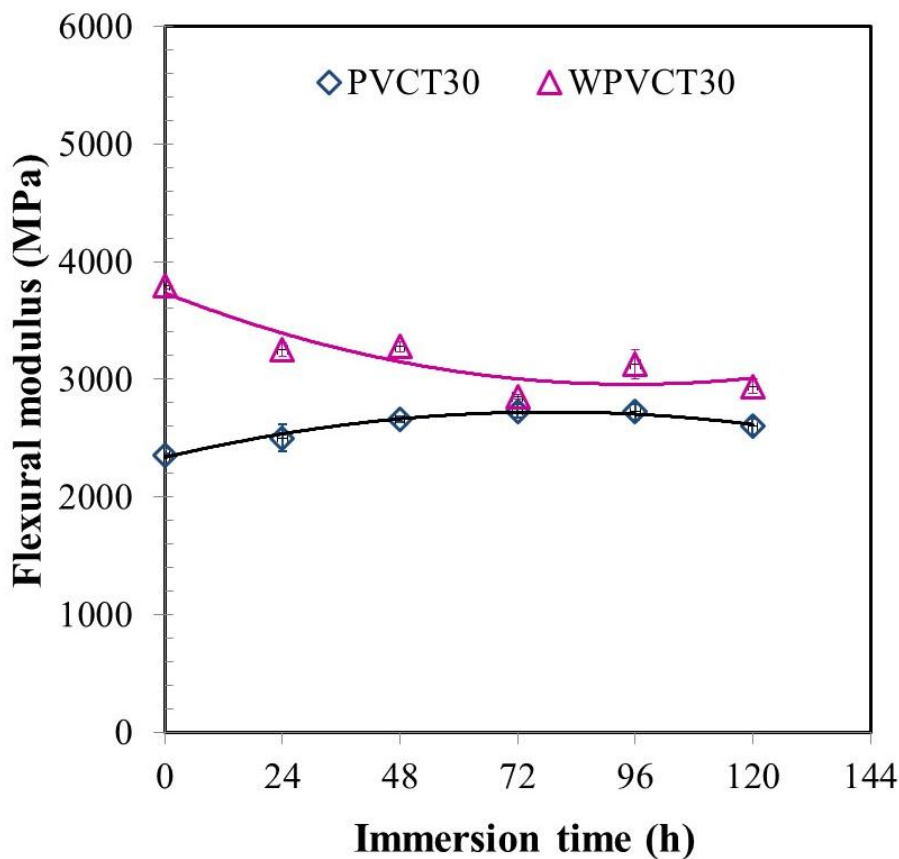


รูปที่ 20 เครื่องวัดค่าความแข็ง แบบ Shore D

## บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุผสมพีวีซีและผงไม้ ภายใต้สภาวะการจำลองการใช้งานที่มีความชื้น ได้ทำการรายงานผลเปรียบเทียบกับพีวีซี โดยการประเมินสมบัติทางกลทำการประเมินโดยการทดสอบสมบัติความต้านทานทานแรงดัด และค่าความแข็ง สำหรับการวิเคราะห์ผลได้ทำการวิเคราะห์ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงาน อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ชิ้นงาน และผลของการมีอยู่ของผงซีลี้อยู่ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล

