



การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่าง
ผงซีลีออย์ไม้กับพอลิคาร์บอเนต

โดย

นายวิฑูร วิมลทรง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่าง
ผงซีเมนต์กับพอลิคาร์บอเนต

โดย

นายวิฑูร วิมลทรง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL CONDUCTIVITY OF
WOOD SAWDUST/POLYCARBONATE COMPOSITES**

By

Wittawut Vimolsong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2011

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงจีเลียวไม้กับพอลิคาร์บอเนต” เสนอโดย นายวิฑูร วิมลทรง เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐัญชลี)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อำนาจ ลิขิตตระกูล)
...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล)
...../...../.....

52402243 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิคาร์บอนेट/ผงซีลีเนียม/โพลีคอมโพสิต/การนำความร้อน

วิทยุช วัฒนทรง : การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอนेट. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.พูนทรัพย์ ศรีภพนาถกุล. 163 หน้า.

ปัจจุบันผงซีลีเนียมได้ถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากมีราคาถูก ทั้งยังเป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ แต่ปัญหาหนึ่งสำหรับการนำผงซีลีเนียมมาใช้ในการเสริมแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์คือความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสอง ในงานวิจัยนี้สารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด คือ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) และ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z6011) รวมถึงโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอนेट จากผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงโค้งงอของวัสดุคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอนेटบริสุทธิ์ อีกทั้งค่ามอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงโค้งงอของวัสดุคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของผงซีลีเนียมลงไป อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณของผงซีลีเนียมได้ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุคอมพอสิต จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM ได้ทำให้ทราบถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคผงซีลีเนียม นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณการใช้ผงซีลีเนียมยังส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการทดลองพบว่าปริมาณการใช้ผงซีลีเนียมที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมแรงให้กับวัสดุคอมพอสิตอยู่ที่ 10 % โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอนेट

นอกจากนี้แล้วในงานวิจัยนี้ยังได้มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุโพลีคอมพอสิต จากผลการศึกษาสมบัติต่างๆ พอที่จะชี้ชัดได้ว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 2.0 phr เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้วัสดุโพลีคอมพอสิตเกิดโครงสร้างเซลล์โฟมที่สม่ำเสมอและมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

52402243 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : POLYCARBONATE/WOOD SAWDUST/COMPOSITE FOAM/THERMAL CONDUCTIVITY

WITTAWUT VIMOLSONG : THE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL CONDUCTIVITY OF WOOD SAWDUST/POLYCARBONATE COMPOSITES.

THESIS ADVISORS :ASST. PROF. POONSUB THREEPOP NATKUL, D.ENG., 163 pp.

Wood sawdust was increasingly being used as reinforcement in commercial thermoplastics due to low cost, reusable raw materials. One of the problems of using wood sawdust is its interfacial adhesion with polymeric matrix. In this research, two types of silane coupling agents (N-(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine and γ -aminopropyl trimethoxy silane) and sodium hydroxide were used for the modification of interfacial adhesion in wood sawdust/polycarbonate composites. The effects of chemical treatment and wood sawdust content (10, 20 and 30 % by wt) were investigated by Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), thermal conductivity analysis. Young's modulus of composites was in general higher than the neat PC except for the one with γ -aminopropyl trimethoxy silane treatment. Tensile modulus of composites was increased as the filler loading increased. Nevertheless, the addition of wood sawdust resulted in the tensile strength reduction of the composites. The SEM micrographs reveal that the aggregation of wood particles and weak interfacial bond between the treated wood sawdust and the polymeric matrix with increasing filler loading. Furthermore, the thermal conductivity was reduced significantly with the increment of wood sawdust contents. Wood content in the most appropriate use of reinforcement in the composite was 10% compared to the weight of polycarbonate.

Two different blowing agent (Hydrocerol HK 40B and 5-Phenyl-1H-Tetrazole) were used prepare foam composite. The effect of the blowing agent concentration on the mechanical properties and thermal conductivity of wood sawdust/PC composite-foamed was examined. Impact strength of wood sawdust/PC composite foam in all systems was decreased when compared with wood sawdust/PC composite and hardness indicate that it's rigid foam. The recommended concentrations for 5-Phenyl-1H-Tetrazole blowing agents in this research were 2.0 phr, the optimum for foam cells structure and composite foam insulator.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2011
Student's signature.....
Thesis Advisors' signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากการได้รับความอนุเคราะห์จากหลากหลายฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการสนับสนุนด้านเงินทุน อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงสำหรับการสนับสนุนด้านเงินทุน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบสมบัติการนำความร้อน และขอขอบคุณบริษัท ไทยโพลีคาร์บอเนต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต ที่ให้ความอนุเคราะห์ เอนไซม์ สำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ศรีภพนาถกุลผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางในการศึกษา วิเคราะห์ พร้อมให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งด้วยความเอาใจใส่มาโดยตลอด และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เคยสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง และขอระลึกถึงพระคุณของท่านอาจารย์ตลอดไป

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ คุณพินิจ เจียนระลึก ที่คอยอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ และ คุณไพโรจน์ ตั้งสุขวิช ในการบำรุงรักษาเครื่องมือต่างๆ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่สำนักงานภาควิชา ที่อำนวยความสะดวกทางการเงินและเอกสารต่างๆ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณครอบครัวและเครือญาติ ที่คอยส่งเสริมและให้โอกาสทางการศึกษา คอยเป็นที่ปรึกษาทางใจ ให้มีกำลังเข้มแข็งและพร้อมที่จะเผชิญกับปัญหา จนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย	2
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ	8
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
พอลิคาร์บอเนต	9
เส้นใยธรรมชาติ	12
องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ.....	12
การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ	13
ผงขี้เลื่อยไม้	15
ข้อดี ข้อเสียของการนำผงขี้เลื่อยไม้มาใช้งานคอมพอสิต	15
ไฮเลน.....	16
γ -aminopropyl trimethoxysilane	19
N ¹ -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine	20
โฟมพลาสติก.....	20
ประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก	21
ประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์	21
ประเภทโฟมตามความแข็ง	21
ฉนวนโฟม	21

บทที่	หน้า
นวนพอลิสไตรีนโฟม	22
นวนพอลิยูเรเทนโฟม	22
นวนพอลิเอทเธรีน โฟม.....	22
การผลิตโฟม	23
ก๊าซที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟม	23
ทฤษฎีการเกิดโฟม.....	24
Nucleating agent สำหรับโฟม.....	25
ขนาดของเซลล์ โฟม.....	25
ความหนาแน่นของโฟม	26
อัตราส่วนระหว่างเซลล์เปิดและเซลล์ปิด	26
Blowing agent หรือ Foaming agent	27
Chemical foaming agents	27
Hydrocerol HK 40B	29
5-Phenyl-1H-tetrazoles	30
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	36
วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	36
เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	39
วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
การคัดเลือกขนาดผงขี้เลื่อยไม้.....	42
การปรับปรุงผิวผงขี้เลื่อยไม้โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์	42
การปรับปรุงผิวผงขี้เลื่อยไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน	43
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงขี้เลื่อยไม้	44
การผสมวัสดุเพื่อขึ้นรูป	44
การขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิต	46
การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)	46
การอัดขึ้นรูป (Compression molding)	46
การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)	47

บทที่	หน้า
การวัดค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	47
การทดสอบอัตราการไหลของคอมพอสิต (Melt Flow Index)	48
การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)	48
การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Properties)	48
การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงโค้งงอ (Flexural properties) ..	49
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Properties) ..	50
การทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness)	51
การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)	51
การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	51
การทดสอบสมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity)	52
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยา (Morphology)	53
แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ	55
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	59
ผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไพลีนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต	59
ศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไพลีนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต	59
ผลการทดสอบ FTIR	60
ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต	64
ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต	74
ศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไพลีนที่มีต่อสมบัติต่างๆของคอมพอสิต	76
ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต	76
ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต	81
ผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆของคอมพอสิต.....	83
ศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต	83
ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต	83
ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต	88
ผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต	91
ศึกษาผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต	91
ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต	91

บทที่	หน้า
ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต	96
ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ	
ของคอมพอสิต	97
ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต	98
ผลต่อสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต	103
5 สรุปผลการทดลอง	106
บรรณานุกรม	108
ภาคผนวก	112
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์	
และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	113
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิคาร์บอเนต	
บริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	137
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบ FTIR ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และ	
วัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	145
ภาคผนวก ง ข้อมูลการวิเคราะห์โดยเทคนิค Scanning Electron Microscopy	
(SEM) ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิต	
ของพอลิคาร์บอเนต	150
ประวัติผู้วิจัย	163

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงสมบัติของสารประสานคู่ควบไซเลน	17
2	แสดงตัวอย่างของสารคู่ควบประเภทไซเลนและการนำไปใช้งานกับ พลาสติกชนิดต่างๆ	18
3	แสดงคุณสมบัติของพลาสติกพอลิคาร์บอเนต	37
4	แสดงองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวผงจีลื้อยไม้ และใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต	40
5	แสดงสภาวะในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์	46
6	แสดงสภาวะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิต	47
7	แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอม พอสิต ที่ปริมาณการใช้ผงจีลื้อยไม้ 10% โดยน้ำหนักของคอมพอสิต....	75
8	แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอม พอสิต ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	81
9	แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอสิตของ พอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงจีลื้อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน	89
10	แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผง จีลื้อยไม้ที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง	92
11	แสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิคาร์บอเนตและโพลีพอลิคาร์บอเนตคอม พอสิตไม้ที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 0.5 phr	94
12	แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงจีลื้อย ไม้ที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง	97
13	แสดงค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองใน ปริมาณที่แตกต่างกัน	102
14	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และ วัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	114
15	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	115

ตารางที่		หน้า
16	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS	117
17	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน..	118
18	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	119
19	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	121
20	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต.....	122
21	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	123
22	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน...	124
23	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexeral modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	126
24	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	127
25	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	128
26	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต.....	129
27	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	130
28	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	132

ตารางที่		หน้า
29	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของพอลิคาร์บอเนต และวัสดุโคมพอลิตีที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	133
30	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของวัสดุโคมพอลิตีที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน	134
31	แสดงค่า Hardness ของวัสดุโคมพอลิตีที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	135
32	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Hardness ของวัสดุโคมพอลิตีที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	135
33	แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Hardness ของวัสดุโคมพอลิตีที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	136
34	แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอลิตี ที่ปริมาณการใช้ผงซีลีอไม์ 10% โดยน้ำหนักของคอมพอลิตี.....	138
35	แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอลิตีของพอลิคาร์บอเนต	138
36	แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอลิตี ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	139
37	แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตคอมพอลิตี ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	139
38	แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอลิตีของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีอไม์ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	139
39	แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมพอลิตีของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีอไม์ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	140
40	แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุโคมพอลิตีที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน	141
41	แสดงข้อมูลการทดสอบ TGA ของผงซีลีอไม์และสารทำให้เกิดฟอง.....	144

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กลไกการเกิดปฏิกิริยา deprotonates hydroxyl groups ของ โมเลกุล bisphenol A	10
2	การเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยา deprotonated oxygen กับ phosgene	10
3	การ deprotonate bisphenol A การขจัด chloride ion และการเกิด dimmer ของ bisphenol A	11
4	แสดงแผนผังกระบวนการผลิตพอลิคาร์บอเนต	12
5	โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose)	13
6	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	14
7	ปฏิกิริยาการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	15
8	แสดงลักษณะโครงสร้างของไซเลน	16
9	แสดงโครงสร้างของ Gamma-Aminopropyl trimethoxysilane	19
10	แสดงโครงสร้างของ N ¹ -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine	20
11	แสดงสูตรโครงสร้างของ Hydrocerol HK 40B	29
12	แสดงสูตร โครงสร้างของ 5-Phenyl-1H-tetrazoles	30
13	แสดง SEM micrograph ของ (a) NaOH treated, (b) Z-6011 treated and (c) Z-6030 treated PALF/PC composites	32
14	ผงขี้เลื่อยไม้	37
15	พอลิคาร์บอเนตเกรด MB2215R	37
16	แสดงสูตร โครงสร้างของสารเคลือบไซเลน ชนิด γ -aminopropyl trimethoxysilane.....	38
17	แสดงสูตร โครงสร้างของสารเคลือบไซเลน ชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine.....	38
18	สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B	39
19	สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole	39
20	เครื่องคัดแยกขนาด (Sieve Shaker).....	41
21	แสดงการปรับปรุงผิวผงขี้เลื่อยไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	43
22	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)	44

ภาพที่		หน้า
23	แสดงเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High Speed Internal Mixer).....	45
24	แสดงเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ (twin screw extruder) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
25	แสดงเครื่อง Compression Molding ที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
26	แสดงUniversal testing machine ของ LLOYD Instruments รุ่น LR 50K	49
27	แสดงเครื่อง Impact Tester ของบริษัท Zwick.....	50
28	แสดงเครื่อง Shore Durometer Hardness	51
29	แสดงเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ที่ใช้ในงานวิจัย	52
30	แสดงเครื่อง Thermal constant analyzer.....	53
31	แสดงเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่ใช้ในงานวิจัย	54
32	แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของ ชนิดสารคู่ควบไพลีนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต.....	55
33	แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของ ปริมาณสารคู่ควบไพลีนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต	56
34	แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของ ปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต	57
35	แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของชนิดและปริมาณ ของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต	58
36	แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต	60
37	แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไพลีนชนิด Z-6011 กับโครงสร้างเซลลูโลส ในผงขี้เลื่อยไม้.....	62
38	กลไกปฏิกิริยาระหว่างผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไพลีน ชนิด TMS กับพอลิคาร์บอเนต	62
39	แสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมโพสิต ของพอลิคาร์บอเนต.....	63
40	แสดงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมโพสิต ของพอลิคาร์บอเนต.....	63
41	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมโพสิต (ก) PC/W-Untreated (ข) PC/W- NaOH (ค) PC/W-Z6011 และ (ง) PC/W-TMS ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	66

ภาพที่	หน้า
42	แสดง TGA thermogram ของพอลิคาร์บอนเนตคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีเนียมด้วยไซเลน ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาทีภายใต้บรรยากาศออกซิเจน 67
43	แสดงค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอนเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนต..... 69
44	แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอนเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนต..... 69
45	แสดงพื้นผิวผงซีลีเนียมก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ ... 70
46	แสดงปฏิกิริยาการเกิดพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane) 72
47	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนต 73
48	แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน 77
49	แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน 77
50	แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน 79
51	แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน 79
52	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน 80
53	แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน 84
54	แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน 84
55	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ปริมาณการเติมผงซีลีเนียมที่แตกต่างกัน (a) 10%wt (b) 20%wt (c) 30%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 85

ภาพที่		หน้า
56	แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน	86
57	แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน	87
58	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน	87
59	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง	92
60	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตของ (ก) PC/W ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) PC/H (ค) PC/P (ง) PC/W-H และ (จ) PC/W-P ปริมาณการใช้ สารทำให้เกิดฟอง 0.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า	95
61	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน	99
62	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน	99
63	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน (a) 0.5 (b) 1.0 (c) 1.5 และ (d) 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า	100
64	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน (a) 0.5 (b) 1.0 (c) 1.5 และ (d) 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า	101
65	แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ในปริมาณที่แตกต่างกัน	103
66	แสดง TGA thermogram ของสารทำให้เกิดฟอง	105
67	แสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตของ พอลิคาร์บอเนต	114
68	แสดงค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิต ของพอลิคาร์บอเนต	115

ภาพที่		หน้า
69	แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	116
70	แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	118
71	แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน	119
72	แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน	120
73	แสดงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	122
74	แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	123
75	แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	124
76	แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	125
77	แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน	127
78	แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน	128
79	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต	129
80	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน	130
81	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน	131
82	แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน	133

ภาพที่	หน้า
83	แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ในปริมาณที่แตกต่างกัน 140
84	แสดง TGA thermogram ของผงซีลีเนียม ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน 141
85	แสดง TGA thermogram ของคอมพอสิต PC/W-Z6011 ณ อุณหภูมิ 240°C คง อุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน 142
86	แสดง TGA thermogram ของคอมพอสิต PC/W-TMS ณ อุณหภูมิ 240°C คง อุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน 142
87	แสดง TGA thermogram ของผงซีลีเนียม 143
88	แสดง TGA thermogram สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B 143
89	แสดง TGA thermogram สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1-Terrazole 144
90	แสดง FTIR สเปกตรัมของไซเลนชนิด γ -aminopropyl trimethoxy silane 146
91	แสดง FTIR สเปกตรัมของไซเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine..... 146
92	แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนต 147
93	แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-Untreated 147
94	แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-NaOH 148
95	แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-Z6011 148
96	แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-TMS..... 149
97	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Untreated ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 151
98	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-NaOH ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 151
99	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Z6011 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 152
100	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 152

ภาพที่		หน้า
101	แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....	153
102	แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วย NaOH ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....	153
103	แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	154
104	แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วย NaOH ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	154
105	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ ปริมาณการเติมผงไม้ที่แตกต่างกัน 10%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	155
106	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ ปริมาณการเติมผงไม้ที่แตกต่างกัน 20%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	155
107	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ ปริมาณการเติมผงไม้ที่แตกต่างกัน 30%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	156
108	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W10% - TMS 0.5% ที่ .. กำลังขยาย 50 เท่า	156
109	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/H 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า.....	157
110	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/P 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า.....	157
111	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-H 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า.....	158
112	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-P 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า.....	158
113	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 0.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า....	159
114	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 1.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า....	159

ภาพที่		หน้า
115	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 1.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า....	160
116	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า....	160
117	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 0.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า.....	161
118	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 1.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า.....	161
119	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 1.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า.....	162
120	แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง ชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า.....	162

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีความสนใจในวัสดุคอมโพสิตที่ถูกเสริมแรงด้วยผงไม้และเส้นใยธรรมชาติเป็นอย่างมาก ซึ่งผงไม้นั้นมีข้อได้เปรียบหลายอย่างด้วยกันคือ ได้มาจากธรรมชาติสามารถหาได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และราคาถูก และนอกจากนี้มันยังสามารถถูกเติมไปในเมตริกซ์ในปริมาณที่มากได้ ด้วยเหตุนี้มันจึงถือว่าเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีประโยชน์มากทีเดียว แต่ข้อด้อยหลักๆของคอมโพสิตประเภทนี้คือ มีความอ่อนไหวต่อการดูดซับน้ำ และมีความคงตัวของรูปร่างที่ค่อนข้างแย่ การยึดติดกันกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ไม่ดี เช่นเดียวกันกับความสามารถในการขึ้นรูปที่ค่อนข้างแย่ และความสวยงามของคอมโพสิตที่มีปริมาณการเติมผงไม้ที่มาก การประยุกต์ใช้งานหลักๆ ของผงไม้ที่ถูกเติมลงในคอมโพสิต มักจะเป็นการใช้งานทางด้านที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยานพาหนะและสิ่งก่อสร้าง [1]

สิ่งก่อสร้างในปัจจุบันจำเป็นจะต้องประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ หลายส่วน แต่ส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญก็คือหลังคา ในปัจจุบันมีการทำหลังคาจากวัสดุหลายประเภท เช่น กระเบื้องซีเมนต์ใยหิน กระเบื้องคอนกรีต กระเบื้องเซรามิก กระเบื้องดินเผา และหลังคาแผ่นโลหะ โดยวัสดุที่ใช้ทำหลังคาอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ คือ พอลิคาร์บอเนต เนื่องจากพอลิคาร์บอเนต เป็นพลาสติกที่มีความโปร่งใส ด้านทานการขีดข่วนได้ดี ทนความร้อนและป้องกันรังสียูวีได้ดี ทนต่อแรงกระแทกมากกว่ากระจก อีกทั้งยังน้ำหนักเบา จึงประหยัดไม่เปลืองโครงสร้าง ปัจจุบันได้มีการทำวัสดุเชิงประกอบของพอลิคาร์บอเนตที่ใช้ทำเป็นหลังคา โดยการใช้เส้นใยแก้วผสมลงไป ในพอลิคาร์บอเนตเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น แม้เส้นใยแก้วจะช่วยในการเสริมแรงให้กับพอลิคาร์บอเนตได้ แต่เนื่องจากเส้นใยแก้วนั้นมีราคาค่อนข้างสูงและไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะใช้ผงขี้เลื่อยไม้มาช่วยในการเสริมแรงแทนการใช้เส้นใยแก้ว เนื่องจากผงขี้เลื่อยไม้เป็นวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ มีราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