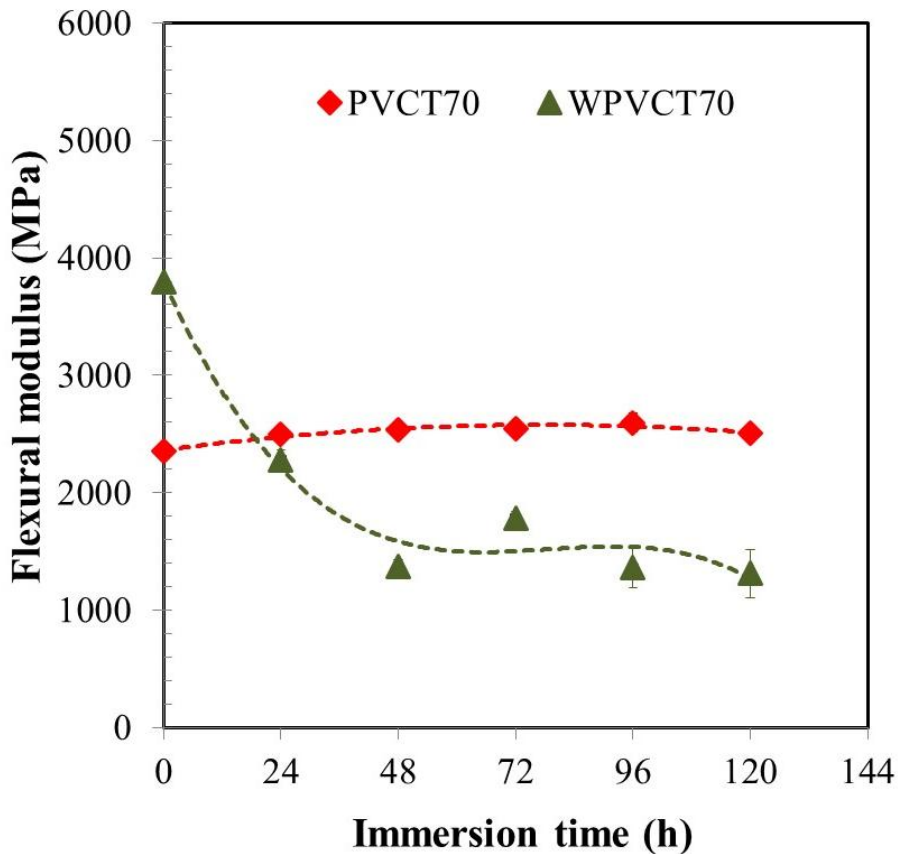
### 4.1 ผลของค่าความต้านทานแรงดัด



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดและเวลาในการแช่น้ำสำหรับกรณีชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

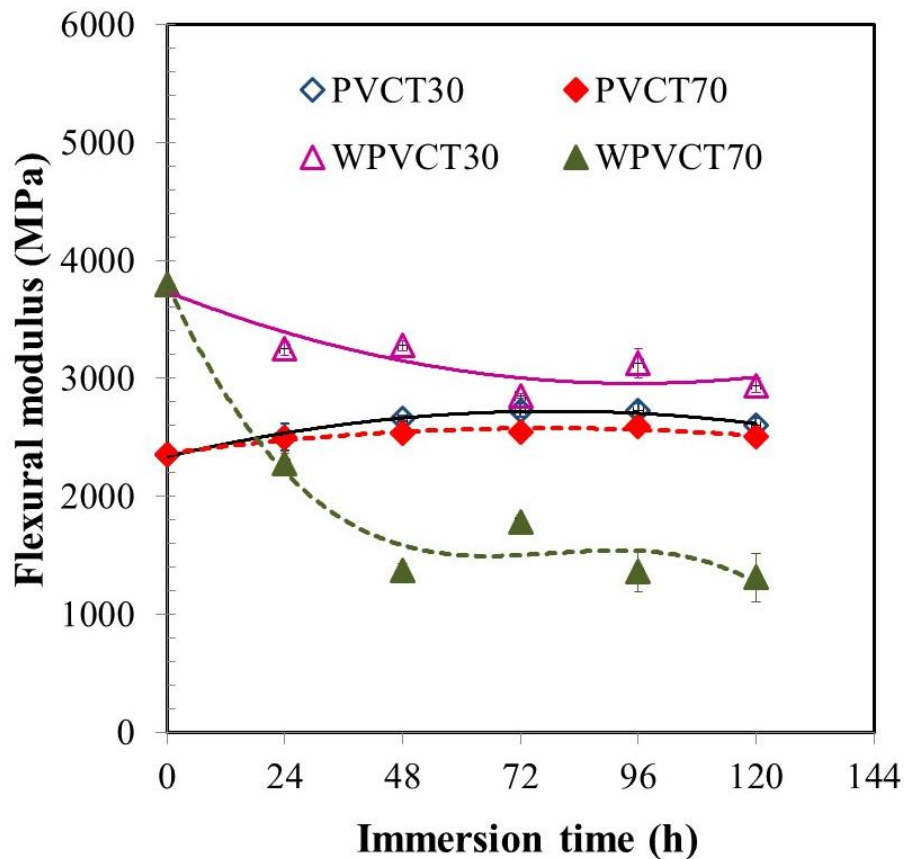
รูปที่ 21 แสดงค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ที่เวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับชิ้นงานพีวีซี จากผลการทดลองพบว่า ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น และเริ่มมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 72 ชั่วโมง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงซีลี้อยู่ไม้ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ เซลลูโลสจึงสามารถดูดซับน้ำเอาไว้ ส่งผลทำให้ผงซีลี้อยู่ไม้มีความอ่อนตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้วัสดุผสมมีความคงรูปลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลกับกรณีของพีวีซี พบว่า ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของพีวีซีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเวลาในการ

แช่น้ำเพิ่มมากขึ้น เพราะพีวีซีดูดซับน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นการแช่ชิ้นงานพีวีซีในน้ำจึงไม่ผลต่อค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดมากนัก ในขณะที่ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC เริ่มต้นก่อนการแช่น้ำมีค่าสูงกว่ากรณีพีวีซี เนื่องจากผงไม้มีความคงรูปสูงกว่าพีวีซี แต่เมื่อเวลาในการแช่น้ำนานขึ้นค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสม WPVC เริ่มลดลงมาใกล้เคียงกับชิ้นงานพีวีซี



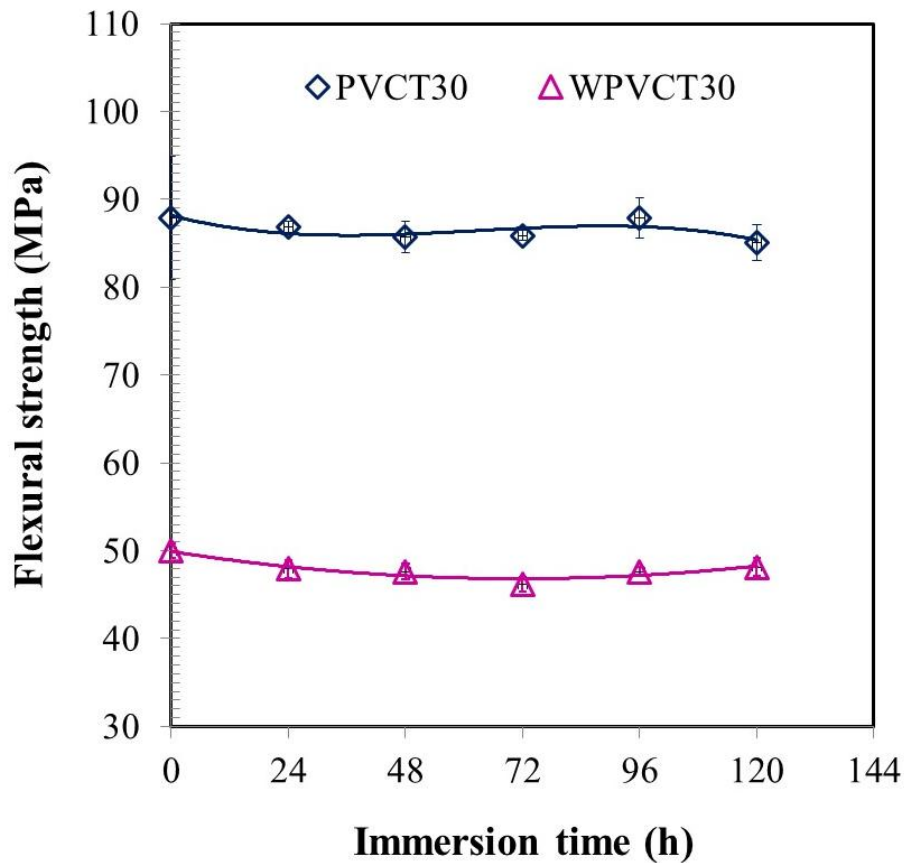
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดและเวลาในการแช่น้ำสำหรับกรณีชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

รูปที่ 22 แสดงค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ที่เวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับชิ้นงานพีวีซี จากการทดลองพบว่า ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับกรณีการแช่ชิ้นงานในน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเริ่มมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 48 ชั่วโมง ในขณะที่กรณีของพีวีซีการแช่น้ำมีผลทำให้ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดัดมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานขึ้น