สมบัติสำคัญของหลังคาอีกอย่างหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาคือการเป็นฉนวนความร้อน โดยหลังคาที่ดีต้องมีสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำหรือก็คือเป็นฉนวนความร้อนที่ดี เนื่องจากจะสามารถช่วยลดอุณหภูมิในอาคารหรือบ้านให้เย็นลง ช่วยประหยัดค่าไฟจากการใช้

เครื่องปรับอากาศ รวมไปถึงลดการเสื่อมสภาพของสินค้าหรืออาหารที่อยู่ภายในอาคารที่เกิดจากความร้อนให้ช้าลงไปด้วยในตัว อีกทั้งยังช่วยยืดอายุอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ได้หลังคาได้อีกด้วย ซึ่งการที่จะปรับปรุงสมบัติของหลังคาให้มีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ทำได้โดยการขึ้นรูปหลังคาให้เป็นโฟม โดยการใช้ blowing agent เข้ามาช่วยในกระบวนการขึ้นรูป

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองขึ้นรูปโฟมคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียม เพื่อศึกษาถึงผลการใช้ผงซีลีเนียมในการใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิคาร์บอเนต แต่เนื่องจากผงซีลีเนียมและพอลิคาร์บอเนตเข้ากันได้ยาก เนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกันระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิคาร์บอเนต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของการเติมสารตัวเชื่อม เพื่อช่วยประสานหรือยึดติดกันระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิคาร์บอเนต รวมทั้งศึกษาถึงผลของ blowing agent ที่ใช้ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของโฟมคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต โดยคาดหวังว่าโฟมคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมที่ได้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหลังคาที่มีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในบ้านหรือตัวอาคารให้ลดลงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเชื่อม ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียม
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงซีลีเนียม ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียม
3. เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิตโฟมของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียม

1.3 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.3.1 ผงซีลีเนียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคประมาณ 100-150 ไมโครเมตร
- 1.3.2 เลือกใช้ไซเลน 2 ชนิด คือ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) และ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS)

1.3.3 สัดส่วนของผงจีเลียวไมท์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตมี 3 ปริมาณ คือ 10 %, 20 % และ 30 %wt โดยน้ำหนักของคอมโพสิต

1.3.4 เลือกใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole โดยทำการผสมในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ส่วนจาก 100

1.3.5 ในการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลน และผลของปริมาณผงจีเลียวไมท์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต จะใช้การขึ้นรูปแบบ injection molding ส่วนการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต จะใช้การขึ้นรูปแบบ compression molding

1.4 แนวทางและขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบงานวิจัยและวางแผนการวิจัย

1.4.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี

1.4.4 ดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

1. การปรับปรุงผิวผงจีเลียวไมท์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (caustic soda)

1.1) ทำความสะอาดผงจีเลียวไมท์ด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิ 50°C โดยแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที

1.2) ทำการปรับปรุงพื้นผิวของผงจีเลียวไมท์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4% o.w.f. และ laventin 1% o.w.f. โดยเติมน้ำลงไปในอัตราส่วน 1:25 เมื่อเทียบกับน้ำหนักของผงจีเลียวไมท์

1.3) ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที

1.4) นำผงจีเลียวไมท์ที่แช่ไว้มาล้างออกด้วยน้ำสะอาดที่อุณหภูมิปกติจนมีค่า pH เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบ BINDER รุ่น 08-34496 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

2. การปรับปรุงผิวผงซีลี้อยไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine และ γ -aminopropyl trimethoxysilane (Z-6011)

2.1) เตรียมผงซีลี้อยไม้ทั้งที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และผงซีลี้อยไม้ที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุง

2.2) ทำการเตรียมสารคู่ควบไซเลน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิดในปริมาณ 1.0 % โดยน้ำหนักผงซีลี้อยไม้

2.3) นำสารคู่ควบไซเลนดังกล่าวหยดลงในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่มีกรดอะซิติกละลายอยู่ 1.0 % โดยน้ำหนัก และในระหว่างที่ทำการหยดสารคู่ควบไซเลน ก็จะทำการคนสารละลายอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งสารคู่ควบไซเลนถูกหยดจนหมดและสารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งกรดอะซิติกจะช่วยทำให้ไซเลนแตกตัวเป็นไซลานอลได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นกวนสารละลายด้วยแท่งแก้วเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.4) นำสารละลายไซเลนที่เตรียมไว้มาพ่นลงบนผิวของผงซีลี้อยไม้ที่ผ่านการอบแล้ว ทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง จากนั้นก็นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3. นำผงซีลี้อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทั้งหมดมาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

4. การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนต/ผงซีลี้อยไม้

4.1) นำพอลิคาร์บอเนตไปอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100°C

4.2) ผสมพลาสติกพอลิคาร์บอเนตกับพลาสติกไซเซอร คือ diisononyl phthalate เพื่อช่วยในการลดอุณหภูมิขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต จากนั้นนำไปผสมกับ ผงซีลี้อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ในอัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต และทำการผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High-speed internal mixer)

4.3) นำสารผสมที่ได้มาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ ด้วยวิธี Injection molding สำหรับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบสมบัติเชิงกล และ Compression molding สำหรับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบสมบัติการนำความร้อน

5. การทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

5.1) การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

- การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ในการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของชิ้นงาน (Tensile properties) จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

- การทดสอบการทนต่อการโค้งงอ (Flexural Test) การทดสอบสมบัติการโค้งงอ (Flexural properties) เป็นการทดสอบการต้านการโค้งงอของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกด 3 จุด (Three point bending) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมตามมาตรฐาน ASTM D790 (1999) ข้อมูลที่ได้จะรายงานในรูปของค่ามอดุลัสความต้านการโค้งงอ (Flexural modulus) และค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (Flexural strength)

- การทดสอบความทนทานต่อการกระแทก (Impact Test) การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ จะใช้การทดสอบแบบ Notched izod impact test ตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งวิธีดังกล่าวจะมีการทำรอยบากที่ชิ้นงาน โดยทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact tester)

5.2) การศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต

- การทดสอบ Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature; T_d)

- การทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) จะทำการทดสอบตาม ASTM C177 เพื่อดูผลของผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อค่าการนำความร้อน

5.3) ทดสอบสัณฐานวิทยา

- การทดสอบด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) โดยการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ได้จากคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงขี้เลื่อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วเพื่อวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของผงขี้เลื่อยไม้และการยึดเกาะระหว่างเฟส สัณฐานวิทยา (Morphology) ของวัสดุเชิงประกอบจะทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ด้วยการใช้พลังงาน 15 keV ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า โดยชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบจะเป็นชิ้นงานที่มีการแตกหักจากการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

1. จากการทดลองในตอนต้นที่ 1 นำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์หาชนิดของสารคู่ควบที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้
2. ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 จากข้อ 1 – 5 (ยกเว้นข้อ 3) โดยการปรับเปลี่ยนขั้นตอนในส่วนของการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน โดยเลือกสารคู่ควบไซเลนชนิดที่เหมาะสมที่สุด (ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ในข้อที่ 1 ของตอนที่ 2) โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้เป็น 0 %, 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% โดยน้ำหนักผงไม้

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณผงไม้ต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

1. การปรับปรุงผิวผงไม้โดยใช้สารคู่ควบไซเลน
 - 1.1) ทำความสะอาดผงไม้ด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิ 50°C โดยแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบ BINDER รุ่น 08-34496 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น
 - 1.2) ทำการเตรียมสารคู่ควบไซเลนชนิดที่เหมาะสมที่สุดในสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด (จากการทดลองส่วนที่ 1)
 - 1.3) นำสารคู่ควบไซเลนดังกล่าวหยดลงในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่มีกรดอะซิติกละลายอยู่ 1.0 % โดยน้ำหนัก และในระหว่างที่ทำการหยดไซเลนก็จะทำการคนสารละลายอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งไซเลนถูกหยดจนหมดและสารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งกรดอะซิติกจะช่วยให้ไซเลนแตกตัวเป็นไซลันอลได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นกวนสารละลายด้วยแท่งแก้วเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
 - 1.4) นำสารละลายไซเลนที่เตรียมไว้มาพ่นลงบนผิวของผงไม้ที่ผ่านการอบแล้ว ทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง
2. การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนต/ผงไม้
 - 2.1) นำพอลิคาร์บอเนตไปอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80°C
 - 2.2) ผสมพลาสติคพอลิคาร์บอเนตกับ diisononyl phthalate ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต จากนั้นนำไปผสมกับผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวจากส่วนที่ 2 ข้อที่ 1 ในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 % โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต ด้วยเครื่องปั่น

ผสมความเร็วสูง (High-speed internal mixer)

2.3) นำสารผสมที่ได้มาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ ด้วยวิธี Injection molding สำหรับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบสมบัติเชิงกล และ Compression molding สำหรับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบสมบัติการนำความร้อน

3. ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตที่ได้ ด้วยวิธีเดียวกันกับข้อที่ 1.5 ของการทดลองส่วนที่ 1 ตอนที่ 1

ส่วนที่ 3 ผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

1. การปรับปรุงผิวผงซีล้อยไม้โดยการใช้สารกึ่งควบไซเลน โดยทำการทดลองเหมือนข้อที่ 1 จากการทดลองส่วนที่ 2

2. การขึ้นรูปโฟมคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนต/ผงซีล้อยไม้

2.1) นำพอลิคาร์บอเนตไปอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80°C

2.2) ผสมพลาสติกพอลิคาร์บอเนตกับ diisononyl phthalate ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต จากนั้นนำไปผสมกับผงซีล้อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจากข้อที่ 1 โดยเลือกอัตราส่วนของผงซีล้อยไม้ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในส่วนที่ 2 และสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) 2 ชนิด คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole โดยทำการผสมในสัดส่วน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ส่วนจาก 100 ส่วนของปริมาณพอลิคาร์บอเนต ด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High-speed internal mixer)

2.3) นำสารผสมที่ได้ มาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี Compression molding สำหรับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบสมบัติเชิงกล และสำหรับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบสมบัติการนำความร้อน

3. ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตที่ได้ ด้วยวิธีเดียวกันกับข้อที่ 5 ของการทดลองส่วนที่ 1 ตอนที่ 1 ยกเว้นการทดสอบแรงดึงและการทนต่อการโค้งงอ แต่จะเพิ่มการทดสอบสมบัติ hardness เข้าไปแทน

1.4.5 ประมวลผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

1.4.5 รายงานผลการวิจัย

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เจริญนโยบาย เจริญสาธารณะและการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์

สามารถผลิตโฟมคอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความสามารถในการนำความร้อนที่น้อย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการทำเป็นฉนวนความร้อนที่มีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในบ้านหรือตัวอาคารให้ลดลงได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) [2]

พอลิคาร์บอเนตเตรียมได้ครั้งแรกโดย Einhorn ในปี 1898 โดยปฏิกิริยาของฟอสจีน (phosgene) ไฮโดรควิโนน และ รีซอร์ซินอล (resorcinol) ได้ไฮโดควิโนน พอลิคาร์บอเนตไม่หลอมไม่ละลาย มีความเป็นผลึก และได้รีซอร์ซินอลพอลิเมอร์เป็นอสัณฐาน มีจุดหลอมเหลว 200°C ปี 1930 แคลโรเตอร์กับแนตตา เตรียมอะลิฟาติกพอลิคาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ได้พอลิเมอร์มีจุดหลอมเหลวต่ำถูกไฮโดรไลซ์ง่าย ต่อมาปี 1956 บริษัท Farbenfabriken Bayer ได้ลองใช้สารประกอบอะโรมาติก เพื่อทำให้ได้แบบพอลิเอธิลีนเทเรฟธอเลต โดยใช้ bisphenol A ทำปฏิกิริยากับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอนิกได้พอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทนความร้อน และไม่ถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่าย ปี 1959 จึงได้เริ่มผลิตทางการค้าในประเทศเยอรมันและสหรัฐอเมริกา

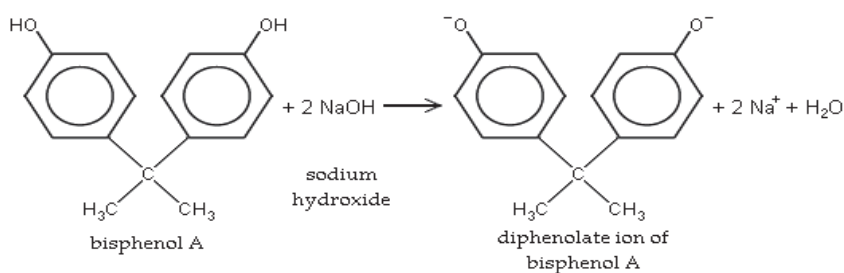
โดยที่ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบพอลิไฮดรอกซีกับกรดพอลิเบซิก จะเกิดการควบแน่นได้พอลิเอสเทอร์ ($-\text{COO}-$) แต่ในปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบพอลิไฮดรอกซีกับอนุพันธ์ของกรดคาร์บอนิก (carbonic acid) จะได้พอลิคาร์บอเนต ซึ่งมีหมู่คาร์บอเนต ($-\text{O}-(\text{C}=\text{O})-\text{O}-$) จึงอาจจัดไว้กลุ่มเดียวกับพอลิเอสเทอร์ได้ และเป็นเทอร์โมพลาสติกได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีสมัยใหม่

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติที่แข็งแรง โปร่งแสง เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ไม่ติดไฟแต่จะทำให้ไฟดับ ทนความร้อนได้สูงจึงใช้แทนกระจกได้เป็นอย่างดี ความแข็งแรงคงที่จนอุณหภูมิถึง 140°C ความเหนียวก็คงที่จนอุณหภูมิถึง 140°C เช่นกัน อุณหภูมิ T_g ประมาณ 145°C กรณีที่ใช้สารตั้งต้นบริสุทธิ์มาก จะได้พอลิเมอร์ใสเหมือนน้ำ แต่ถ้าสารตั้งต้นบริสุทธิ์น้อยลงจะได้พอลิเมอร์สีออกเหลืองๆ ทนต่อแรงดึงประมาณ $8000-10500 \text{ lb/in}^2$ พอลิเมอร์ตัวนี้ไม่ค่อยละลายในตัวทำละลายทั่วไป แม้จะมีค่าพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกันก็ตาม ก็จะละลายได้เฉพาะ อสัณฐานเท่านั้น จึงสามารถแยกส่วนที่เป็นผลึกออกมาได้ อย่างไรก็ดีมีตัวทำละลายที่ละลายได้อยู่บ้าง เช่น

คลอโรฟอร์ม, cis-1,2-dichloroethylene, methylene chloride, 1,1,2-trichloroethane, และ 1,1,1,2-dichloroethylene พวกอะซีโตน เบนซีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ จะทำให้พอลิเมอร์นี้พองตัวได้แต่ไม่ละลาย

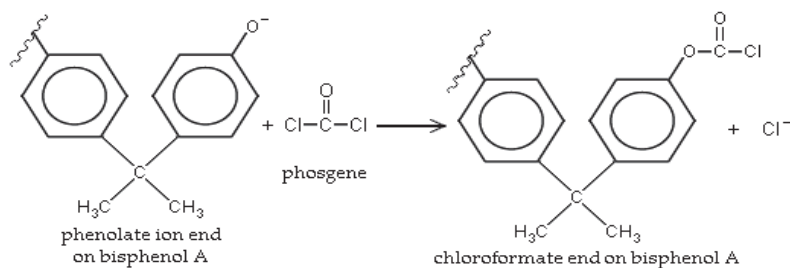
ลักษณะของเรซินมีทั้งเป็นเม็ดใส เป็นผง และเป็นแผ่น เหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เช่น การฉีดเข้าแม่พิมพ์ หรือเอกซ์ทรูชัน ใช้ทำคอมโพสิต กระจกเลนส์คอมโพสิตหน้าของรถยนต์ กระจกแว่นตาภาชนะและขวดพลาสติก ไม้พัดเรือ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

พอลิคาร์บอเนตสามารถสังเคราะห์ได้จาก bisphenol A และ phosgene (carbonyl dichloride, COCl_2) ขั้นตอนแรกในการสังเคราะห์พอลิคาร์บอเนตจาก bisphenol A คือการทำ treatment bisphenol A กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการ deprotonates hydroxyl groups ของโมเลกุล bisphenol A ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในภาพที่ 1



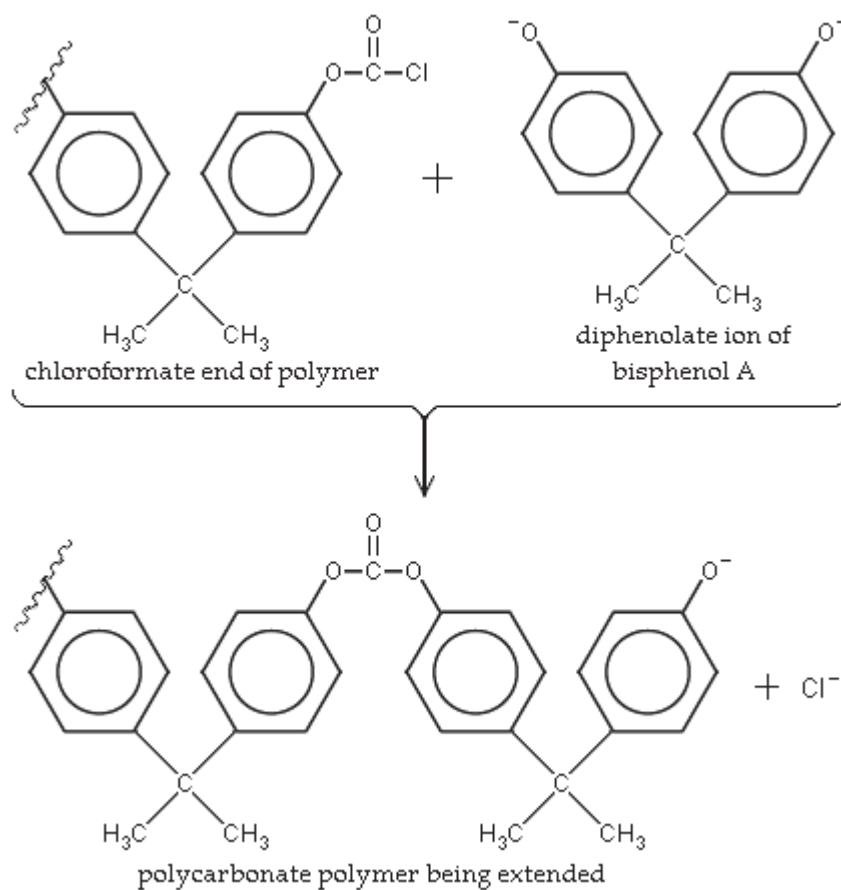
ภาพที่ 1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา deprotonates hydroxyl groups ของโมเลกุล bisphenol A [3]

ปฏิกิริยา deprotonated oxygen กับ phosgene โดยการเติม carbonyl ซึ่งทำให้เกิด tetrahedral intermediate หลังจากนั้นประจุลบที่ oxygen จะ form กับ chloride ion (Cl^-) เกิดเป็น chloroformate ดังแสดงในภาพที่ 2

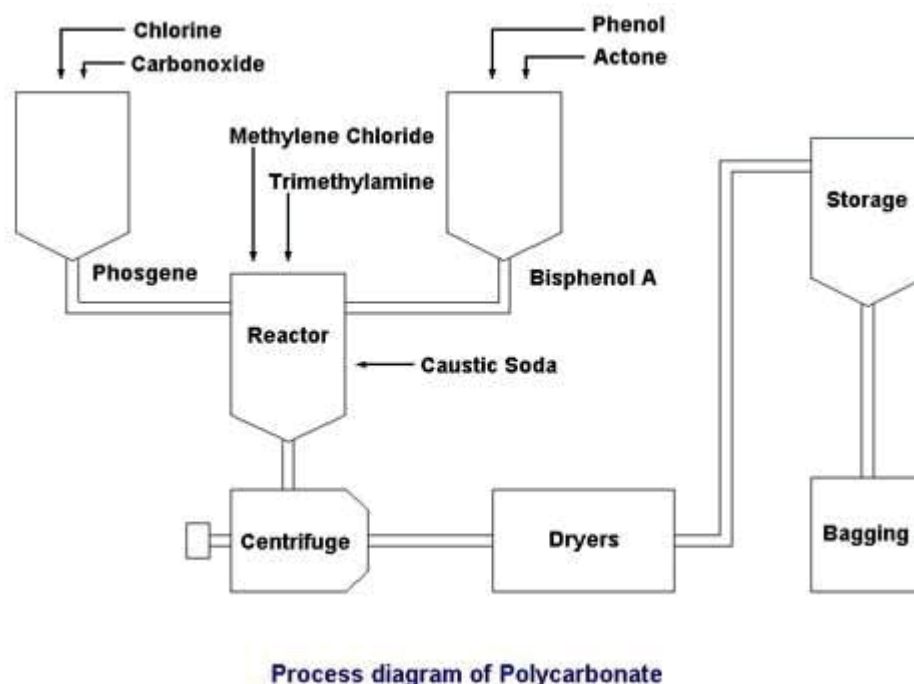


ภาพที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง deprotonated oxygen กับ phosgene [3]

chloroformate ถูก attacked โดยการ deprotonate bisphenol A การขจัด chloride ion และการเกิด dimer ของ bisphenol A เกิดในระหว่างการสร้าง carbonate linkage ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การ deprotonate bisphenol A การขจัด chloride ion และการเกิด dimer ของ bisphenol A [3]



ภาพที่ 4 แสดงแผนผังกระบวนการผลิตพอลิคาร์บอเนต [4]

2.1.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) [5, 6]

เส้นใยธรรมชาติ เป็นเส้นใยที่ได้จากพืช และสัตว์ จากรายงานวิจัย พบว่ามีการนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้เสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก เช่น เส้นใยปอ เส้นใยป่านศรนารายณ์ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยกล้วย เส้นใยสับปะรด และผงขี้เลื่อยไม้ เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (cellulose) ประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์และลิกนิน (lignin) ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ และที่เหลือเป็น เพคติน (pectin) ไขมัน (wax) และน้ำซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าว พบว่า มีส่วนของเซลลูโลสมากที่สุด

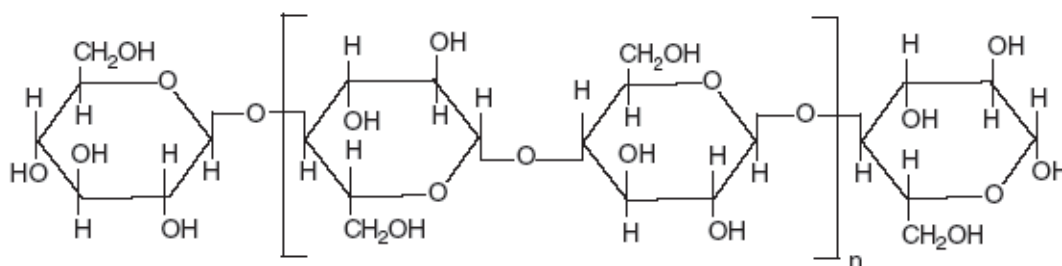
2.1.2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ไม้ยางพารา เส้นใยฝ้าย (Cotton) ปอกระเจา (Jute) ลินิน (Flax) ป่านลามิ (Ramie) และป่านศรนารายณ์ (Sisal) เป็นต้น มีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

1) เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) แสดงดังภาพที่ 5 เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซนแกม แทนนิน ไขมัน สาร

ที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด



ภาพที่ 5 โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose) [6]

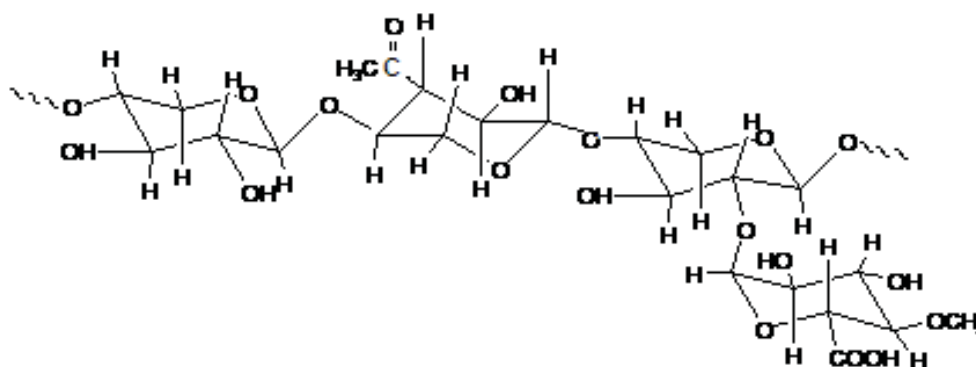
2) เฮมิเซลลูโลส [7]

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูโคนิก และกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกรบ ช้างข้าวโพด เสกโซแซน สัตว์ทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีลักษณะที่แตกต่างจากเซลลูโลส (Cellulose) 3 ประการดังนี้

- เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเซลลูโลส (cellulose) จะประกอบด้วย ดี-แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (D-anhydroglucopyranose) เท่านั้น
- เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีสายโซ่สาขาแต่เซลลูโลส (Cellulose) ประกอบด้วยสายโซ่ตรงเท่านั้น

- ขนาดโมเลกุลเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เล็กกว่า
เซลลูโลส (Cellulose) 10 - 100 เท่า



ภาพที่ 6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) [6]

3) ลิกนิน [7]

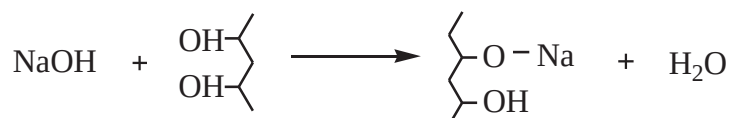
ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา

2.1.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ [8]

การยึดติดประสานที่ดีระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบ เมื่อพิจารณาเส้นใยไม้ซึ่งมีสภาพขั้วทางเคมี (hydrophilicity) สูง ดังนั้นการเข้ากันได้ระหว่างเฟสเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์จึงน้อยทำให้เส้นใยธรรมชาติไม่สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้สม่ำเสมอ ไม่ยึดเกาะกันระหว่างเฟส อีกทั้งเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถดูดซับน้ำได้ดี เนื่องจากมีส่วนของเซลลูโลส ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบอย่างมาก แนวทางที่สำคัญในการปรับปรุงสมบัติวัสดุเชิงประกอบให้ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการเตรียมผิวเส้นใยด้วยวิธีการปรับปรุงสมบัติผิวของเส้นใย (surface treatment) ตามวิธีการต่อไปนี้

1) การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Alkaline treatment, NaOH) การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อการปรับปรุงผิวของเส้นใยเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ววิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงผิวของเส้นใย โดยจะชะล้างสารพวกลิกนิน (lignin)

ไขมัน (wax) และสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulosic matters) ที่ผิวของเส้นใยออกไปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงตามภาพที่ 3 ในการปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้ ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมทริกซ์เกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Alkaline treatment, NaOH) [8]

2) การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน สารคู่ควบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ ไซเลน (Silane coupling agents) เนื่องจากไซเลนนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในพลาสติกเสริมแรง งานเคลือบผิว งานทาสี น้ำหมึก กาว สารยึดติด และยาง และมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี

2.1.3 ผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust)

อนุภาคผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust) เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่ง เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการแปรรูปไม้ โดยทั่วไปจะได้ขี้เลื่อย 10 ถึง 16 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อไม้ก่อนที่แปรรูป มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 40-80 ไมครอน (Mesh) ขี้เลื่อยไม้ประกอบด้วยเส้นใย 57.99 เปอร์เซ็นต์ ต่อเนื้อไม้แห้งและ ลิกนินประมาณ 41.24 เปอร์เซ็นต์ ต่อเนื้อไม้แห้ง การเริ่มเสถียรภาพ (Degradation temperature) ของผงขี้เลื่อยไม้จะขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผงขี้เลื่อยไม้ที่ใช้จะมีการเริ่มเสถียรภาพหรือสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220°C และ ณ อุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป (230-240°C) จะเกิดการสลายตัวไปประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของผงขี้เลื่อยไม้ ผงขี้เลื่อยไม้ส่วนใหญ่ที่ใช้งานอยู่ที่ขนาด 100-250 ไมครอน [9]

2.1.3.1 ข้อดี ข้อเสียของการนำผงขี้เลื่อยไม้มาใช้งานคอมพอสิต

ข้อดี [10]

1) ราคาถูก (Low cost) เนื่องจากผงขี้เลื่อยไม้จัดเป็นวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปไม้ ดังนั้นจึงมีราคาถูก ยิ่งเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นที่นิยมนำมาช่วยในการเสริมแรง เช่น ดินเหนียว เส้นใยแก้ว จึงช่วยลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์

2) มีน้ำหนักเบา (lighter weight) ผงขี้เลื่อยไม้จัดเป็นวัสดุที่มี

น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมแรง ทำให้คอมพอสิตที่ได้มีน้ำหนักที่เบากว่า ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ด้วย

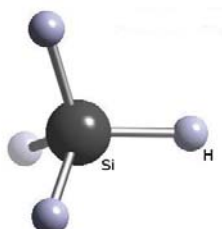
3) จัดเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตน้อยมาก และสามารถนำคอมพอสิตของผงขี้เถ้าไปรีไซเคิลใหม่ได้

4) ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของชิ้นงานขึ้นรูป นั่นคือช่วยลดการหดตัว (Shrinkage) ของพอลิเมอร์ เพิ่มค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มความแข็งแรง (Strength)

ข้อเสีย

- 1) ทำให้กระบวนการผลิตขึ้นรูปทำได้ยากขึ้น
- 2) ลดเสถียรภาพทางความร้อน
- 3) ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมไม่ดี
- 4) ลดความสามารถในการรับแรงกระแทก
- 5) ไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิสูงๆได้

2.1.4 ไซเลน (silane) [11]



ภาพที่ 8 แสดงลักษณะโครงสร้างของไซเลน [12]

สารประสานจะทำหน้าที่ในการทำให้ฟิลเลอร์หรือสารเสริมแรงกระจายตัวและยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี และสารประสานอาจจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวประสานหรือเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเสริมแรง โดยการมีพันธะที่แข็งแรงระหว่างสองเฟสจะทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น

ไซเลน เป็นสารเคมีประเภทหนึ่งที่มีสูตรทางเคมีคือ SiH_4 ดังแสดงในภาพที่ 8 มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ methane ที่อุณหภูมิห้องมันจะมีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ สามารถเกิดการแตกตัวและเผาไหม้เองได้เมื่ออยู่ในอากาศ โดยไม่จำเป็นต้องมีการจุดติดไฟจากภายนอก อย่างไรก็ตามมันก็ยังเป็นสารที่มีความเสถียร มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 88 K จุดเดือด 161 K

ธรรมชาติของไฮเลนที่ได้จากกระบวนการผลิตจะเป็นสารโมเลกุลใหญ่เนื่องจากมีสมบัติ pyrophoricity ที่อุณหภูมิสูงกว่า 420°C ไฮเลนจะเกิดการแตกตัวเป็น silicon และ hydrogen ไฮเลนและสารที่มี Si-H-bonds จะใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในทางเคมีอินทรีย์และโลหะเคมี

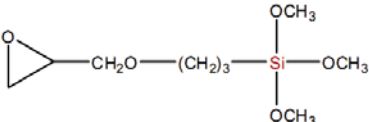
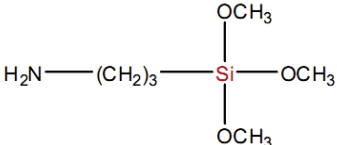
โดยทั่วไปไฮเลนจะเป็นซิลิกอนที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือน alkane ประกอบไปด้วยสายโซ่อะตอมของ silicon ที่ยึดเกาะด้วยพันธะโควาเลนต์กับอะตอมของ hydrogen สูตรทั่วไปของมันคือ $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ ไฮเลนจะมีความเสถียรน้อยกว่าสารประกอบของคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบเดียวกัน เนื่องจากพันธะ Si-Si bond มีความแข็งแรงค่อนข้างจะต่ำกว่า C-C bond ออกซิเจนจะทำให้เกิดการสลายตัวของไฮเลนได้โดยง่าย เพราะ Si-O bond เป็นพันธะที่ค่อนข้างจะแข็งแรง

การเรียกชื่อของไฮเลน โดยทั่วไปจะขึ้นต้นด้วย di, tri, tetra หรืออื่นๆ ตามจำนวนของอะตอม silicon ในโมเลกุล เช่น Si_2H_6 เรียกว่า disilane และ Si_3H_8 เรียกว่า trisilane เป็นต้น แต่ถ้ามีเพียงตัวเดียวไม่ต้องมีคำขึ้นต้น ไฮเลนสามารถเรียกชื่อได้เหมือนกับสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ระบบการเรียกชื่อแบบนี้จะเรียกไฮเลนว่า silicon tetrahydride อย่างไรก็ตามการเรียกชื่อแบบนี้จะยุ่งยาก ถ้าไฮเลนมีความยาวมาก

ไซโคลไฮเลน คือไฮเลนที่เป็นวงแหวน เช่นเดียวกับไซโคลอัลเคน นอกนั้นยังมีไฮเลนที่เป็นโซ่กิ่ง อนุมูลิสรเช่น $^{\bullet}\text{SiH}_3$ จะเรียกว่า silyl และ $^{\bullet}\text{Si}_2\text{H}_5$ จะเรียกว่า disilyl เป็นต้น Trisilane ที่มีหมู่ silyl เกาะอยู่ที่อะตอมของซิลิกอนตรงกลางจะเรียกว่า silyltrisilane จะเห็นว่าการเรียกชื่อจะมีหลักการเดียวกับ alkyl radical ไฮเลนสามารถรวมตัวกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้เหมือนอัลเคน เช่น รวมตัวกับหมู่ $-\text{OH}$ และเกิดเป็น silanol

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของสารประสานกลุ่มไฮเลน [13]

Functional group	Chemical name	Structural formula	Molecular weight
Vinylsilane	Vinyltrichlorosilane	$\text{CH}_2=\text{CHSiCl}_3$	161.5
	Vinyltris (βmethoxyethoxy) silane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3)_3$	280.4
	Vinyltriethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	190.3
	Vinyltrimethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$	148.2
Acryloxy	3-metacryloxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\ \\ \text{O} \end{array}$	248.4

Epoxysilane	β -(3,4 epoxycyclohexyl)-ethyltrimethoxysilane	 $C_2H_4Si(OCH_3)_3$	246.4
	3-glycidoxypropyl trimethoxysilane		220.34
Aminosilane	3-aminopropyl-triethoxysilane	$H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)_3$	221.4
	γ -aminopropyl trimethoxysilane		179.29
	N- β (aminoethyl)- <i>r</i> -aminopropyl-trimethoxysilane	$H_2NC_2H_4NHC_3H_6Si(OCH_3)_3$	222.4
Other	γ -mercaptopropyl-trimethoxysilane	$HSC_3H_6Si(OCH_3)_3$	196.4

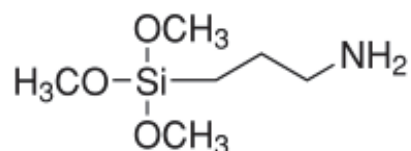
ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างของสารคู่ควบประเภทไฮเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่างๆ [13]

สารคู่ควบประเภทไฮเลน	ชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้
1. Vinyl-triethoxy silane 2. Vinyl-tris (2-methoxy) silane 3. 3-Metha acyloxypropyl trimethoxy silane	Unsaturated Polyesters, Pololefins, PVC, PS, ABS, SAN and PMMA
4. 3-Aminopropyltriethoxysilane	Epoxy, Phenolic and Melamine Resins, PA, PHR, PP, PE, PMMA and PC
5. 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane	Epoxy, Phenolic and Melamine Resins, Unsaturated Polyesters, PUR, PC, PS, ABS, SAN, PA, PP, PE and Polysulfides
6. 3-Mercaptopropytrimethoxysilane	Phenolic and Epoxy Resins, PVC, PS, EPPM, Polysulfones and Polysulfides

2.1.3.1 สารคู่ควบไซเลนชนิด γ -aminopropyl trimethoxysilane (Z-6011)

[14]

มีสูตรทั่วไปคือ $C_6H_{17}NO_3Si$

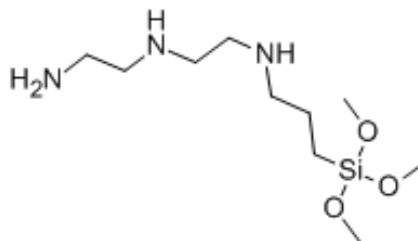


ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างของ Gamma-Aminopropyl trimethoxysilane [15]

Gamma-Aminopropyltriethoxysilane (Z-6011) ถูกนำมาใช้เป็น amino-functional coupling agent ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ inorganic และ organic polymers จากโครงสร้างจะเห็นว่ามีโมเลกุลของซิลิกอนอยู่ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงช่วยยึดเกาะกับพื้นผิววัสดุและมีหมู่ของ amine ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้กับวัสดุเทอร์โมเซต, เทอร์โมพลาสติก และอีลาสโตเมอร์

Z-6011 สามารถละลายในน้ำได้อย่างจับปล้น และยังสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์, อะโรมาติกและอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน การนำไปใช้งานสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก (เป็นส่วนประกอบในสายเคเบิล, เส้นใยแก้วเสริมแรงในพลาสติก) ยาง กาว สี หมึก โลหะบริสุทธิ์ และ resins concrete Z-6011 ทำให้คุณสมบัติทาง physical และ electrical ของ mineral-filled phenolics, epoxies, polyamides, polybutylene terephthalate และพวกวัสดุคอมพอสิตที่เป็นเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกอื่นๆจำนวนมาก ซึ่งเมื่อนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่ามีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้สามารถนำมาใช้ปรับปรุงการยึดเกาะและการกระจายตัวระหว่างผิวน้ำแข็งที่เป็น organic resins และ inorganic resins ซึ่งช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวและสมบัติทางแม่เหล็กดีเยี่ยม และยังทำให้ความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้นด้วย ในเทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว Z-6011 เป็นตัวที่ช่วยทำให้สมบัติการโค้งงอ, การอัดแน่น, tensile strength และ shear strengths เพิ่มขึ้น เมื่อนำ Z-6011 มาใช้เป็นตัวประสานในการเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วในเทอร์โมพลาสติก อาทิ polyamides, polyesters และ พอลิคาร์บอเนต ก่อนและหลังเมื่อได้รับความชื้น นอกจากนี้ยังทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Z-6011 ยังเป็น adhesion promoter ที่ดีเยี่ยมใน urethane, epoxy และ acrylic latex coating, adhesives และ sealants

2.1.3.2 N^1 -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine [16]



ภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างของ N^1 -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine [16]

N^1 -(3-Trimethoxysilylpropyl)diethylenetriamine หรือในชื่อเรียกอื่นๆ เช่น 3-[2-(2-Aminoethylamino)ethylamino]propyltrimethoxysilane, n-(2-aminoethyl)-n'-[3-(trimethoxysilyl)propyl]-2-ethanediamine, N-(2-aminoethyl)-N'-[3-(trimethoxysilyl)propyl]-1 เป็นสารคู่ควบไซเลนที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสีจนถึงสีเหลืองเข้ม มีจุดเดือดอยู่ที่ 114-118°C มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.03 g/mL ณ อุณหภูมิ 25°C โดยมีจุดวาบไฟอยู่ที่ประมาณ 125°C

2.1.4 โฟมพลาสติก (Plastic foams) [17]

โฟม หรือ โฟมพลาสติก (Plastic foams) หมายถึงวัสดุที่มีโพรงเล็กๆ (Cellular materials) ติดต่อกันมากมายกระจายในเนื้อพลาสติก โดยเกิดจากกระบวนการใช้สารช่วยพองตัว (blowing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติก ซึ่งในปัจจุบันใช้เพนเทน (Pentane) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) โฟมมีทั้งชนิดแข็ง (rigid foam) แข็งปานกลาง (semirigid foam) และยืดหยุ่น (flexible foam)

โฟมพลาสติก เป็นวัสดุที่นับวันจะได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายง่ายและนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางหลากหลายลักษณะ เช่น กล่องใส่อาหาร ถ้วยขนมหวาน นอกจากนี้ยังใช้เป็นแผ่นรองกันกระแทกในภาชนะบรรจุภัณฑ์ แผ่นหรือฉนวนกันความร้อน และเป็นส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

โดยทั่วไปโฟมจะมีขนาดของเซลล์ 0.05 – 1 มิลลิเมตร โฟมพลาสติกอาจมีขนาดของเซลล์มากกว่า 1 มิลลิเมตร เช่น Thermoset modified PVC foams

โดยทั่วไปโฟมแข็งจะเป็นเซลล์ปิด มักใช้แทนไม้เพื่อทำเฟอร์นิเจอร์เครื่องใช้ในงานอุตสาหกรรม ส่วนโฟมยืดหยุ่นจะเป็นเซลล์เปิด อากาศสามารถหนีออกมาได้เมื่อถูกกดและคืน