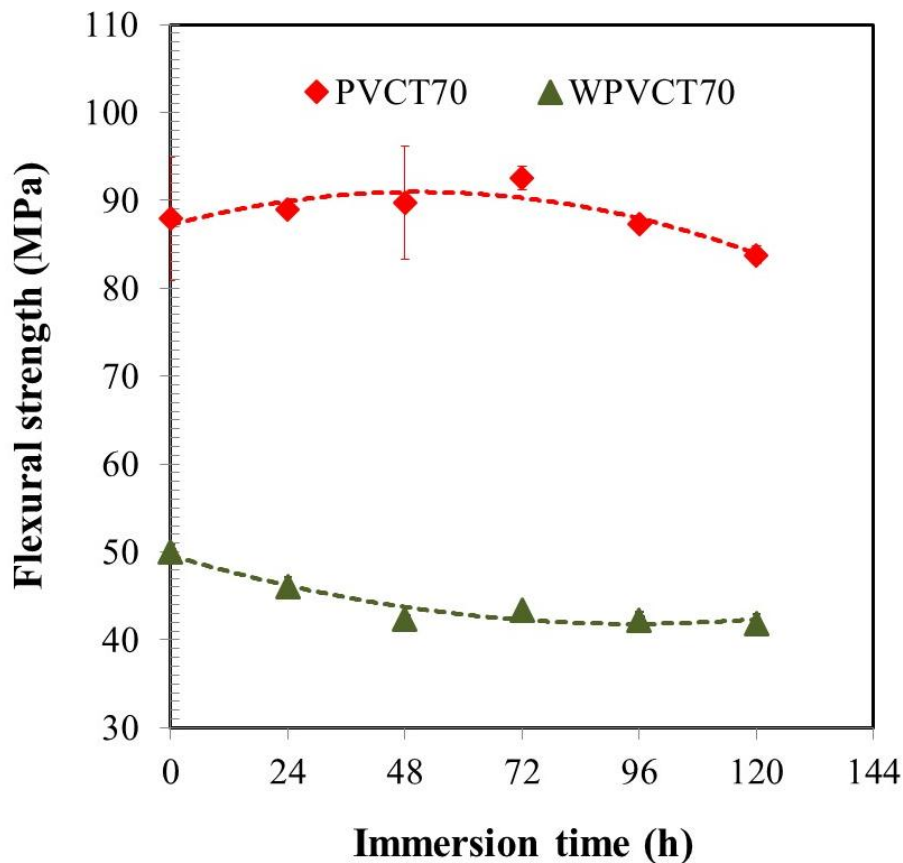
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดและเวลาในการแช่น้ำสำหรับชิ้นงานพีวีซี และวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

รูปที่ 23 แสดงค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ที่เวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน ทั้งอุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ชิ้นงานเพิ่มสูงมีผลเฉพาะกับชิ้นงานวัสดุผสม WPVC เท่านั้น โดยพบว่า ยิ่งอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ชิ้นงานสูงขึ้นยิ่งมีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดลดลงอย่างรวดเร็ว ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิของการแช่ชิ้นงานที่ 70 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานพีวีซี เมื่อเวลาในการแช่น้ำมากกว่า 24 ชั่วโมง ในขณะที่ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของ WPVC ที่อุณหภูมิของการแช่ชิ้นงานที่ 30 องศาเซลเซียส ยังคงมีค่าสูงกว่าของกรณีชิ้นงานพีวีซี และค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของชิ้นงาน WPVC เริ่มมีแนวโน้มคงที่ ณ อุณหภูมิการแช่ชิ้นงานที่ 70 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นรวดเร็วกว่ากรณีการแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิการแช่ชิ้นงานที่ 30 องศาเซลเซียส โดยพบที่เวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 48 ชั่วโมง และมากกว่า 72 ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นมีผลทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปภายในชิ้นงาน WPVC ได้รวดเร็วและปริมาณเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำที่อนุภาคซีลี้อยไม่ดูดซับไว้มากขึ้น จึงทำให้ซีลี้อยอ่อนตัวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ความคงรูปของวัสดุผสม WPVC ลดลงอย่างรวดเร็ว