รูปได้เร็วเมื่อไม่มีแรงกด จึงนิยมทำเป็นเบาะรองนั่ง

2.1.4.1 ประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset foam) เป็นโฟมพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ที่รู้จักกันดีได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน (PU foam)

2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) เป็นโฟมพลาสติกที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ เช่น โฟมพอลิสไตรีน (Expandable Polystyrene Foams: EPS foams) โฟมพอลิเอทิลีน (Expandable Polyethylene Foams: EPE foams) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งชนิดของโฟมออกจากเกณฑ์อื่นๆ เช่น โครงสร้างในเซลล์ของโฟม, ความแข็งแรงของโฟม และวิธีการผลิต

2.1.4.2 ประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ [18]

1) เซลล์ปิด หมายถึง โฟมที่มีโครงของ Cell ไม่ต่อเนื่องกัน ถูกแยกกันด้วยผนังเซลล์หรือ membrane ซึ่งชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในเซลล์ขึ้นอยู่กับชนิดของ foaming agent

2) เซลล์เปิด หมายถึง โฟมที่มีโครงของเซลล์ต่อกัน ทำให้แก๊สสามารถหมุนเวียนถึงกันได้

3) เซลล์ผสม หมายถึง โฟมที่มีทั้ง 2 ชนิดอยู่ในโครงสร้างของโฟม โดยโครงสร้างของเซลล์จะส่งผลต่อสมบัติของโฟมอย่างมาก

2.1.4.3 ประเภทโฟมตามความแข็ง

1) แบบต้านทานต่อการเสียรูปมาก ยืดหยุ่นได้น้อย เช่น PS, PVC (ไม่เติม plasticizer), PUR, UF, PF, UP, EP, PIR, PMI

2) แบบต้านทานการเปลี่ยนรูปได้น้อยแต่ยืดหยุ่นได้ดี เช่น PUR (อ่อน), PVC (อ่อน)

2.1.5 ฉนวนโฟม [19]

ฉนวนโฟมมีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารประกอบทางเคมีที่นำมาใช้ รูปแบบที่นำมาใช้มีทั้งแบบพ่น และแบบสำเร็จรูปใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร น้ำหนักเบาไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้าง และไม่เปื้อนมลภาวะหรือเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถป้องกันความร้อนได้ดี มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงโดยเฉพาะแบบฉีดพ่นเพราะจะเข้ากับส่วนของอาคารก็ได้ และประหยัดเวลาในการติดตั้ง โดยชนิดของฉนวนโฟมที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

2.1.5.1 ฉนวนพอลิสไตรีนโฟม (Polystyrene, PS – Foam) จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด มี 2 ลักษณะ คือ

1) ฉนวนพอลิสไตรีนแบบอัดรีด (Extruded Polystyrene) ผลิตโดยขบวนการอัดรีด ทำให้มีเซลล์ที่ละเอียดซึ่งมีอากาศผสมกับก๊าซฟลูออโรคาร์บอน (ปัจจุบันมีการใช้ก๊าซประเภทอื่นเพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เรือนกระจก) อยู่ภายใน ทำให้มีสภาพในการนำความร้อนที่ต่ำกว่าพอลิสไตรีนแบบหล่อ มีโครงสร้างและรูปร่างที่แข็งแรงคงที่มากกว่า ทำให้สามารถทนต่อแรงกดทับได้ดี และต้านทานไอน้ำได้ดี แต่ข้อเสียคือ ติดไฟได้ และหากสัมผัสกับรังสี UV ในบรรยากาศจะมีการเสื่อมสภาพได้ จึงควรมีวัสดุปิดผิวในการใช้งาน ปัจจุบันยังคงต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงมีราคาค่อนข้างสูง

2) ฉนวนพอลิสไตรีนแบบหล่อหรือขยายตัว (Molded or Expanded Polystyrene) เป็นสไตรีนพอลิเมอร์เช่นกัน แต่ผลิตโดยขบวนการหล่อหรือขยายตัว ผลก็คือเซลล์จะหยาบกว่า และมีอากาศบรรจุอยู่ภายใน เมื่อเทียบกับแบบอัดรีดแล้วจะมีสภาพการนำความร้อนสูงกว่า ความหนาแน่นต่ำกว่า ด้านทานไอน้ำได้พอใช้ ติดไฟและก่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แต่มีราคาถูกกว่า มีการเสื่อมสภาพจากการสัมผัสรังสี UV ในบรรยากาศได้เช่นกัน จึงควรเลือกใช้ในโครงสร้างปิดหรือมีแผ่นปิดผิว โดยมีการขึ้นรูปประกอบเป็นผนังมีแผ่นปิด 2 ด้านเพื่อป้องกัน UV และใช้งานได้สะดวก ปัจจุบันมีการผลิตจำหน่ายในประเทศไทยแล้ว

2.1.5.2 ฉนวนพอลิยูเรเทนโฟม (Polyurethane, PU – Foam) เป็นพอลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่ทำให้เกิดเป็นโฟมมีลักษณะแข็ง อาทิ การพ่นเพื่อป้องกันความร้อน ได้หลังคา จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด เซลล์ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าการนำความร้อน(k) ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามการนำความร้อนของฉนวนประเภทนี้จะเพิ่มขึ้นหรือ R-Value จะลดลงตามอายุการใช้งาน เนื่องมาจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์ โดยเฉพาะกรณีสัมผัสกับรังสี UV จะทำให้สีของฉนวนเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเสื่อมสภาพลง โดยเฉพาะโฟมที่ไม่ได้ปิดผิว การดูดซับน้ำจะมีบ้างเนื่องจากไม่ใช้เซลล์ปิดทั้งหมด และในกรณีเกิดเพลิงไหม้แม้ว่าจะมีการผสมสารป้องกันการติดไฟแล้ว แต่ก็ยังก่อให้เกิดก๊าซที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์ซึ่งเป็นอันตราย เมื่อฉนวนมีการขยายและหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากใช้โครงสร้างปิด เช่น ผนังห้องเย็น หรือ มีวัสดุปิดผิวที่แข็งแรงพอก็จะเป็นฉนวนที่ดีมาก

2.1.5.3 ฉนวนพอลิเอทเธลีนโฟม (Polyethelene, PE – Foam) เป็นพอลิเอทเธลีนรีดขึ้นรูปเป็นแผ่นมีฟองละเอียดของก๊าซอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มของฉนวนแบบเซลล์

ปิด มีลักษณะอ่อนนุ่ม จึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ การต้านทานไอน้ำอยู่ในเกณฑ์สูง มีการเสื่อมสภาพได้จากรังสี UV จึงควรมีแผ่นปิดผิวขณะใช้งานหรือไม่สัมผัสกับ UV โดยตรง การเลือกใช้งานป้องกันความร้อนในระบบหลังคาในประเทศไทย ต้องพิจารณาความหนาของฉนวน ให้มี R-Value ที่เพียงพอคือมีความหนาไม่น้อยกว่า 40 มม. ที่ใช้ได้แผ่นหลังคา ซึ่งความหนาดังกล่าวจะต้านทานการไหลผ่านของพลังงานความร้อนได้น้อย และเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์พลาสติกประเภทหนึ่งจึงก่อให้เกิดควันปริมาณมาก และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นอันตรายเมื่อเกิดเพลิงไหม้

2.1.6 การผลิตโฟม [18]

โฟมพลาสติกประกอบด้วยโครงสร้างของเซลล์ซึ่งได้จากการใช้สารเร่งการเกิดโฟม ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนถึงจุดหนึ่งจะเกิดก๊าซจากการเกิดปฏิกิริยาหรือการสลายตัวของสารนั้นๆ ทำให้พลาสติกพองขึ้นเป็นฟองและขยายจนเต็มแม่พิมพ์ ทำให้โฟมที่ได้จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าเมื่อเป็นชิ้นงานพลาสติก ดังนั้นพลาสติกที่จะเป็นโฟมได้ต้องเป็นพลาสติกที่สามารถลดความหนาแน่นได้ โดยพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้แบ่งเป็น 3 กลุ่มได้แก่

- 1) กลุ่มที่สามารถใช้สารเร่งการเกิดโฟมให้เป็นโฟมได้ เช่น PS
- 2) กลุ่มที่ต้องผ่านการหลอมเหลวแล้วจึงทำให้เกิดฟอง เช่น PS, PE, PVC
- 3) กลุ่มสารเริ่มต้นเป็นของเหลวแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อกลายเป็น

โฟม เช่น PUR, PF, UF

สารที่เร่งการเกิดโฟม (Blowing agent หรือ Foaming agent) แบ่งออกเป็นสารที่ให้ผลทางเคมี (Chemical blowing agent) และทางกายภาพ (Physical blowing agent) นอกจากนี้ยังต้องมีการเติมสารอื่นๆ เช่น Stabilizer ลงไปเพื่อป้องกันการสลายตัวของโฟมหลังจากพองออกแล้ว ส่วน Nucleating agent จะเติมลงไปเพื่อเป็นตัวก่อให้เกิดโครงสร้างเซลล์ของโฟมขึ้น นอกจากนี้ยังมีพลาสติกเหลว เช่น PVC ที่สามารถขึ้นรูปด้วยการใช้อากาศได้ แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก

2.1.6.1 ก๊าซที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟม

ในโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำถึงปานกลางก๊าซจะครอบคลุมปริมาตรส่วนมากของโฟม ดังนั้นจึงมีผลต่อการควบคุมสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความสามารถในการนำไฟฟ้า และการนำความร้อน โดยหากเป็นก๊าซที่มีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้โฟมที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ และได้เป็นโฟมเซลล์ปิด มีน้ำหนักเบา และยังส่งผลต่อการลอยตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ ก๊าซยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างมาก โดยสำหรับโฟมแบบเซลล์ปิดและมีการเสีรูปร่างเชิงกลจะทำให้ก๊าซเกิดการกระจายความแข็งแรงออกไปยังรอบๆ ด้าน แต่

สำหรับโฟมเปิดจะทำให้ก๊าซบริเวณนั้นไหลออกไปด้านข้าง เมื่อมีการคืนรูปจึงไหลกลับเข้ามาดังเดิมทำให้โฟมที่ได้มีความอ่อนนุ่ม และยืดหยุ่น และคืนตัวได้ดีกว่าแบบปิด

2.1.6.2 ทฤษฎีการเกิดโฟม [20]

ระบบที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โฟมขึ้นอยู่กับ 3 ขั้นตอน ได้แก่

1) Bubble formation เป็นขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซขึ้นในพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งการเกิดฟองก๊าซในระบบของเหลวนั้นค่า free energy (ΔF) ของระบบจำเป็นต้องมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 1

$$\Delta F = \gamma A \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ γ คือค่าของแรงตึงผิวของของเหลว และ A คือพื้นที่ของผิวสัมผัสทั้งหมด จากสมการแสดงให้เห็นว่าถ้าของเหลวมีค่าแรงตึงผิวต่ำจะทำให้เกิดฟองอากาศง่ายขึ้น ซึ่งการเติม nucleating agent นั้นจะเป็นการลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลว หรืออาจไปเกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสทำให้สามารถเกิดฟองก๊าซได้ง่ายขึ้น

ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเกิด nucleation ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้ความเรียบของผิว nucleating agent, ขนาด(พื้นที่ผิว) ของ nucleating agent, ชนิดของ nucleating agent, ปริมาณของ nucleating agent ยังมีผลอีกด้วย

2) Bubble growth เป็นขั้นตอนการเติบโตของฟองก๊าซและเริ่มเกิดการเสถียร โดยเมื่อความดันของพอลิเมอร์ หลอมเหลวลดลงทำให้โอกาสในการเกิดฟองก๊าซขึ้นใหม่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงแพร่เข้าไปในฟอง ก๊าซให้ฟองเกิดการขยายตัว เริ่มแรกฟอง ก๊าซจะมีลักษณะเป็นทรงกลมต่อมาจะถูกขยายตัวเนื่องจากผลต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอก cell ที่สมดุลความดันภายในจะมากกว่าภายนอกฟองก๊าซผลต่างของความดันที่สมดุลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ γ คือ ค่าแรงตึงผิว และ R คือรัศมีของฟองก๊าซซึ่งค่าความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกก๊าซขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าฟองขนาดใหญ่

ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กมีแนวโน้มจะลดความแตกต่างของความดันโดยการขยายขนาดอย่างรวดเร็วทั้งจากการไปรวมตัวกับฟองอื่น และการแพร่ของก๊าซจากพอลิเมอร์ ระบบที่มีเซลล์ขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวของเซลล์ที่สม่ำเสมอ เกิดได้เมื่อระบบมีแรงตึงผิวต่ำ ทำให้โฟมมีความเสถียร และมีความหนาแน่นสูง แต่ถ้าฟองยังคงขยายจะทำให้ความหนาแน่นลดลง

3) Bubble stabilization เป็นขั้นตอนที่ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดความเสถียร เป็นขั้นตอนที่เฟสของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งผ่านกระบวนการ crosslink หรือการ cooling จนเย็นตัวทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอ่อนตัวเพื่อป้องกันการเกิดการไหลของพอลิเมอร์ ทำให้โฟมกลายเป็นของแข็งคงรูปเกิดความเสถียร

2.1.6.3 Nucleating agent สำหรับโฟม [21]

ขั้นตอนแรกในการเกิดฟองก๊าซขึ้นในระบบของเหลว ถ้าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จะเรียกว่า self nucleation แต่ส่วนมากจำเป็นต้องมีการเติมอนุภาคของแข็ง ขนาดเล็กเช่น talc หรือ silica ลงไปในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็น nucleating agent เพื่อควบคุมขนาด และการกระจายตัวของเซลล์ แต่ในกระบวนการที่ไม่มีการเติม nucleating agent เฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองก๊าซสามารถโตต่อไปได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการเกิดฟองขึ้นใหม่

2.1.6.4 ขนาดของเซลล์ โฟม [22]

ขนาดและการกระจายตัวของเซลล์จะมีความแตกต่างกันมากในโฟมต่างชนิดกัน

1) สมบัติของเซลล์โฟมขนาดใหญ่

- Modulus, Shock absorb และ Stiffness โดยขึ้นอยู่กับความหนาของ cell wall
- การเกิดการโค้งงอในระหว่างการอัด
- เป็นฉนวนความร้อนที่ดีเนื่องจากเซลล์ขนาดใหญ่จึงอาศัยการพาความร้อนและการแผ่รังสีแทนการนำความร้อน
- ความสามารถในการซึมผ่านขึ้นอยู่กับแก๊สที่ซึมผ่านผนังเซลล์ได้อย่างอิสระ

2) สมบัติของเซลล์โฟมขนาดเล็ก

- มีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากมีผนังเซลล์มากขึ้น
- ยึดออกได้มากขึ้น

- เกิด defect ที่ละน้อยระหว่างการอัด
- เป็นฉนวนความร้อนที่ดี

2.1.6.5 ความหนาแน่นของโฟม

เนื่องจากความหนาแน่นสามารถใช้ระบุปริมาณสารสัมพันธ์ของพอลิเมอร์และก๊าซรวมทั้งความสม่ำเสมอของโฟมที่เกิดซึ่งส่งผลต่อสมบัติได้ ในทางปฏิบัตินั้นควรผลิตให้โฟมมีความแตกต่างของความหนาแน่นในแต่ละบริเวณน้อยเพื่อให้สมบัติของโฟมที่ได้มีความสม่ำเสมอ สำหรับโฟมที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อ

- Modulus สำหรับพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง
- ความแข็งแรงในพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็ง
- Yield at break ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุและแปรผกผันกับ gas-bubbles flaw ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดการแตกหักได้

- Shock absorber ของทั้งแบบ close cell และ open cell
- ความเสถียรของขนาดโฟมทางความร้อน ซึ่งความร้อนจะมีผลต่อการขยายตัวหดตัวของโฟม และมีผลมากต่อโฟมแบบ close cell และยังขึ้นกับการซึมผ่านของก๊าซที่ผ่านผิวโฟมได้

- ความเป็นฉนวนความร้อน และฉนวนไฟฟ้า
- การซึมผ่าน
- การดูดซับน้ำ

2.1.6.6 อัตราส่วนระหว่างเซลล์เปิดและเซลล์ปิด เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของโฟมอย่างมาก โดยที่

- 1) ปริมาณเซลล์เปิดมากจะส่งผลต่อ
 - ความอ่อนนุ่ม ความยืดหยุ่น การรองรับน้ำหนัก
 - การกระด้างกระดอนและการคืนตัว
 - สมบัติเชิงกล
 - การดูดกลืนเสียงและความเป็นฉนวน
 - การนำความร้อน
 - การดูดซับน้ำ
 - การซึมผ่าน
- 2) ปริมาณของเซลล์ปิดมากจะส่งผลต่อ

- การลอยตัว
- ความแข็งแรงและความแข็งแกร่ง
- Compressive set, creep, hysteresis
- ความเป็นฉนวนทางความร้อน
- การหดตัวระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโฟม

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดปริมาณอัตราส่วนของเซลล์ทั้ง 2 ชนิด ให้มีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้โฟมมีสมบัติที่ต้องการ

2.1.7 Blowing agent หรือ Foaming agent [20]

สารทำให้เกิดฟอง หรือ ที่มักเรียกกันว่า foaming agent หรือ blowing Agents คือสารที่ทำให้พลาสติกมีโครงสร้างแบบโฟม โดย foaming agent หรือ blowing Agents นั้นสามารถเป็นได้ทั้งก๊าซหรือสารเคมีที่จะเกิดการสลายตัวในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต โดยการที่เกิดจากสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 แบบ จะกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ความดันในกระบวนการผลิต เมื่อความดันของกระบวนการลดลงก๊าซจะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดโครงสร้างแบบเซลล์ขึ้นในพลาสติก โดยปกติจะสามารถแบ่ง foaming agent หรือ blowing Agents ได้ออกเป็น 2 แบบ คือ Physical foaming agents และ Chemical foaming agents [12]

2.1.7.1 Chemical foaming agents (CFAs)

Chemical foaming agents คือสารประกอบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนแล้วปลดปล่อยก๊าซออกมา ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) การเกิดปฏิกิริยากับ CFAs ด้วยกันเองหรือเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ CFAs ที่ใช้กันส่วนมากจะอยู่ในรูปของแข็ง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- 1) Exothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี
- 2) Endothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่จะดูดความร้อนเข้าไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

โดย Chemical foaming agent ทั้ง 2 ประเภท สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

- สารประกอบที่เกิดก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับได้ โดยสารเร่งการเกิดโฟมทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ สารประกอบพวก Ammonium salts ของกรดอินทรีย์และกรดอินทรีย์ และสารประกอบของ Bicarbonate หรือ Carbonate ของโลหะหมู่ I และ II โดยมีการสลายตัวตามสมการ



โดยที่ G คือ ก๊าซผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวทางความร้อน แต่เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้จึงอาจทำให้ปริมาณก๊าซลดลงและเกิดการหดตัวของวัสดุได้

- สารประกอบที่เกิดก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว ทางความร้อนที่ผันกลับไม่ได้ เช่น สารประกอบของ aromatic, aliphatic-aromatic, aliphatic-azo, diazo, diazoamide ฯลฯ ซึ่งจะเกิดการ สลายตัวที่อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเร่งการเกิดโฟมทางเคมีชนิดนั้นๆ โดยมีสลายตัวตามสมการ



ส่วนมากก๊าซ ที่ได้จะเป็น N_2 , CO_2 , NH_3 มักจะเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้

- สารเร่งการเกิดโฟมที่อยู่ในรูปของสารผสม ซึ่งจะปลดปล่อยก๊าซออกมา เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของแต่ละองค์ประกอบ และเกิดก๊าซขึ้น ตามสมการ



สารทำให้เกิดฟอง มักถูกนำไปใช้ในพลาสติกด้วยวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนาแน่น หรือความแข็ง ตลอดจนน้ำหนักเพื่อประหยัดต้นทุนวัตถุดิบด้วย สารทำให้เกิดฟองนี้ เป็นสารเคมีที่สามารถผสมเข้าไปในพลาสติกเพื่อก่อเป็นรูปโครงสร้างแบบรังผึ้งโดยผ่านการปล่อยแก๊สในระหว่างกระบวนการผลิต โดยการผลิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอัดขึ้นรูป calendering และการฉีดแม่พิมพ์