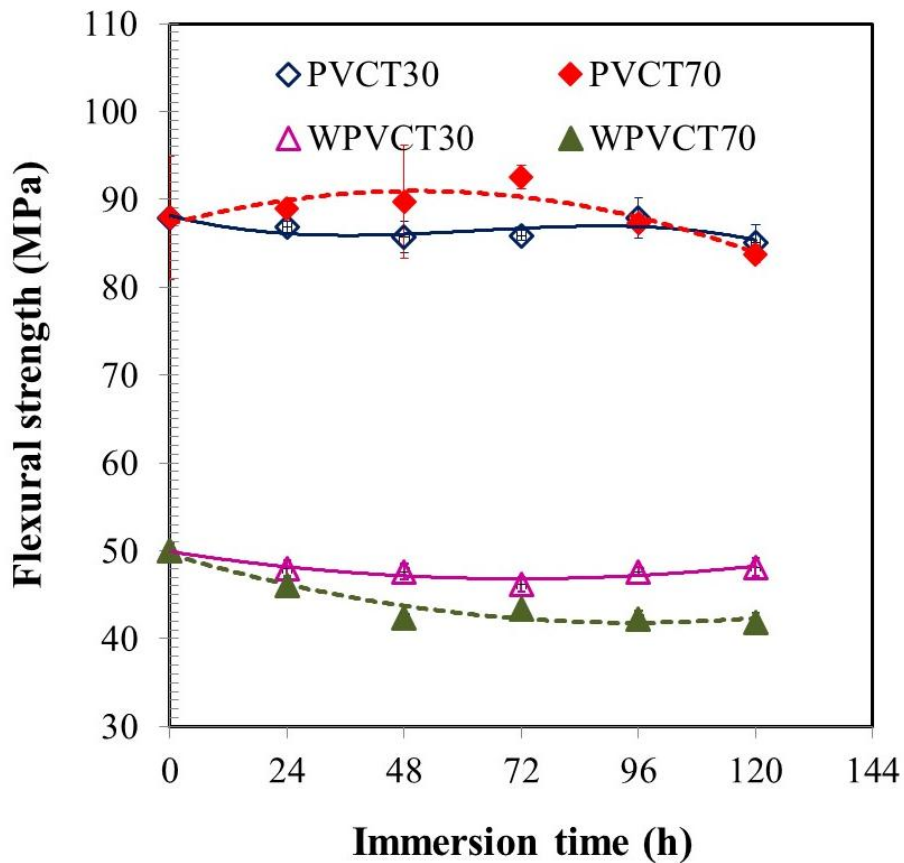
รูปที่ 24 ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานในน้ำที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดสำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

รูปที่ 24 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ที่เวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับชิ้นงานพีวีซี จากผลการทดลองพบว่า ทั้งกรณีพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าอาจมีผลไปทำลายแรงยึดเกาะระหว่างเฟสของพีวีซีและผงซีลี้อยู่ในชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ก็ตาม ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดลดลง แต่การที่อนุภาคซีลี้อยู่สามารถดูดซับน้ำเอาไว้มีผลทำให้อนุภาคซีลี้อยู่เกิดการบวมตัวจึงมีผลทำให้การเคลื่อนตัวระหว่างเฟสเกิดได้ยากและนั่นช่วยทดแทนการลดลงของค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดจากการทำลายแรงยึดเกาะระหว่างเฟสด้วยน้ำ



รูปที่ 25 ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานในน้ำที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดสำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

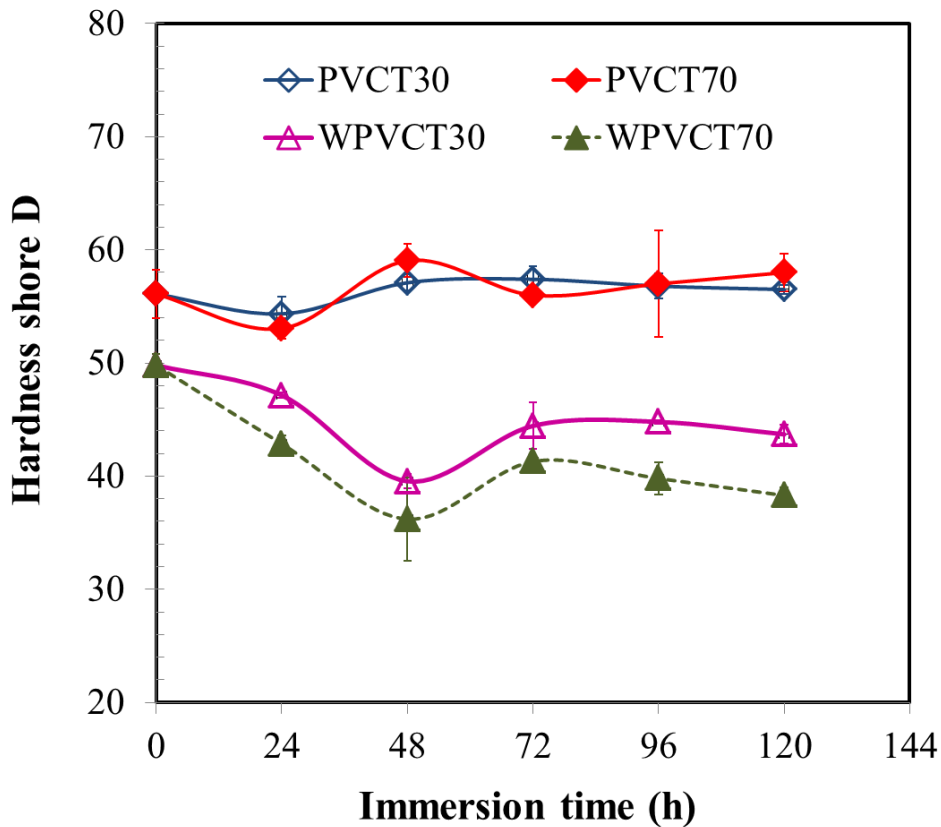
รูปที่ 25 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ที่เวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับชิ้นงานพีวีซี จากผลการทดลองพบว่า วัสดุผสม WPVC มีค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานขึ้น ขณะที่ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของพีวีซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น การลดลงของค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของวัสดุผสม WPVC อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้น้ำแพร่เข้าไปภายในชิ้นงานมากขึ้นมีผลทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเฟสถูกทำลาย แต่การลดลงของค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดลดลงไม่มากนักอาจเนื่องมาจากผงซีลี้อยไม้ที่ดูดซับน้ำไว้เกิดการบวมเช่นเดียวกับกรณีการแช่ชิ้นงาน กัน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ขณะที่พีวีซีมีการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดลดลงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าน้ำสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อพีวีซีได้น้อยก็ตาม แต่อุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นอาจมีผลทำให้สารหล่อลื่นภายในชิ้นงานพีวีซีเกิดการแพร่ออกมาส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดและเวลาในการแช่น้ำสำหรับชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