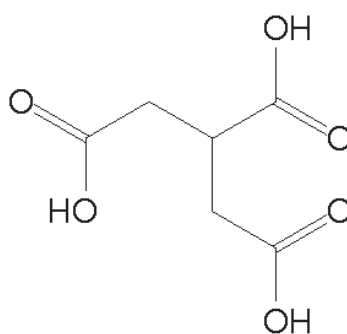
ประโยชน์ของสารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent or Blowing Agent)

- ลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

- ลดต้นทุนการผลิต
- ใช้วัตถุดิบลดลง
- ยกระดับคุณสมบัติทางกายภาพ
- เพิ่มอัตราส่วน ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก
- ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น

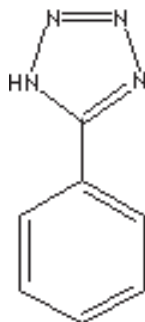
2.1.7.2 Hydrocerol HK 40B [23]

Hydrocerol HK 40B หรือชื่อทางเคมีคือ 1,2,3-Propanetricarboxylic acid เป็น Additive Masterbatch ของ foaming agent มีลักษณะเป็นเม็ดกลมแบน สีขาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร หนาประมาณ 1-1.3 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 154°C - 159°C และมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 220°C - 230°C - 245°C และเมื่อเกิดการสลายตัวจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา มักนำไปใช้กับใช้กับ Thermoplastic หรือ resin ต่างๆ เช่น พอลิคาร์บอเนต, พอลิเอไมด์, ไนลอน และ PET เพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงาน เพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุนการผลิต และได้ชิ้นงานที่แข็ง โดยสูตรโครงสร้างของ Hydrocerol HK 40B เป็นไปดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงสูตร โครงสร้างของ Hydrocerol HK 40B [23]

2.1.7.3 5-Phenyl-1H-tetrazoles [24, 25]



ภาพที่ 12 แสดงสูตร โครงสร้างของ 5-Phenyl-1H-tetrazoles [25]

- สูตรทางเคมี: $C_7H_6N_4$
- น้ำหนักโมเลกุล: 146.15
- ลักษณะทางกายภาพ: ผงสีขาว
- การปลดปล่อยแก๊สหลังจากการสลายตัว: 180 ml/g

5-Phenyl-1H-tetrazoles โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นผลึกเล็กๆหรือผง มีสีขาว มีกลิ่นฉุนเล็กน้อย สามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 156°C โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ $234^{\circ}\text{C} - 245^{\circ}\text{C}$ และเมื่อเกิดการสลายตัวจะปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกมา เป็นสารอนุพันธ์ที่มักใช้งานทางด้านที่เกี่ยวข้องกับชีววิทยา เช่น ด้านไวรัส ด้านแบคทีเรีย รักษาวัณโรค และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ phosphonates

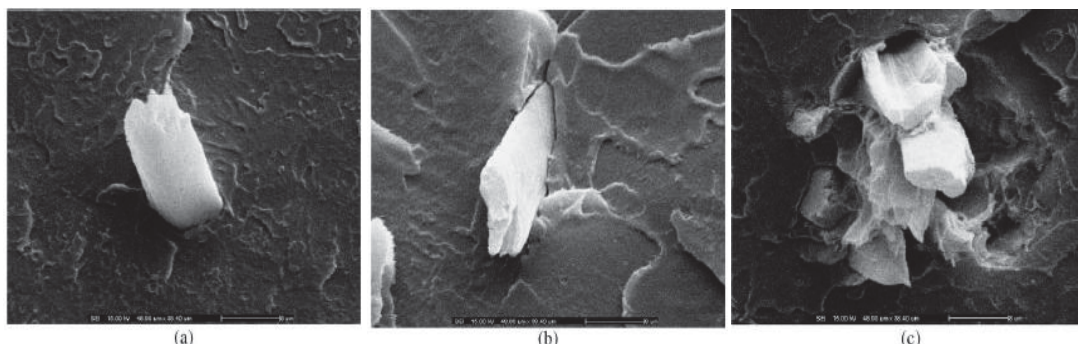
5-Phenyl-1H-tetrazoles จัดเป็นสารประกอบจำพวก organic heterocyclic ซึ่งประกอบด้วยวงเบนซีนและวงแหวนห้าเหลี่ยมที่มีอะตอมของ N อยู่ 4 อะตอมและ C อีก 1 อะตอม จัดเป็นสารจำพวก tetrazole มักถูกใช้เป็นสารทำให้เกิดฟองในพลาสติกที่กระบวนการขึ้นรูปจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงจำพวก polycarbonate (PC), polyamides, fluoro plastics, polyesters, polyphenylene oxides, nylons และ PET

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Mubarak A. และคณะ [26] ที่ทำการศึกษาผลของสารประสานที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ γ - aminopropyl trimethoxy silane(Z-6011), N- (β - aminoethyl)- γ

aminopropyl trimethoxy silane (Z-6020), γ - methacrylate propyl trimethoxy silane (Z-6030), 3 - glycidoxypopyl trimethoxy silane (Z-6040) และ vinyl trimethoxy silane (Q9-6300) ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล และโครงสร้างของคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับ jute ซึ่งได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของ jute fiber โดยใช้สารประสาน ที่มีหมู่ function ที่ต่างกัน แล้วดูการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของ jute fiber กับ พอลิคาร์บอเนต โดยวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับ jute นั้นจะถูกเตรียมโดยใช้วิธี compression molding จากนั้นนำไปทดสอบด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ XPS, FTIR, ESEM, DSC, dynamic mechanical analysis (DMA) และทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่าไซเลน ชนิด Z-6011 สามารถปรับปรุงพื้นผิวได้ดีที่สุด เนื่องจากได้แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกับพอลิคาร์บอเนตได้ดี ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลก็มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้สารประสานตัวอื่นๆ จากผลของการทดสอบโดยใช้เทคนิค XPS และ FTIR นั้น แสดงให้เห็นว่าสารประสานเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด พันธะระหว่างพื้นผิวของ jute fiber กับ พอลิคาร์บอเนต โดยเทคนิค DSC ยังบ่งชี้ว่า T_m จะเพิ่มขึ้นในกรณีของ fiber ที่ปรับปรุงผิวด้วยสารประสาน ซึ่ง Z-6011 กับ Z-6020 นั้นมีการเพิ่มขึ้นของ T_m สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารประสานตัวอื่นๆ และจากการเปรียบเทียบเส้นใย ที่ปรับปรุงผิวด้วยสารประสานชนิด Z-6011 และไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน พบว่าเส้นใยที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน ค่า Storage และ loss moduli mechanical properties จะเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยของ P. Threepopnatkul และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของไฮดรอกซีโรกไซด์ และสารประสาน 2 ชนิด ได้แก่ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) และ γ -methacryloxy propyl trimethoxy silane (Z-6030) ที่มีต่อการปรับปรุงพื้นผิวของในคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยสับปะรด จากการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับเส้นใยสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่า Young's modulus และค่า tensile strength มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ค่า elongation at break และ impact strength มีค่าลดลง โดยคอมโพสิตที่เส้นใยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน ชนิด Z-6011 จะมีค่า tensile strength และ impact strength สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงโดยใช้สารชนิดอื่น สาเหตุก็เนื่องมาจากโครงสร้างของเส้นใยที่สามารถยึดเกาะกับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารชนิดอื่น ซึ่งสามารถดูได้จาก SEM micrograph ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 13 แสดง SEM micrograph ของ (a) NaOH treated, (b) Z-6011 treated and (c) Z-6030 treated PALF/PC composites [16]

M. Abdelmouleh และคณะ [28] ได้ศึกษาการปรับปรุงเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้สารกลุ่มควาปไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ กัน ได้แก่ γ -Methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPS) γ -Aminopropyltriethoxysilane (APS) Hexadecyltrimethoxysilane (HDS) และ γ -Mercaptopropyltrimethoxysilane (MRPS) ในตัวกลางเอทานอล/น้ำ ให้ความร้อนและพิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นใยที่มีการปรับปรุงด้วยเทคนิค diffuse reflectance infrared spectroscopy (DRIFT) พบว่ามีการเกิดขึ้นของพันธะ Si-O-Cellulose และ Si-O-Si บนพื้นผิวของเซลลูโลส และยืนยันสมบัติที่ผิวหน้าของด้วยการวัดมุมสัมผัส และวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีพบว่าเกิดพันธะอย่างต่อเนื่องทั้งกับเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์

Zita Dominkovics และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ที่ถูกใช้ในการเสริมแรง polypropylene composite ซึ่งได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้โดยการให้เกิดปฏิกิริยา benzylation กับตัวโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลส ทำให้เกิดการแทนที่ของหมู่ benzene ring (aromatic ring) ณ หมู่ hydroxyl ของเซลลูโลสในผงไม้ จากนั้นก็จะนำไปผสมกับ polypropylene ขึ้นรูปเป็น composites และนำไปผ่านการทดสอบเพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ต่างๆ จากผลการศึกษาพบว่า อนุภาคของผงไม้ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว จะมีส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกับเมทริกซ์จะก่อตัวเป็นช่องว่างเล็กๆ เกิดขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของความ stiffness ในโครงสร้างของคอมโพสิต ซึ่งช่องว่างเล็กๆ ที่เกิดขึ้นอาจรวมตัวเกิดเป็นช่องว่างที่ใหญ่ขึ้นและนำไปสู่การเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดลงของค่า strength และอาจเกิดการแตกหักของชิ้นงานได้

D. Rodrigue และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุโพลีคอมพอสิต HDPE/PP โดยทำการทดสอบสมบัติ Tensile, flexural และ torsion ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Specific flexural complex modulus ของวัสดุโพลีคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยไม้ลงในคอมพอสิต ส่วนค่า Specific tensile modulus ของวัสดุโพลีคอมพอสิตก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่า Specific flexural complex modulus ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเฟสของเส้นใยไม้ที่มีความ stiff มากกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์นั่นเอง นอกจากนี้ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ค่า specific shear complex modulus มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ในคอมพอสิตกลับส่งผลให้ค่า elongation at break ของวัสดุโพลีคอมพอสิตมีค่าลดลง

Cheng Xiong และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/ผงขี้เลื่อยไม้ (HDPE/WF) เตรียมจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยการศึกษาอิทธิพลของผงขี้เลื่อยไม้ สารคู่ควบไซเลน 4 ชนิด ได้แก่ vinyltrimethoxysilane (vinyl silane), γ -aminopropyltriethoxysilane (amino silane), γ -glycid oxypropyltrimethoxysilane (epoxy silane) และ γ -ethacryloxypropyltrimethoxysilane (allyl ester silane) นอกจากนี้ยังมีสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในปริมาณต่าง ๆ กัน ที่มีต่อสมบัติของวัสดุเสริมองค์ประกอบผงขี้เลื่อยไม้/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ หลอมเหลว และโครงสร้างเชิงจุลภาค ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทั้งสารคู่ควบไซเลน และพอลิเมอร์เสริมสภาพเข้ากันได้ สามารถช่วยเพิ่มการยึดติดที่ส่วนต่อประสานระหว่างผงขี้เลื่อยไม้และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และช่วยเพิ่มสมบัติของวัสดุเชิงประกอบผงขี้เลื่อยไม้/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เมื่อพิจารณาสารคู่ควบไซเลนทั้ง 4 ชนิดพบว่า เมื่อใช้ อิพอกซีไซเลนในวัสดุเสริมองค์ประกอบ ทำให้มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากวงแหวนออกซิเลนมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนได้ดีที่สุดทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าสารคู่ควบอื่นๆ รองลงมาคืออะมิโนไซเลน สำหรับหมู่วินิลในไวนิลไซเลนเนื่องจากมีสายโซ่ที่สั้นกว่าจึงทำให้ยึดติดได้ดีกว่าอัลลิลเอสเตอร์ไซเลน จากการศึกษาความต้านแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีความต้านแรงดึงสูง (ความต้านแรงดึงเท่ากับ 51.03 เมกะปาสคาล) และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อน อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้

Andrzej K. Bledzki และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาถึงผลของชนิดของ Chemical foaming agent และผลของสารกึ่งควบไซเลนที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ wood fibre-PP microfoamed composites ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ injection molding ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Chemical foaming agent ที่เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแบบคายความร้อน จะทำให้ได้คอมพอสิตที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ chemical foaming agent ชนิดดูดความร้อน และชนิดที่ทั้งดูดและคายความร้อน โดยชนิดของ chemical foaming agent ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ได้โครงสร้างของเซลล์โฟมรวมถึงการกระจายตัวที่แตกต่างกันด้วย ในขณะที่ค่า strength ของวัสดุทั้ง specific tensile strength และ specific flexural strength ของโฟมคอมพอสิตที่ได้มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Rajlakshmi Nayak และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาผลของการนำความร้อนของคอมพอสิตอีพอกซีที่ถูกเสริมแรงด้วยอนุภาค โดยใช้วิธีการคำนวณและวิธีการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค finite element method (FEM) มาใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตอีพอกซีที่ถูกเสริมแรงด้วยผงขี้เลื่อยไม้สน และนำผลที่ได้นี้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้มาจากการทดสอบ โดยการใช้วิธี heat flow meter test โดยคอมพอสิตอีพอกซีที่ถูกเสริมแรงด้วยผงขี้เลื่อยไม้สนนี้จะถูกสร้างขึ้นโดยวิธี layup ด้วยมือ และจากการทดลองพบว่าผงขี้เลื่อยไม้สนจะไปลดความสามารถในการนำความร้อนของอีพอกซีเรซิน และจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนของอีพอกซี โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ลงไป 6.5 vol.% จะไปลดความสามารถในการนำความร้อนของอีพอกซีลง 19.8% และเมื่อเพิ่มปริมาณของผงขี้เลื่อยไม้สนเป็น 36% ความสามารถในการนำความร้อนของอีพอกซีจะลดลง 57.3% ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากวิธี FEM มีค่าสอดคล้องกันกับผลการทดสอบโดยการใช้วิธี heat flow meter test

จากงานวิจัยของ W. Yamsaengsung และ N. Sombatsompop [34] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสารทำให้เกิดฟอง(chemical blowing agent) ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโฟม EPDM และค่า peel strength รวมถึงสมบัติการนำความร้อนของลามิเนตของผงขี้เลื่อยไม้/ยางธรรมชาติ(NR) คอมพอสิต และยางเอทิลีน-โพรพิลีน ไดอีน(EPDM)โฟม โดยลามิเนตของผงขี้เลื่อยไม้/ยางธรรมชาติ(NR) คอมพอสิต และยางเอทิลีน-โพรพิลีน ไดอีน(EPDM)โฟม จะถูกเตรียมด้วยวิธี compression molding โดยใช้ 4,4'-oxybis(benzenesulfonylhydrazide) (OBSH) blowing agent ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ OBSH บริสุทธิ์และ OBSH ที่มีเอทิลีน-โพรพิลีนอยู่(EPR-*b*-OBSH) โดยผลของความเข้มข้นของ OBSH ต่อโครงสร้างเซลล์และสมบัติเชิงกลของโฟม EPDM ลามิเนต

จะถูกทดสอบ และจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า EPR-*b*-OBSH จะทำให้โฟม EPDM มีจำนวนโครงสร้างของเซลล์ที่มากกว่า การกระจายตัวของเซลล์ดีกว่าและเป็นแบบแผนมากกว่า และมีจำนวนรูพรุนที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม EPDM ที่มี EPR-*b*-OBSH มีคุณสมบัติการคืนกลับของ elastic แต่มีความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำที่พื้นผิวของโฟมที่ดีกว่า OBSH ส่วนค่า peel strength นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ blowing agent ทั้งสองชนิดลงไปในช่วงแรก เนื่องจาก blowing agent ที่ใส่เข้าไปจะไปช่วยเพิ่มการยึดติดกันที่พื้นผิวของยางทั้งสองชนิด ซึ่งจะช่วยเพิ่มระดับการเกี่ยวพันกันของโมเลกุลที่บริเวณพื้นผิวนี้นี้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ blowing agent จนถึง 3 phr ค่า peel strength จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ นอกจากนี้ในแง่ของความสามารถในการนำความร้อนนั้นการใส่ blowing agent ทั้งสองชนิดลงไปจะทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของ EPDM แย่ลงเนื่องจากโครงสร้างความเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการใช้ blowing agent

จาก patent ของ Frank N. Liberti และคณะ [35] ได้เปิดเผยถึงข้อมูลของการขึ้นรูป Polycarbonate Resin Foam โดยมีการใช้สารประกอบ epoxy ผสมลงในพอลิคาร์บอเนต ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดหรือกำจัดความชื้นในกระบวนการขึ้นรูปโฟมจากพอลิคาร์บอเนต เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปโฟมจากพอลิคาร์บอเนตมักประสบปัญหาในเรื่องของความชื้น ซึ่งเป็นตัวที่ส่งผลให้ชิ้นงานจากโฟมพอลิคาร์บอเนตมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง โดยในการทดลองมีการใช้ epoxy ที่ผ่านการทำ functionalized แล้ว ในปริมาณ 0.2% - 1.0% โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต โดยในการทดลองยังมีการใส่เส้นใยแก้วเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลอีกด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้อธิบายถึง blowing agent ที่เป็นของแข็งไว้ว่า เมื่อ blowing agent เกิดการสลายตัวจะต้องมีการปลดปล่อยก๊าซจำพวก ammonium หรือ azo ออกมา ซึ่งได้ยกตัวอย่างไว้ เช่น ammonium bicarbonate, diazoaminotoluene, azodicarbonamide แต่ในการทดลองนี้จะใช้ 5-phenyl tetrazole เป็น blowing agent ซึ่งจะทำให้การผสมในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป จากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของพอลิคาร์บอเนตถูกลดลงจนเหลือเพียงประมาณ 0.02% โดยน้ำหนัก และปริมาณ epoxy ที่เพิ่มขึ้นยังมีส่วนช่วยให้ค่า Izod impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต จึงได้นำเอาสารคู่ควบไซเลนเข้ามาช่วยในการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้ โดยทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้ และผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองในการขึ้นรูปเป็นวัสดุโฟมคอมพอสิตอีกด้วย โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วนแรกจะเป็นการเลือกไซเลนเพื่อใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของไซเลนที่ใช้กับวัสดุคอมพอสิต แล้วตรวจสอบผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา เพื่อที่จะสามารถเลือกชนิดและปริมาณของไซเลนที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยไม้ได้

2. ส่วนที่สองจะเป็นการเลือกใช้ปริมาณผงซีลี้อยไม้ที่ทำให้สามารถขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตที่มีสมบัติในด้านต่างๆ ดีที่สุด โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้ แล้วตรวจสอบผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

3. ส่วนสุดท้ายจะเป็นการเลือกสารทำให้เกิดฟองเพื่อใช้ในการขึ้นรูปวัสดุโฟมคอมพอสิตระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่ใช้กับวัสดุคอมพอสิต แล้วตรวจสอบผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา เพื่อที่จะสามารถเลือกชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเป็นวัสดุโฟมคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยไม้ได้

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ผงซีลี้อยไม้ (Sawdust) จากบริษัท วี พี วัสดุ จำกัด นำมาคัดแยกขนาดโดยผงซีลี้อยไม้ที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาด 100-150 ไมครอน



ภาพที่ 14 ผงซีลี้อยไม้

3.1.2 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ชื่อทางการค้าคือ Lupilon เกรด MB2215R
ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยพอลิคาร์บอเนต, ประเทศไทย



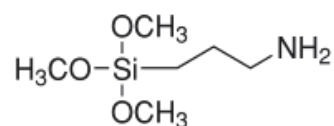
ภาพที่ 15 พอลิคาร์บอเนตเกรด MB2215R

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของพลาสติกพอลิคาร์บอเนต

Properties	Value	Test method
Density	1.13 g/cm ³	ISO 1183
Melt Volume-Flow Rate	4-8 g/10 min	ISO 1133
Tensile strength	52.0 MPa	ISO 572-2
Tensile modulus	2,400 MPa	ISO 572-2

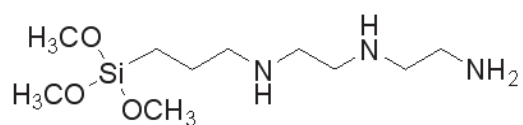
Flexural strength	82.0 MPa	ISO 178
Flexural modulus	2,500 MPa	ISO 178
Charpy notched impact strength (1/4" thick specimen)	80 kJ/m ²	ISO 179
Drying Temperature (4-8 hr)	80-90 °C	-
Processing temperature (injection molding)	210-270 °C	-

3.1.3 สารกึ่งควบไชลีนชนิด γ -aminopropyl trimethoxysilane (Z-6011) จากบริษัท Sigma-Aldrich



ภาพที่ 16 แสดงสูตรโครงสร้างของสารกึ่งควบไชลีนชนิด γ -aminopropyl trimethoxysilane

3.1.4 สารกึ่งควบไชลีนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) จากบริษัท Sigma-Aldrich



ภาพที่ 17 แสดงสูตรโครงสร้างของสารกึ่งควบไชลีนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine

3.1.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากบริษัท Ajax Finechem, Australia

3.1.6 กรดแอซิดิก จากบริษัท Union Intraco, ประเทศไทย

3.1.7 Laventin (wetting agent) จากบริษัท BASF SE Ludwigshafen, Germany

3.1.8 สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B จากบริษัท คลาเรียนท์ เคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด



ภาพที่ 18 สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B

3.1.9 สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole จากบริษัท Sigma-Aldrich



ภาพที่ 19 สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole

3.1.10 Deionized water จากภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.1.11 Diisononyl phthalate ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 เครื่อง Twin screw extruder ของบริษัท Enmach CO., LTD

3.2.2 เครื่อง Injection molding ของบริษัท Elite Precision Machinery รุ่น E80A

3.2.3 เครื่อง Compression molding ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LP-S-50

3.2.4 เครื่องผสมความเร็วสูง (High Speed Internal Mixer) บริษัท เอ็นแมช จำกัด

3.2.5 เครื่อง Universal testing Machine ของบริษัท ซิมาส รุ่น Autograph AG-I

3.2.6 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Instrumented Impact Tester) Zwick

3.2.7 เครื่องทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ของบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70

3.2.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท CamScan รุ่น MX 2000

3.2.9 เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท PERKIN ELMER รุ่น TGA 7HT

3.2.10 เครื่อง Hot Disk Constant Analyzer รุ่น TPS2500 Hot disk AB

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวผงซีลี้อยู่ไม่และใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต

ระบบการทดลอง	ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้					
	ผงซีลี้อยู่ไม่ (w/w)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (w/w)	γ - Aminopropyl trimethoxy silane (w/w)	N-(3-Trimethoxysilyl propyl) diethylenetriamine (w/w)	Hydrocerol HK 40B (phr)	5-Phenyl-1H-Tetrazole (phr)
Neat PC	-	-	-	-	-	-
PC/W-Untreated	10	-	-	-	-	-
PC/W-NaOH	10	4.0	-	-	-	-
PC/W-Z6011 1.0	10	-	1.0	-	-	-
PC/W-TMS0.5	10	-	-	0.5	-	-
PC/W-TMS1.0	10	-	-	1.0	-	-
PC/W-	10	-	-	1.5	-	-

TMS1.5						
PC/W-TMS2.0	10	-	-	2.0	-	-
PC/W20-TMS0.5	20	-	-	0.5	-	-
PC/W30-TMS0.5	30	-	-	0.5	-	-
PC/W-H0.5	10	-	-	0.5	0.5	-
PC/W-H1.0	10	-	-	0.5	1.0	-
PC/W-H1.5	10	-	-	0.5	1.5	-
PC/W-H2.0	10	-	-	0.5	2.0	-
PC/W-P0.5	10	-	-	0.5	-	0.5
PC/W-P1.0	10	-	-	0.5	-	1.0
PC/W-P1.5	10	-	-	0.5	-	1.5
PC/W-P2.0	10	-	-	0.5	-	2.0



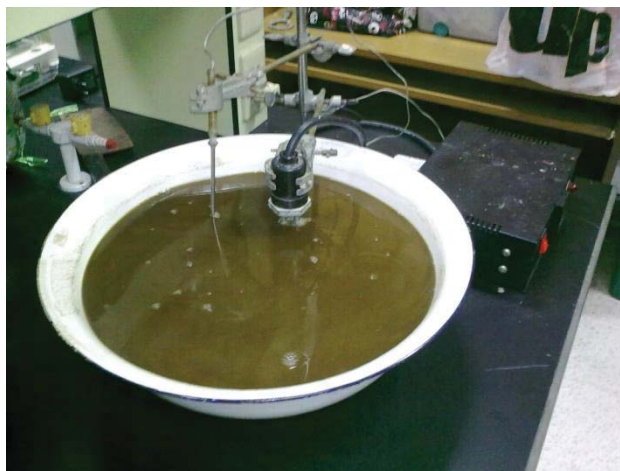
ภาพที่ 20 เครื่องคัดแยกขนาด (Sieve Shaker)

3.3.1 การคัดเลือขนาดผงขี้เลื่อยไม้

ทำการคัดเลือขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ก่อนการนำมาใช้ โดยนำผงขี้เลื่อยไม้ใส่ในตะแกรง sieve และเครื่อง sieve ดังภาพที่ 20 เพื่อให้ผงไม้ที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยขนาดของผงขี้เลื่อยไม้ที่ต้องการมีขนาดอยู่ในช่วง 100 ถึง 150 ไมโครเมตร

3.3.2 การปรับปรุงผิวผงขี้เลื่อยไม้โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic soda)

หลังจากทำการคัดเลือขนาดของผงขี้เลื่อยไม้แล้ว ก็จะนำผงขี้เลื่อยไม้ที่ได้มาทำการล้างด้วยน้ำสะอาด โดยการให้ความร้อนแก่น้ำสะอาดด้วย thermostat จนน้ำสะอาดมีอุณหภูมิถึง 50 °C นำผงขี้เลื่อยไม้แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อล้างพวกสิ่งสกปรกออกไป ในขณะรอเวลาล้างผงขี้เลื่อยไม้ ให้ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4% o.w.f. และ laventin 1% o.w.f. เติมน้ำลงไปในอัตราส่วน 1:25 เมื่อเทียบกับน้ำหนักของผงขี้เลื่อยไม้ จากนั้นให้เทน้ำที่ใช้ล้างผงขี้เลื่อยไม้ออกแล้วทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปแทน ทำการให้ความร้อนด้วย thermostat ณ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที ทำการกวนผงขี้เลื่อยไม้ที่แช่อยู่เป็นระยะ เพื่อให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถย่อยสลายพวกเฮมิเซลลูโลส แวกซ์ เพกตินและลิกนินออกไปจากพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ได้อย่างทั่วถึง เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วก็เอาผงขี้เลื่อยไม้ออกมาจากสารละลาย โดยทำการกรองด้วยผ้าขาว และทำการล้างผงขี้เลื่อยไม้ด้วยน้ำสะอาดเพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกไป โดยจะทำการล้างจนกว่าผงขี้เลื่อยไม้จะมีค่า pH เป็นกลาง (ทำการเช็คด้วยกระดาษลิตมัส) จากนั้นนำผงขี้เลื่อยไม้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อไล่ความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 6 ชั่วโมง จนกว่าผงขี้เลื่อยไม้จะมีน้ำหนักคงที่ นำผงขี้เลื่อยไม้ที่แห้งแล้วบางส่วนไปทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR เพื่อยืนยันผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผงขี้เลื่อยไม้ที่เตรียมได้จากขั้นตอนนี้จะนำไปใช้ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิต PC/W-NaOH



ภาพที่ 21 แสดงการปรับปรุงผิวผงซีเลื่อยไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.3 การปรับปรุงผิวผงซีเลื่อยไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน

สารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine และ γ -aminopropyl trimethoxysilane (Z-6011) ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีเลื่อยไม้ เริ่มด้วยการเตรียมผงซีเลื่อยไม้ที่ได้ทำการคัดเลือกขนาดแล้ว โดยนำไปผ่านขั้นตอนการล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำผงซีเลื่อยไม้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อไล่ความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 6 ชั่วโมง จนกว่าผงซีเลื่อยไม้จะมีน้ำหนักคงที่ ทำการเตรียมสารคู่ควบไซเลน โดยเตรียมน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วนที่เท่ากับปริมาณผงซีเลื่อยไม้ (สัดส่วนผงซีเลื่อยไม้ต่อน้ำปราศจากไอออนเป็น 1กรัม:1มิลลิลิตร) จากนั้นทำการหยดกรดอะซิติกลงในน้ำปราศจากไอออนโดยใช้กรดอะซิติกปริมาณ 1.0% โดยน้ำหนักของผงซีเลื่อยไม้ ในขณะที่หยดจะทำการกวนสารละลายอยู่ตลอดเวลาโดยใช้ magnetic bar หลังจากหยดกรดอะซิติกเสร็จให้ทำการกวนสารละลายต่อไปเป็นเวลาประมาณ 5 นาที เพื่อให้กรดเกิดการแตกตัวได้ทั่วถึง ซึ่งกรดอะซิติกจะช่วยให้ไซเลนแตกตัวเป็นไซลานอลได้ง่ายขึ้น จากนั้นนำสารคู่ควบไซเลนหยดลงไป โดยในการศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลนนี้จะใช้สารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิดในปริมาณ 1.0% โดยน้ำหนักของผงซีเลื่อยไม้ ระหว่างที่ทำการหยดสารคู่ควบไซเลน ก็จะทำการคนสารละลายอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งสารคู่ควบไซเลนถูกหยดจนหมดและสารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นกวนสารละลายต่อไปเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส นำสารละลายไซเลนที่เตรียมได้มาพ่นลงบนผิวของผงซีเลื่อยไม้ที่ผ่านการอบจนมีน้ำหนักคงที่แล้ว มาทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High Speed Internal Mixer) ด้วยความถี่ใบกวน 25

เฮิร์ตส เป็นเวลา 5 นาที นำผงขี้เลื่อยไม้จากการผสมดังกล่าวอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นและให้อุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงขี้เลื่อยไม้

ผงขี้เลื่อยไม้ที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีต่างๆแล้ว จะถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นและเป็นการยืนยันผลของการปรับปรุงพื้นผิว



ภาพที่ 22 แสดงเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

3.3.5 การผสมวัสดุเพื่อขึ้นรูป

นำเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตมาทำการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบ โดยใช้อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่ผ่านการอบแล้วมาทำการผสมเบื้องต้นกับผงขี้เลื่อยไม้และ diisononyl phalate ปริมาณ 3% wt (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดพอลิคาร์บอเนต) เพื่อช่วยให้เม็ดพอลิคาร์บอเนตไหลได้ง่ายขึ้น และสำหรับการทดลองในส่วนที่ 3 จะมีการใส่สารทำให้เกิดฟองผสมเข้าไปด้วย โดยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High Speed Internal Mixer) ดังแสดงในภาพที่ 23 ด้วยความถี่รอบวน 25 เฮิร์ตส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำเม็ดพอลิคาร์บอเนตที่ผ่านการผสมในเบื้องต้นแล้วมาทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง twin screw extruder โดยตั้งค่าอุณหภูมิภายในกระบอกหลอมเป็น 180, 180, 190, 200, 200, 210, 210, 210, 210 แล้วใช้ความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 100 รอบ/นาที สำหรับการทดลองในส่วนที่ 1 จะใช้ผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณ 10%wt โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต และการทดลองในส่วน

ที่ 2 จะปรับเปลี่ยนการใช้ผงซีลี้อยู่ไม่เป็น 10, 20 และ 30%wt โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอเนต คอมพอสิตที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปเม็ด extruded จากนั้นก็นำไปอบไล่ความชื้น ณ อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 23 แสดงเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High Speed Internal Mixer)



ภาพที่ 24 แสดงเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ (twin screw extruder) ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิต

3.3.6.1 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของการทดลองส่วนที่ 1 และ 2 ชิ้นงานคอมพอสิตที่นำมาทดสอบจะทำการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) โดยนำเม็ด extruded ที่ได้จากขั้นตอนการผสมวัสดุมาทำการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine) ของ Elite Precision Machinery co. eld. รุ่น E-80A เป็นชิ้นงาน Dog bone specimen flexural specimen และ impact specimen อย่างละ 15 ชิ้น เพื่อทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติการทนต่อแรงโค้งงอ และสมบัติการทนต่อแรงกระแทก โดยสภาวะในการฉีดขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงสภาวะในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์

สภาวะ	PC composite
อุณหภูมิ Hopper (°C)	190
อุณหภูมิช่วงกลางสกรู (°C)	200
อุณหภูมิช่วงหัวฉีด (°C)	220
ความดันในการฉีด (Bar)	80
ความดันอัดยี้ (Bar)	80
ความดันในการปลดชิ้นงาน (Bar)	35
เวลาในการหล่อเย็น (s)	20

3.3.6.2 การอัดขึ้นรูป (Compression molding)

ในการทดสอบสมบัติการนำความร้อน และการทดสอบสมบัติเชิงกลของการทดลองส่วนที่ 3 ชิ้นงานคอมพอสิตที่นำมาทดสอบจะทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูป (compression molding) โดยนำเม็ด extruded ที่ได้จากขั้นตอนการผสมวัสดุมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding machine ดังภาพที่ 25 โดยสภาวะในการอัดขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 6 โดยชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติการนำความร้อนจะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมขนาด 5×5×1 ซม.

ตารางที่ 6 แสดงสถานะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิต

พารามิเตอร์	การทดลอง ส่วนที่ 1 และ 2	การทดลองส่วนที่ 3	
	Thermal Conductivity	Thermal Conductivity	Impact Test
อุณหภูมิ (°C)	230	230	230
เวลา Preheat (min)	20	15	7
เวลา Pressing (min)	5	2	2
เวลา Full press (min)	10	2	2
เวลา Cooling (min)	3	3	3
ความดันที่ใช้ (Bar)	158	30	30



ภาพที่ 25 แสดงเครื่อง Compression Molding ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

3.3.7.1 การวัดค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

ในที่นี้จะทำการวัดค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามมาตรฐาน ASTM D 792 โดยการนำชิ้นงานมาทำการไล่ส่วนที่เป็นวัฏภาคก๊าซภายในชิ้นงานออกจนหมด แล้วจึงนำมาทำการชั่งน้ำหนักในอากาศ และชั่งน้ำหนักในของเหลวที่เหมาะสมได้แก่ Ethanol ซึ่งเป็นสารที่ไม่ทำ

ละลายสารตัวอย่างและมีความหนาแน่นน้อยกว่าชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้ในอากาศ น้ำหนักที่ชั่งได้ใน Ethanol และความหนาแน่นของ Ethanol มาคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ชิ้นงาน สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในอากาศและในของเหลวมาตรฐานซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ Ethanol ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 0.970 กรัมต่อมิลลิลิตร และคำนวณค่า Specific gravity (Relative density) จากความสัมพันธ์

$$Sp\ gr\ 23/23^{\circ}C = a \times d / (a + w - b) \quad \dots\dots\dots (6)$$

- โดยที่ a คือ Apparent weight of specimen. Without wire or sinker, in air
- b คือ Apparent weight of specimen. (and/or wire or sinker, if used) completely immersed and of the wire partially immersed in liquid
- w คือ Apparent weight of totally immersed sinker (if used) and of partially immersed wire.
- d คือ Density of immersion liquid

3.3.7.2 การทดสอบอัตราการไหลของคอมพอสิต (Melt Flow Index)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติการไหลตัวของพลาสติกเหลวที่ขึ้นรูปได้ ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 (MFI, Melt Flow Index) โดยให้แท่งน้ำหนัก (Piston) กดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวก็จะไหลผ่านหัวดายออกมา หลังจากนั้นก็นำพลาสติกที่ไหลออกมาไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลา 10 นาที ก็จะได้ค่าของ MFI ของพลาสติก ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม /10 นาที ซึ่งในการทดสอบจะทำที่อุณหภูมิ 230°C โดยใช้ Piston ขนาด 2,160 g

3.3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

3.3.8.1 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Properties)

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Properties) จะเป็นการบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง เป็นการวัดความทนทานของวัสดุที่รับแรงคงที่หรือได้รับแรงอย่างช้า ๆ ซึ่งสามารถบ่งบอกความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างพองซีลได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็นชิ้นงานแบบ Dog bone ตามมาตรฐาน ASTM D638 ความยาวแกน 50 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) ชิ้นงานคอมพอสิตจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal testing machine รุ่น LR 50K ของบริษัท LLOYD Instruments ดังภาพที่ 23 โดยก่อนนำไปทดสอบชิ้นงานจะถูกนำไปวัดความกว้างและความหนาของชิ้นงานบริเวณแกนด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์เพื่อให้ทราบถึงพื้นที่ในการรับแรง ในการทดสอบจะใช้ความเร็วในการดึง (cross head speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยน้ำหนักกด 50 กิโลนิวตัน โดยผลการทดสอบที่ต้องการในงานวิจัยนี้คือค่ามอดูลัสแรงดึง (tensile modulus), ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

- ค่ามอดูลัสแรงดึง (tensile modulus) คือความชันของกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (stress – strain curve) ในช่วงบริเวณที่เป็นอีลาสติก (elastic) ค่ามอดูลัสจะเป็นการวัดความแข็งแรงของวัสดุ โดยวัสดุที่มีมอดูลัสสูงจะมีความสามารถในการรักษารูปร่างจากการรับแรงได้ดี

- ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะสามารถรับได้



ภาพที่ 26 แสดง Universal testing machine ของ LLOYD Instruments รุ่น LR 50K

3.3.8.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงโค้งงอ (Flexural properties)

ในงานวิจัยนี้การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงโค้งงอ (flexural properties) จะทำการทดสอบการทดสอบแบบ 3 จุด (3-points bending) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD Instruments รุ่น LR 50K เช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งชิ้นงานคอมพอลิทีที่นำมาทดสอบจะถูกขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) ในการทดสอบจะเว้นระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (span length) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการกด 2.8 มิลลิเมตรต่อวินาที วัดความกว้างและความหนาของชิ้นงานบริเวณเกจด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยผลการทดสอบที่ต้องการในงานวิจัยนี้คือค่ามอดูลัสแรงโค้งงอ (flexural modulus) และความทนทานต่อการโค้งงอ (flexural strength) ของวัสดุ

3.3.8.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Properties)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) จะทดสอบเพื่อดูถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในการทดลองส่วนที่ 1 และ 2 จะขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป (injection molding) ส่วนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในการทดลองส่วนที่ 3 จะขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูป (compression molding) ซึ่งจะใช้การทดสอบแบบ Notched izod impact test ตามมาตรฐาน ASTM D256 วิธีดังกล่าวจะมีการทำรอยบากที่ชิ้นงาน โดยการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact tester) ของ Zwick รุ่น B5102.202 ใช้ลูกตุ้ม (Pendulum) ขนาด 4 จูล ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงเครื่อง Impact Tester ของบริษัท Zwick

3.3.8.4 การทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness)

เป็นการทดสอบสมบัติความแข็งที่พื้นผิวของวัสดุ โดยจะทำการใช้เครื่องทดสอบ Durometer กดบนผิวชิ้นทดสอบ ทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Permanent Indentation) แล้ววัดขนาดความโตหรือความลึกของรอยบุ๋ม โดยนำชิ้นงานที่มีความหนาอย่างน้อย 6 mm ตาม ASTM D2240 มาทำการทดสอบด้วยเครื่อง Durometer Hardness ชนิด Shore D ใช้น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม ดังรูปที่ 28 โดยนำชิ้นงานทดสอบวางลงบนแท่นทดสอบได้เครื่องมือวัดที่มีค้อนน้ำหนักวางอยู่ด้านบน แล้วดันชิ้นงานขึ้นไปติดกับหัวกดจนค้อนน้ำหนักยกขึ้นประมาณ $\frac{1}{4}$ นิ้ว จึงอ่านค่าที่ได้จากสเกลแล้วบันทึก ณ ตำแหน่งการทดสอบอื่นของชิ้นงานทั้งหมด 5 จุด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้หัวกดชนิด Shore D ในการวัดค่าความแข็งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน



ภาพที่ 28 แสดงเครื่อง Shore Durometer Hardness

3.3.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

3.3.9.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ พอลิคาร์บอเนต ผงขี้เลื่อยไม้ สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด (Hydrocerol HK 40B และ Phenyl-1H-Tetrazole) และคอมพอสิตแต่ละชนิด จะใช้เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ในการวิเคราะห์แต่ละครั้งจะใช้สารในปริมาณ 3-5 มิลลิกรัมบรรจุลงใน pan โดยใช้ microbalance จากนั้นนำ pan เข้าสู่เครื่อง TGA โดยใช้ระบบ Temperature Scan หาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สลายตัวไป (% weight loss) กับอุณหภูมิ ทำการทดสอบที่

อุณหภูมิสัมประสิทธิ์ 50°C แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซของไนโตรเจน เพื่อทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน แล้วนำไปวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของวัสดุ ซึ่งจะทำให้ทราบอุณหภูมิที่สารแต่ละชนิดเกิดการสลายตัว เพื่อที่จะสามารถหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานและขึ้นรูปคอมพอสิตได้