รูปที่ 26 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นงานวัสดุผสม WPVC ที่เวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน ทั้งอุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดทั้งกรณีพีวีซีและวัสดุผสม WPVC มีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกรณีการแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เท่านั้น ในขณะที่กรณีการแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งผลเป็นดังที่อธิบายไว้ในรูปที่ 24-25

#### 4.2 ผลของค่าความแข็ง



รูปที่ 27 ผลของเวลาในการแช่ชิ้นงานในน้ำที่มีต่อค่าความแข็งของชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

รูปที่ 27 แสดงผลของค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการแช่ชิ้นงานพีวีซีและวัสดุผสม WPVC ในน้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานพีวีซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ทั้งกรณีการแช่ชิ้นงาน ณ อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าความแข็งของชิ้นงาน WPVC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานขึ้น และพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความแข็งของชิ้นงาน WPVC ยิ่งมีค่าลดลงมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของชิ้นงานพีวีซีอาจเนื่องมาจากสารหล่อลื่นที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงานพีวีซีถูกชะล้างออกด้วยน้ำ ส่วนการลดลงของค่าความแข็งของชิ้นงาน WPVC อาจเนื่องมาจากอนุภาคของซีลีเนียมดูดซับน้ำจึงมีผลทำให้อนุภาคซีลีเนียมเกิดความอ่อนตัว และยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นยิ่งทำให้อนุภาคซีลีเนียมดูดซับน้ำไว้มากยิ่งขึ้น จึงยิ่งทำให้อนุภาคเกิดความอ่อนตัวมากยิ่งขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงาน WPVC ยิ่งมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการแช่ชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

## บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติกลของวัสดุผสม WPVC โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีพีวีซี โดยทำการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลจากการตรวจสอบสมบัติความต้านทานแรงดัด และค่าความแข็ง จากผลการทดสอบ มีรายละเอียดดังนี้

- ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของ WPVC มีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 72 และ 48 ชั่วโมง สำหรับการแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การลดลงของค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้น้ำแพร่เข้าไปในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น และขี้เลื่อยดูดซับน้ำในปริมาณที่มากขึ้นนำไปสู่การทำให้ขี้เลื่อยอ่อนตัวลง ในขณะที่ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดัดของพีวีซีมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง
- ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด พบว่า การแช่ชิ้นงานในน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไม่มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น 70 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของชิ้นงาน WPVC มีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเฟสถูกทำลายและทำให้ขี้เลื่อยอ่อนตัว ในขณะที่ชิ้นงานพีวีซีมีค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะน้ำอาจไปละลายสารหล่อลื่นออกจากชิ้นงานพีวีซี
- สำหรับค่าความแข็ง พบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงาน WPVC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น และยังลดลงมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการแช่น้ำเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ค่าความแข็งของพีวีซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

1. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of molecular structures and mechanical properties of PVC and wood/PVC composites by Tinuvin and TiO<sub>2</sub> stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, pp. 1354-1365.
2. Stark, N.M. and Matuana, L.M., 2007, "Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 92, pp. 1883-1890.
3. Bledzki, A.K., Letman, M., Viksne, A. and Rence, L., 2005, "A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites", **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 36, pp. 789-797.
4. Bledzki, A.K., Letman-Sakiewicz, M. and Murr, M., 2010, "Influence of static and cyclic climate condition on bending properties of wood plastic composites (WPC)" **Express Polymer Letters**, Vol. 4, pp. 364-372.
5. Fabiyi, J.S. and McDonald, A.G., 2010, "Physical morphology and quantitative characterization of chemical changes of weathered PVC/pine composites", **Journal of Polymer and the Environment**, Vol. 18, pp. 57-64.
6. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C., and Thongsang, S., 2003, "Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites", **Polymer International**, Vol. 52, pp. 1847-1855.
7. Sombatsompop, N., and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of moisture content on mechanical properties, thermal and structural stability, and extrudate texture of PVC/wood sawdust composites", **Polymer International**, Vol. 54, pp. 1210-1218.
8. Ge, X.C., Li, X.H., and Meng, Y.Z., 2004, "Tensile properties, morphology, and thermal behavior of PVC composites containing pine flour and bamboo flour", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 93, pp. 1804-1811.
9. Augier, L., Sperone, G., Vaca-Garcia, C., and Borredon, M.E., 2007, "Influence of the wood fibre filler on the internal recycling of poly(vinyl chloride) based composites", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 92, pp. 1169-1176.
10. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K., and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical characterization of E-chopped strand glass fiber reinforced wood/PVC composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, pp. 535-550.
11. Arbelaiz, A., Fernández, B., Ramos, J.A., Retegi, A., Llano-Ponte, R., Mondragon, I., 2005, "Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling", **Composites Science and Technology**, Vol. 65, Issue 10, pp. 1582-1592.

12. Ndiaye, D., Fanton, E., Morlat-Therias, S., Vidal, L., Tidjani, A. and Gardette, J.L., 2008, "Durability of Wood Polymer Composites: Part 1. Influence of Wood on the Photochemical Properties", **Composites Science and Technology**, Vol. 68, No. 13, pp. 2779-2784.
13. Du, H., Wang, W., Wang, Q., Zhang, Z., Sui, S. and Zhang, Y., 2010, "Effect of Pigments on the UV Degradation of Wood-flour/HDPE Composites", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 118, No. 2, pp. 1068-1076.
14. Nass, L.I. and Heiberger, C.A., 1986, **Encyclopedia of PVC**, Vol. 1, 2<sup>nd</sup> ed., Marcel Dekker, INC., New York, pp. 339-341, 371-375.
15. Titow, W.V., 1990, **PVC Plastics: Properties, Processing and Applications**, Elsevier Applied Science, New York, pp. 62-333.
16. Gächter, R. and Müller, H., 1990, **Plastics Additives Handbook**, Hanser Publishers, New York, pp. 271-281, 423-438, 525-535.
17. <http://www.specialchem4polymers.com/tc/mbs-impact-modifiers/index.aspx?id>
18. Owen, E.D., 1984, **Degradation and stabilization of PVC**, Elsevier Applied Science Publishers, New York, pp. 21-68.
19. Stranes, Jr. W.H., 2002, "Structural and Mechanistic Aspects of the Thermal Degradation of Poly(vinyl chloride)", **Progress in Polymer Science**, Vol. 27, pp. 2133-2170.
20. Sjöström, E., 1993, **Wood Chemistry Fundamentals and Application**, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, INC., New York, pp. 55-89.
21. Blezzki, A.K. and Gassan, J., 1999, "Composites Reinforced with Cellulose based Fibres", **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 221-274.
22. Kirk and Othmer, 1998, **Encyclopedia of Chemical Technology**, Vol. 25, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, INC., pp. 627-647.
23. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, Chapter 3, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.
24. Mathews, F.L. and Rawlings, R.D., 1994, **Composite Materials: Engineering and Science**, Chapman & Hall, Oxford, pp. 29-64.
25. ASTM D790, 2003, **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**.
26. ASTM D2240, 1999, **Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness**.