ภาพที่ 29 แสดงเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.9.2 การทดสอบสมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

การทดสอบสมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต โดยขึ้นงานที่ใช้การทดสอบจะขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูป (compression molding) ซึ่งจะทำให้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C177 โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 2 ตัวอย่าง ทำการวัดด้วยด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Constant Analyser) โดยใช้เซนเซอร์ TCR $4.693\text{e-}3$ และใช้โปรแกรม Hot disk ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง



ภาพที่ 30 แสดงเครื่อง Thermal constant analyzer

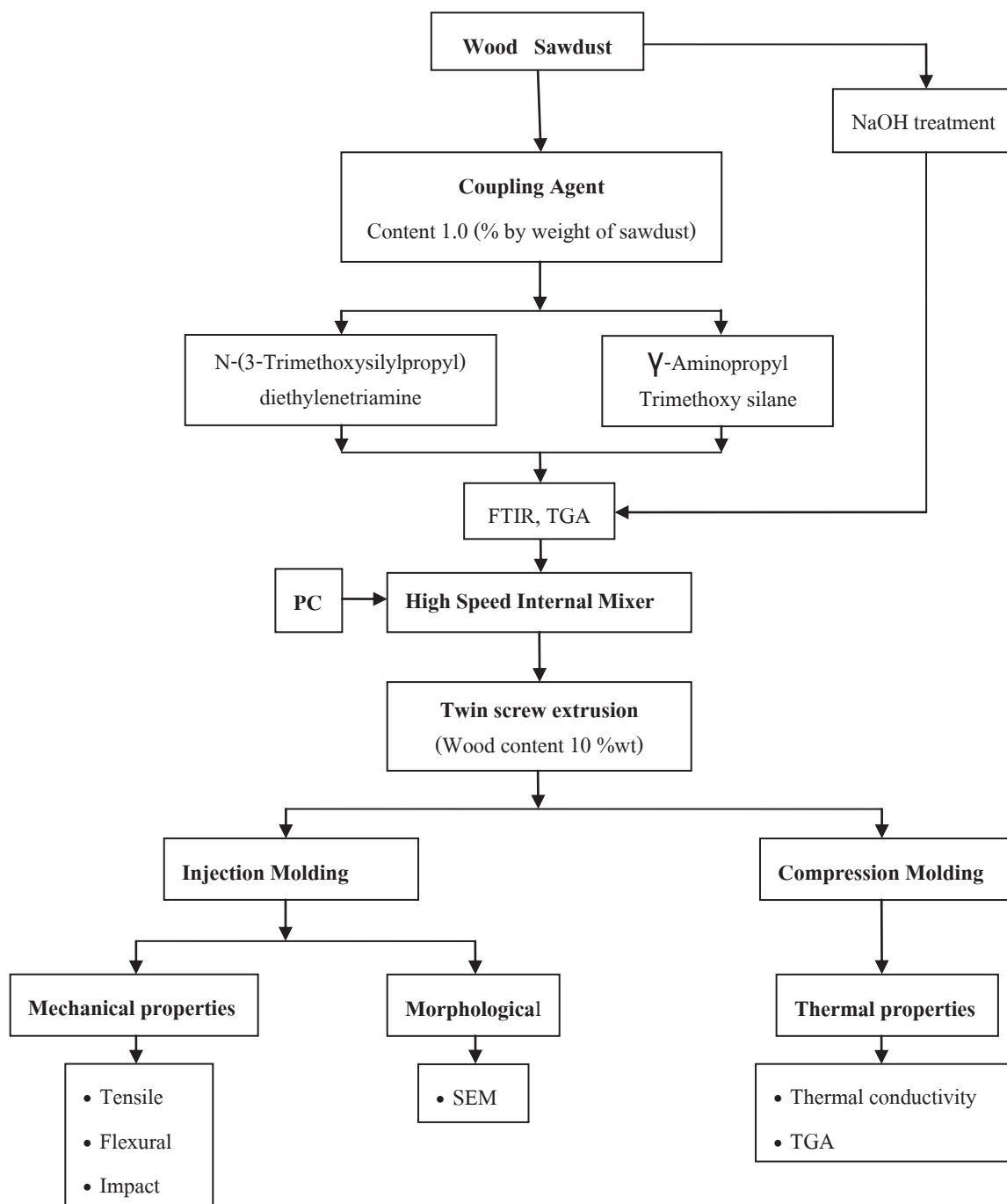
3.3.10 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่แตกหัก จะทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งเป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า เทคนิคนี้อาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนกราดลงบนผิวชิ้นงาน อิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับผิวชิ้นงานจะถูกถ่ายทอดผ่านระบบตรวจวัดและอิเล็กทรอนิกส์ปรากฏบนจอภาพ ในการเตรียมชิ้นงานนั้นจะใช้ชิ้นงานที่เกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด โดยอาจนำชิ้นงานทดสอบแช่ในไตรเจนเหลวจนกระทั่งชิ้นงานแข็งตัว หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบมาหักเพื่อนำผิวหน้าที่เกิดจากการหักขึ้นทดสอบมาติดกับ stub แล้วทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทอง แล้วจึงส่องดูบริเวณพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก ในการทดสอบ SEM นี้จะทำให้เราเห็นถึงลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน การกระจายตัวของผงจีเลียมไม้อยู่ในเนื้อพอลิเมอร์เมตริกซ์ รวมถึงโครงสร้างเซลล์โฟมซึ่งอยู่ในการทดลองส่วนที่ 3 ผลที่ได้จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวระหว่างผงจีเลียมไม้อยู่และเนื้อพอลิเมอร์ และลักษณะโครงสร้างของเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นได้

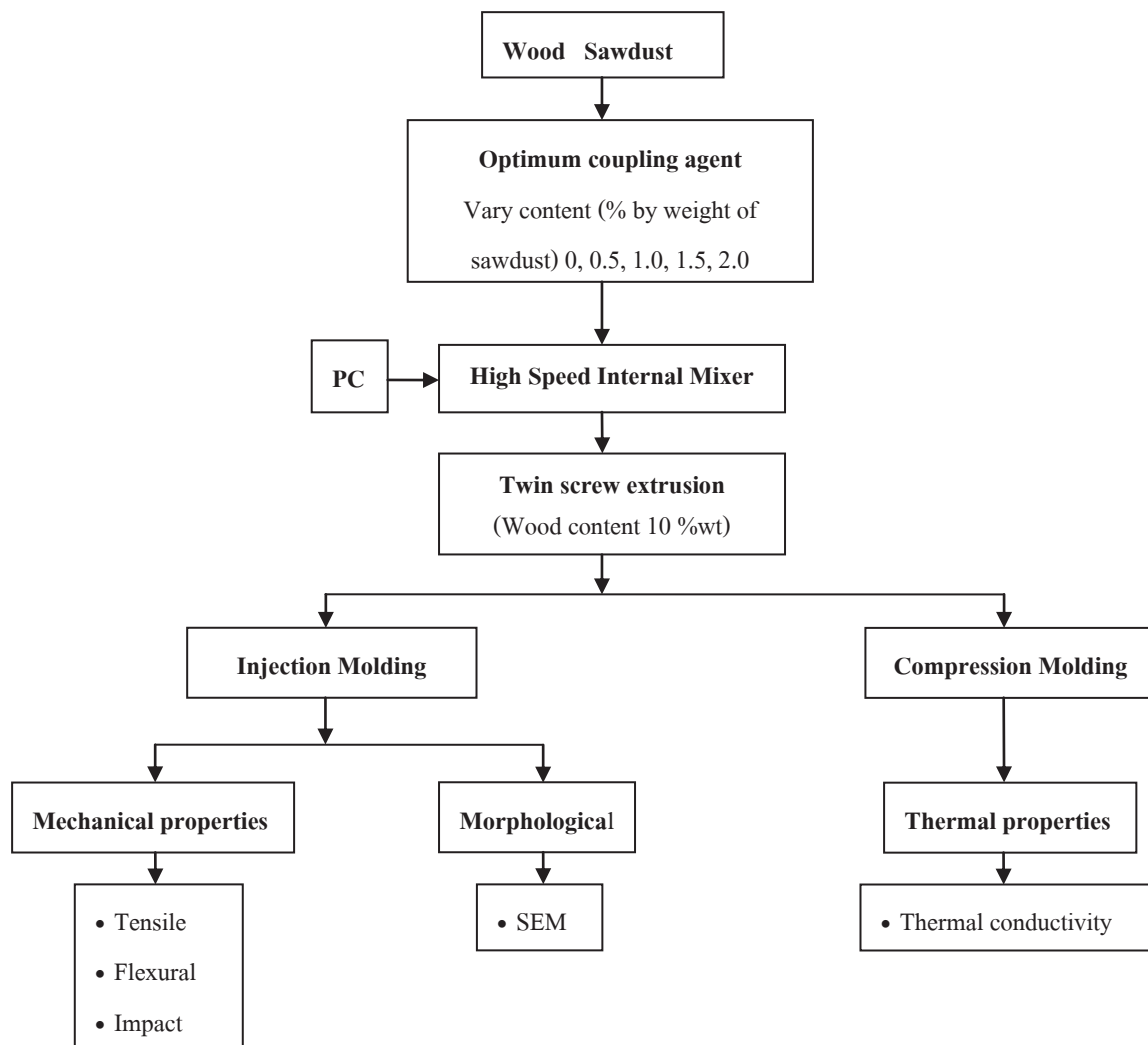


ภาพที่ 31 แสดงเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่ใช้ในงานวิจัย

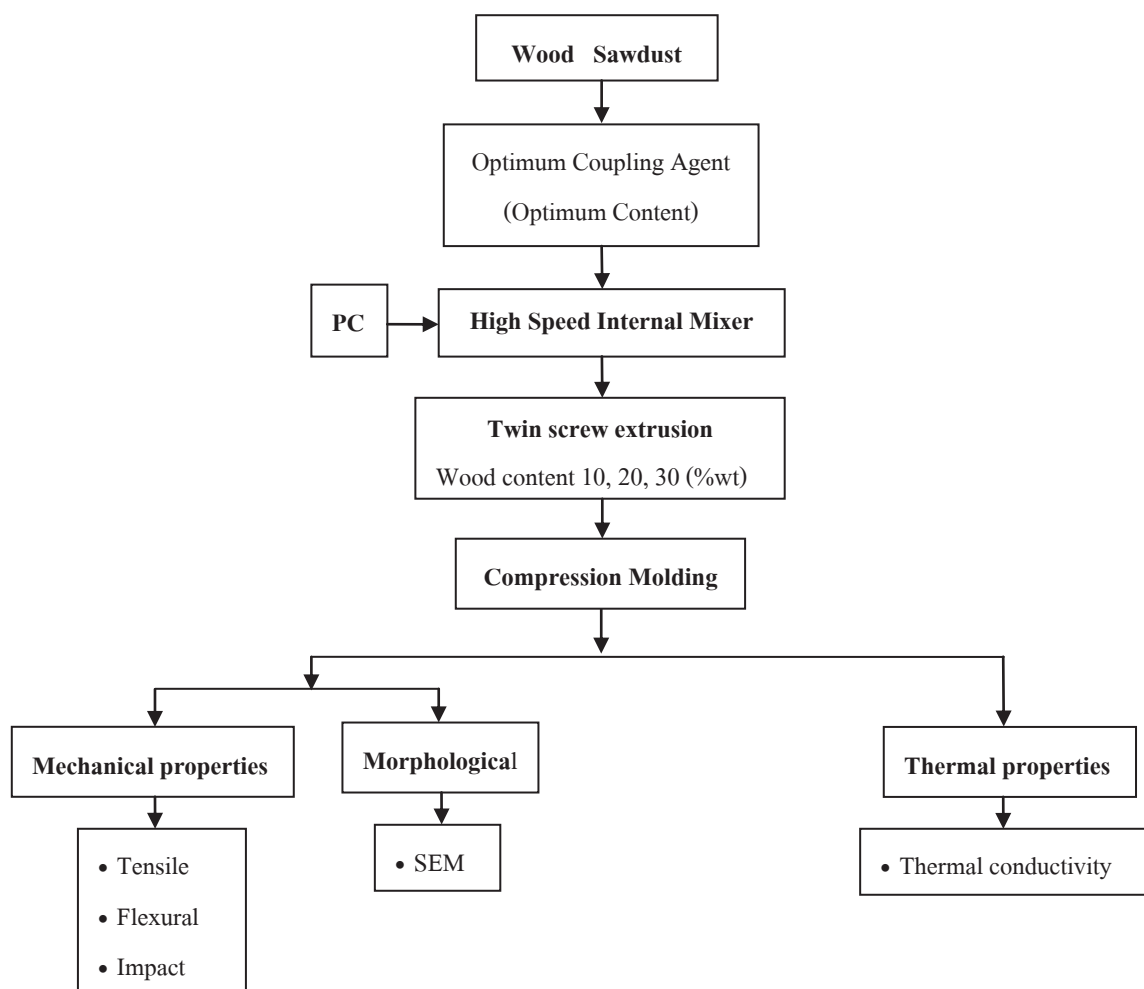
3.4 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ



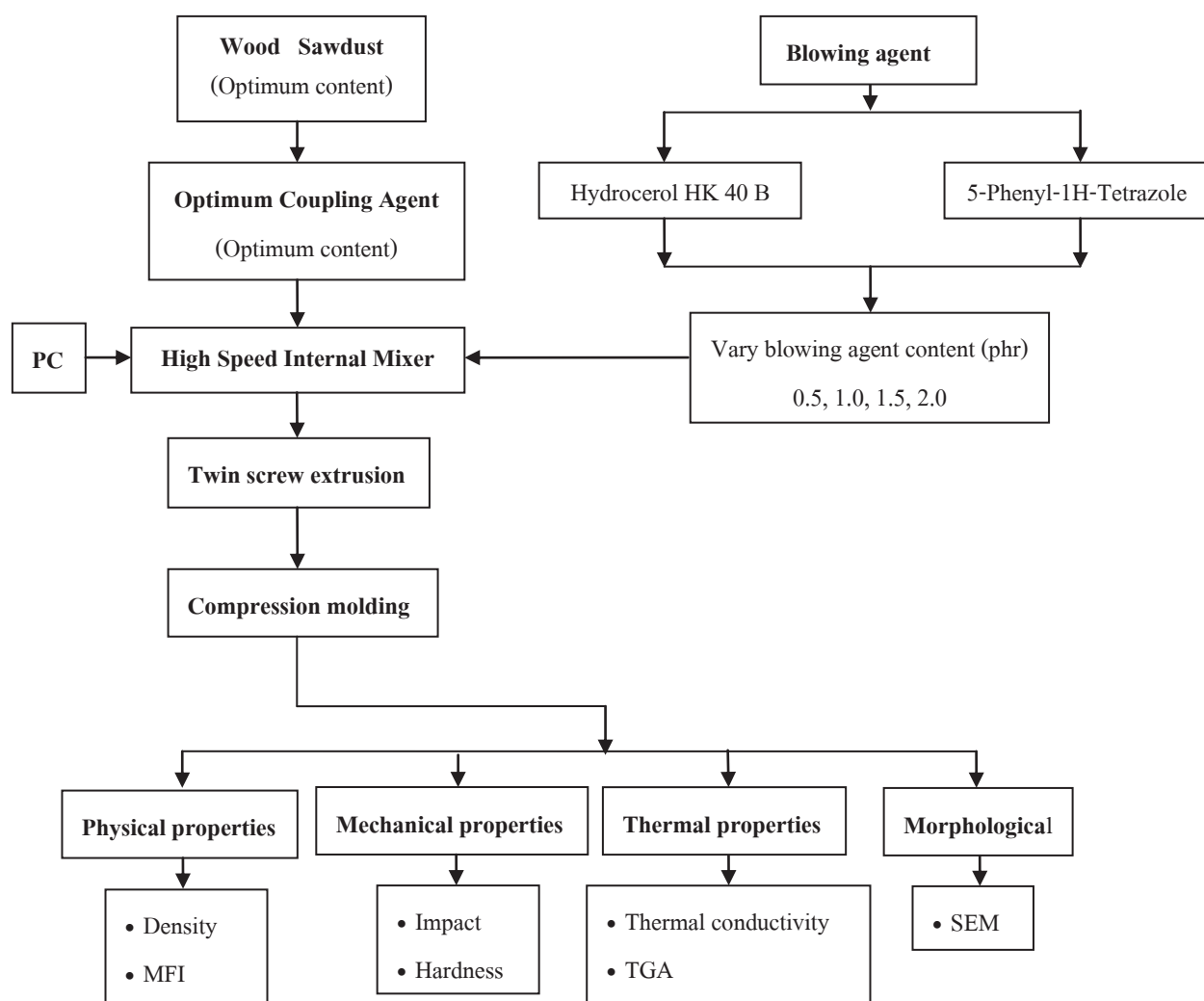
ภาพที่ 32 แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต



ภาพที่ 33 แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของปริมาณสารก่อกวนไขเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต



ภาพที่ 34 แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต



ภาพที่ 35 แผนผังแสดงการแนวทางและขั้นตอนการศึกษาของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมน์ และผลของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุโพลีคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมน์ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารก่อควบไซเลน โดยทำการเลือกใช้ไซเลน 2 ชนิด คือ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) และ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมน์

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณผงซีลีอ์ไมน์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมน์ โดยสัดส่วนของผงซีลีอ์ไมน์ที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตมี 3 ปริมาณ คือ 10 %, 20 % และ 30 %wt โดยน้ำหนักของคอมพอสิต

ส่วนที่ 3 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการนำความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุโพลีคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมน์

4.1 ผลของชนิดและปริมาณสารก่อควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

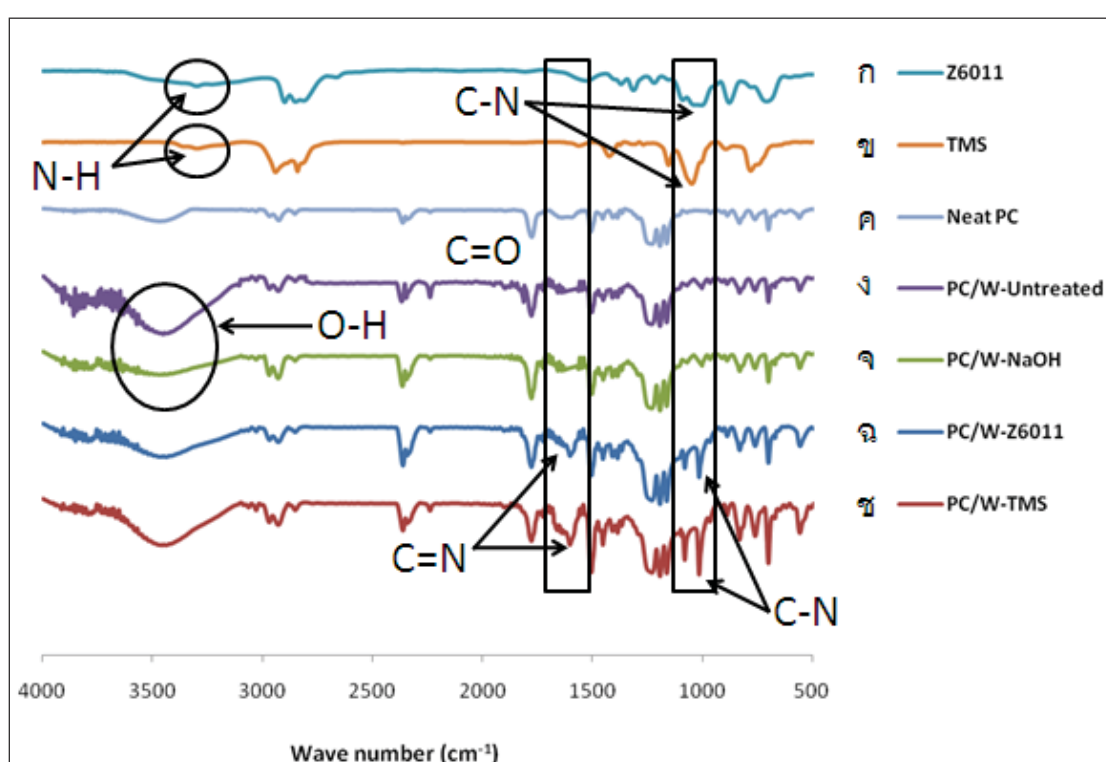
4.1.1 ศึกษาผลของชนิดสารก่อควบไซเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

ผู้วิจัยจะทำการศึกษาถึงผลของชนิดสารก่อควบไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลีอ์ไมน์กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ซึ่งในที่นี้คือพอลิคาร์บอเนต ซึ่งความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีอ์ไมน์กับพอลิเมอร์เมตริกซ์นี้จะส่งผลอย่างยิ่งต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต โดยการปรับปรุงผิวผงซีลีอ์ไมน์ด้วยการ pre-treatment ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำการกำจัดพวกลิกนิน (lignin) ไขมัน (wax) และสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulosic matters) ที่ผิวของเส้นใยออกไป ปฏิกริยาไอโอไนเซชัน (ionization reaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของ

เซลลูโลสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แสดงดังสมการที่ 6 ในการปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างผงซีลีอ์ไมท์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้มากขึ้น



4.1.1.1 ผลการทดสอบ FTIR



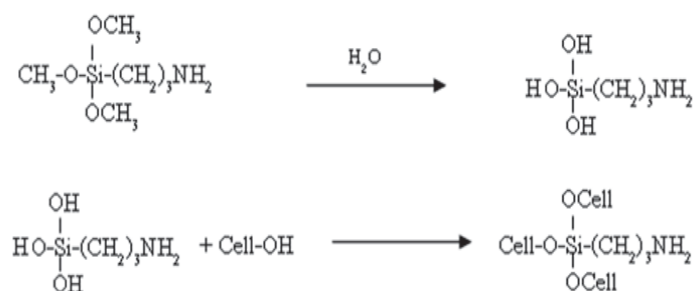
ภาพที่ 36 แสดง FTIR สเปกตรัมของสารกึ่งควบไซเลนและพอลิคาร์บอนเอตคอมพอสิต (ก) Z6011 silane (ข) TMS silane (ค) Neat PC (ง) PC/W-Untreated (จ) PC/W-NaOH (ฉ) PC/W-Z6011 และ (ช) PC/W-TMS

จากภาพที่ 36 แสดงผลของการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีอ์ไมท์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลีอ์ไมท์ (W) กับพอลิคาร์บอนเนต (PC) โดยใช้เทคนิค FTIR จากการพิสูจน์เอกลักษณ์จะเห็นได้ว่าพอลิคาร์บอนเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงซีลีอ์ไมท์ซึ่งได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH)

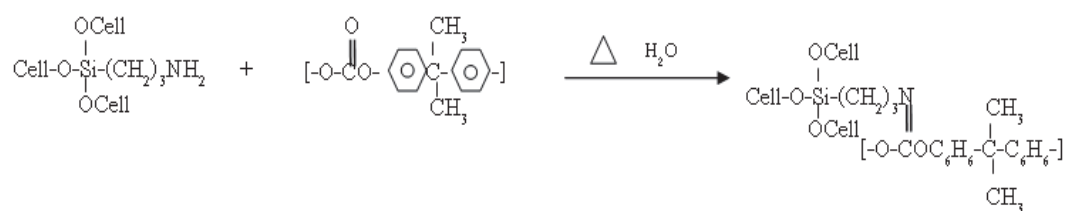
(กราฟเส้น จ) พบพิกัดเกิดขึ้นที่ wave number ประมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงการ stretching ของหมู่ $-OH$ พิกัดบริเวณนี้จะมีค่าความเข้มของพิกัดที่น้อยลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับพิกัดของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการใส่ผงซีลีอ์ไมซ์ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮดรอกซีซิลกิ้งไป (PC/W-Untreated) (กราฟเส้น ง) ซึ่งการลดลงนี้แสดงถึงการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ $-OH$ ของโมเลกุลเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลส โดยความเข้มข้นของพิกัดที่ลดลงนี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของหมู่ $-OH$ ในโมเลกุลเซลลูโลสกับไฮดรอกซีซิลกิ้ง

การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีอ์ไมซ์กับพอลิคาร์บอเนตจะทำได้โดยใช้สารคู่ควบไฮดรอกซีซิลกิ้งสองชนิด ได้แก่ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z-6011) (กราฟเส้น ก) และ N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) (กราฟเส้น ข) ซึ่งไฮดรอกซีซิลกิ้งทั้ง 2 ชนิดนี้ ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่เหมือนกันคือหมู่ NH_2 โดยพิกัดเอกลักษณ์ของ $-NH$ ซึ่งเป็น weak peak อยู่ที่ประมาณ $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ $-[O-CO-O-]$ ของพอลิคาร์บอเนตผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) นอกจากนี้ยังมีพิกัดเอกลักษณ์ของ C-N stretching ของหมู่เอมีนซึ่งปรากฏในช่วง $1000-1250\text{ cm}^{-1}$ จากภาพที่ 36 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันในวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมซ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยไฮดรอกซีซิลกิ้งที่ได้จากเทคนิค FTIR ของทั้งคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอ์ไมซ์ที่ปรับปรุงผิวด้วยไฮดรอกซีซิลกิ้งชนิด Z6011 (กราฟเส้น ค) และปรับปรุงผิวด้วยไฮดรอกซีซิลกิ้ง TMS (กราฟเส้น ข) ได้แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซึ่งปรากฏพิกัดที่ wave number ประมาณ 1017 cm^{-1} โดยเป็นพิกัดของ C-N stretching ของหมู่เอมีนเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีถึงปฏิกิริยาควบแน่นระหว่าง hydrolyzed silane และหมู่ไฮดรอกซีลของเซลลูโลส ดังเช่นปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซีซิลกิ้งชนิด Z-6011 กับพอลิคาร์บอเนตที่เคยถูกศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [27] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผงซีลีอ์ไมซ์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮดรอกซีซิลกิ้งชนิด Z-6011 เป็นไปดังภาพที่ 37 และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผงซีลีอ์ไมซ์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไฮดรอกซีซิลกิ้งชนิด Z-6011 และ TMS กับพอลิคาร์บอเนต เป็นไปดังภาพที่ 38 พิกัดที่ปรากฏอีกหนึ่งพิกัดที่ wave number ประมาณ 1610 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของพันธะ $C=N$ ซึ่งเป็นของสารประกอบ imines

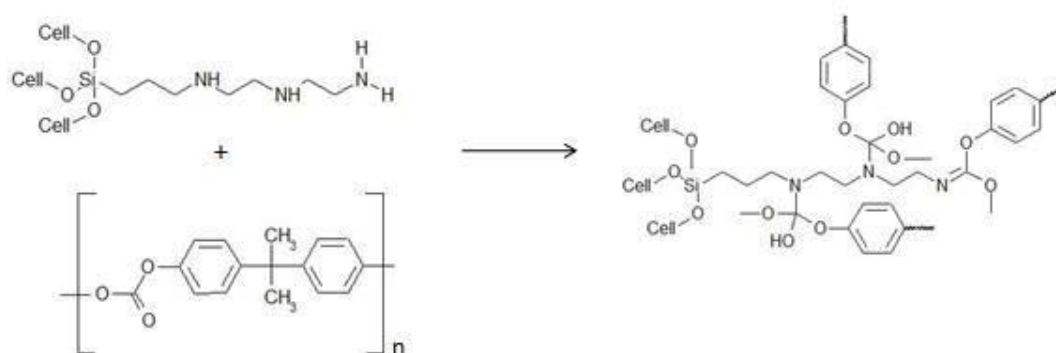
จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของคอมพอสิตทั้ง 2 ชนิด PC/W-Z6011 และ PC/W-TMS ซึ่งตรวจพบพิกัดของ $C=N$ และ $C-N$ สามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบไฮดรอกซีซิลกิ้งกับพอลิคาร์บอเนตได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 37 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนชนิด Z-6011 กับโครงสร้างเซลลูโลสในผงซีลี้อยไม้ [27]

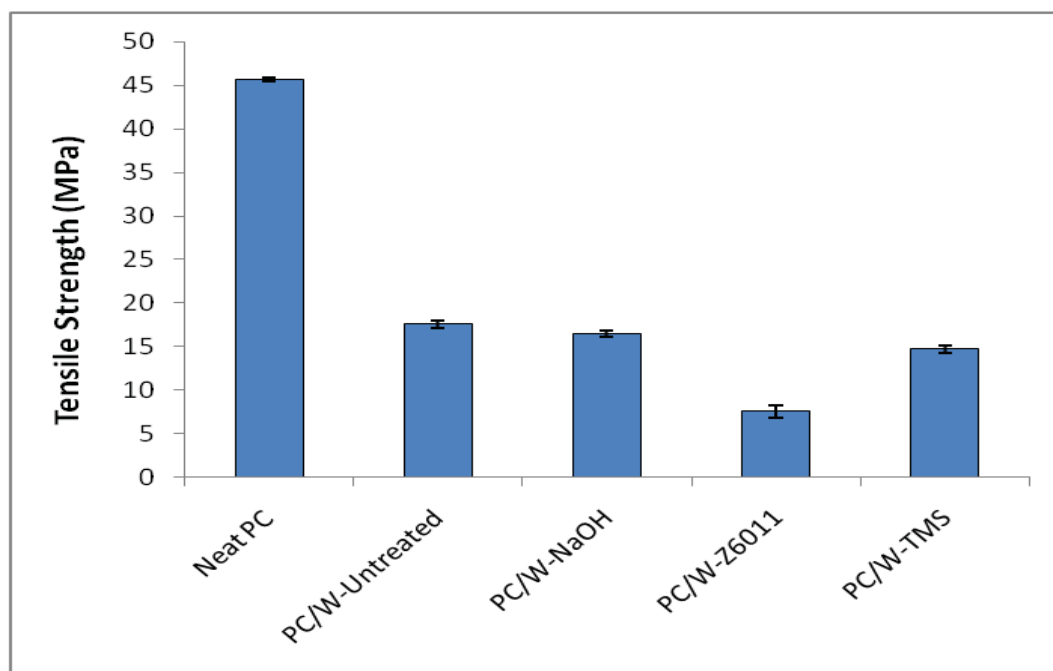


(ก)

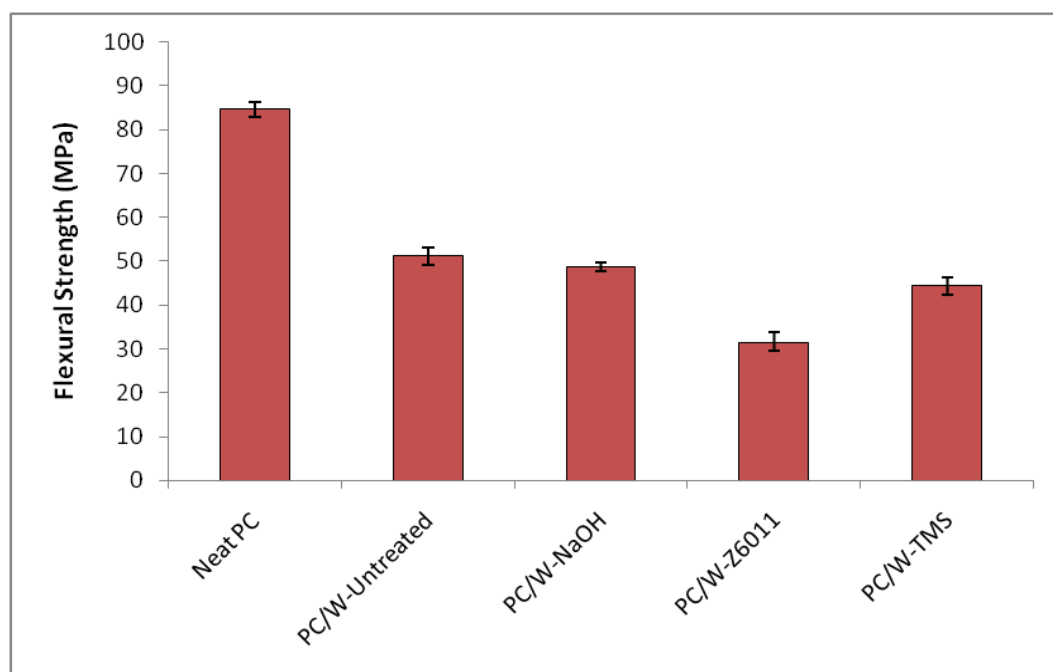


(ข)

ภาพที่ 38 แสดงกลไกปฏิกิริยาระหว่างผงซีลี้อยไม้ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนชนิด (ก) Z6011 (ข) TMS กับพอลิคาร์บอนेट



ภาพที่ 39 แสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต



ภาพที่ 40 แสดงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

4.1.1.2 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

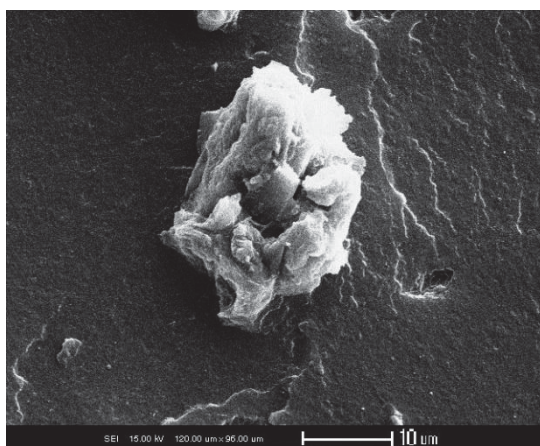
จากภาพที่ 39 ซึ่งแสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลีอไมท์ทั้งที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH) และที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว (PC/W-Untreated) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) โดยทั่วไปพอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง มีสมบัติเชิงกลที่ดีโดยตัวของมันเองอยู่แล้ว การเติมอนุภาคผงซีลีอไมท์ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าลงไปจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตลดลง และเนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์กับวัสดุจำพวกเซลลูโลสจึงอาจทำให้มีช่องว่าง (void) เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อหรือผิวสัมผัสของผงซีลีอไมท์กับพอลิคาร์บอเนต ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นจุดบกพร่อง (defect) ในชิ้นงาน ดังตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM แสดงในภาพที่ 41 ค ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่องว่าง (void) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน การเติมผงซีลีอไมท์ลงไปโดยไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือคำนึงถึงความเข้ากันได้ระหว่างตัวพอลิเมอร์เมตริกซ์จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างผิวของผงซีลีอไมท์กับเนื้อพอลิเมอร์มีน้อย ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรง บริเวณที่เป็นช่องว่าง (void) ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดการแตกหักขึ้นก่อนเป็นส่วนแรก เนื่องจากไม่สามารถทำการส่งผ่านแรงไปยังส่วนอื่นๆ ได้ และจะทำให้ภายในเนื้อวัสดุเกิด crack propagation ทำให้รอยแตกหักที่เกิดขึ้นขยายไปทั่วทั้งชิ้นงาน จนในที่สุดส่งผลให้เกิดการแตกหักขึ้นของทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้ค่า tensile strength ของ PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PC

การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อการปรับปรุงผิวของผงซีลีอไมท์พบว่าค่า tensile strength ของ PC/W-NaOH ซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีอไมท์แล้ว มีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ PC/W-Untreated ซึ่งเป็นคอมพอสิตของผงซีลีอไมท์ที่ยังผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

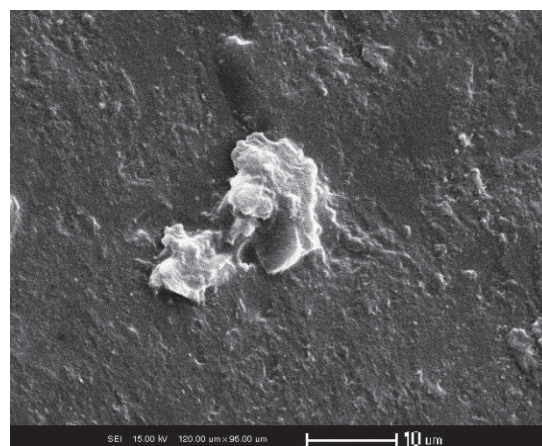
จากภาพที่ 40 แสดงถึงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต วัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีอไมท์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH) และที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว (PC/W-Untreated) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) ซึ่งผลการทดสอบนั้นเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับผลของค่า tensile strength และสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน นั่นคือการเติมผงซีลีอไมท์ลงไปโดยไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือคำนึงถึงความเข้ากันได้ระหว่างตัวพอลิเมอร์เมตริกซ์จะทำให้เกิดช่องว่าง (void) เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อหรือผิวสัมผัสของผงซีลีอไมท์กับพอลิคาร์บอเนต ส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างผิวของผงซีลีอไมท์กับเนื้อพอลิเมอร์มีน้อย

ลิเมอร์มีน้อย โดยช่องว่างนี้ยังอาจเกิดจากการสลายตัวของผงซีลี้อยไม้ ซึ่งจากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าผงซีลี้อยไม้เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220°C และ ณ อุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป ($230\text{--}240^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการสลายตัวไปประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของผงซีลี้อยไม้ ช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นจุดบกพร่อง (defect) ที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงเค้นงอ และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้ก็ยังทำให้โครงสร้างเซลล์ูโลสมีความแข็งแรงลดลงด้วย เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เข้าไปทำลายโครงสร้างผลึกของเซลล์ูโลส ส่งผลให้ค่า flexural strength ของ PC/W-NaOH (48.6 MPa) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PC/W-Untreated (51.2MPa)

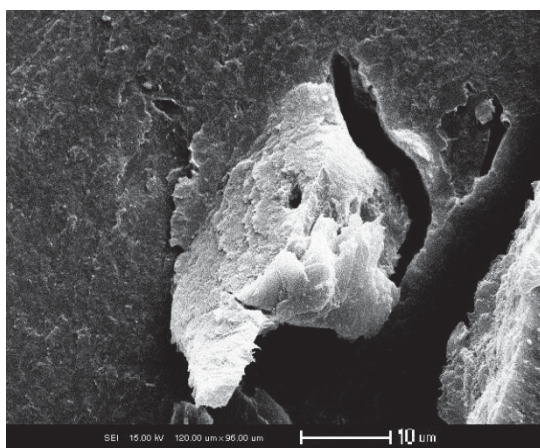
จากภาพที่ 39 และ 40 เมื่อพิจารณาผลของการปรับปรุงผิวของผงซีลี้อยไม้ด้วยไซเลน 2 ชนิด คือ N-(3-Trimethoxysilypropyl) diethylenetriamine (TMS) และ γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z6011) ที่มีต่อ tensile strength และ flexural strength ของวัสดุคอมพอสิต พบว่าค่า tensile strength และ flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยไม้ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนชนิด TMS (PC/W-TMS) จะมีทั้งค่า tensile strength และ flexural strength ที่สูงกว่าคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยไม้ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Z6011 (PC/W-Z6011) ดังนั้นไซเลนชนิด TMS จึงน่าจะแสดงผลของการช่วยในการยึดติดกันหรือปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่าไซเลนชนิด Z6011 โดยเหตุผลที่ทำให้ไซเลนชนิด TMS สามารถแสดงประสิทธิภาพในการช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่านั้น น่าจะเนื่องมาจากโครงสร้างของตัว TMS ซึ่งมีหมู่อะมิโนที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของพอลิคาร์บอเนตได้ด้วยกันถึง 3 หมู่ จึงอาจเกิดปฏิกิริยาที่ช่วยในการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวได้มากกว่าไซเลนชนิด Z6011 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างไซเลนชนิด TMS กับพอลิคาร์บอเนตน่าจะเป็นไปดังภาพที่ 38 ข จากโครงสร้างดังกล่าวสามารถทำให้การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปยังผงซีลี้อยไม้เกิดได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างการเชื่อมต่อที่เกิดจากการใช้ไซเลนชนิด Z6011 (ภาพที่ 38 ก) ในการปรับปรุง ดังนั้นจึงส่งผลในการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับและกระจายแรงทำให้ค่า strength ของ PC/W-TMS สูงกว่าคอมพอสิตชนิด PC/W-Z6011 ซึ่งจากผลการทดลองกลับพบว่าแม้ว่าเราใช้ไซเลนทั้งสองชนิดช่วยในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิต แม้จะมีการใช้ไซเลนช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันได้แล้วก็ตาม แต่ก็ยังคงมีบางส่วนของพื้นผิวที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง เมื่อรวมถึงผลของ



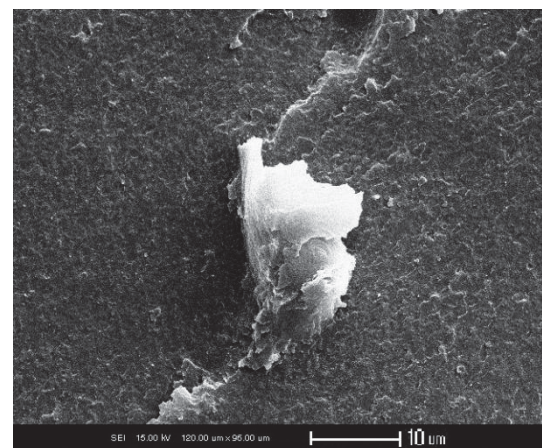
(ก)



(ข)



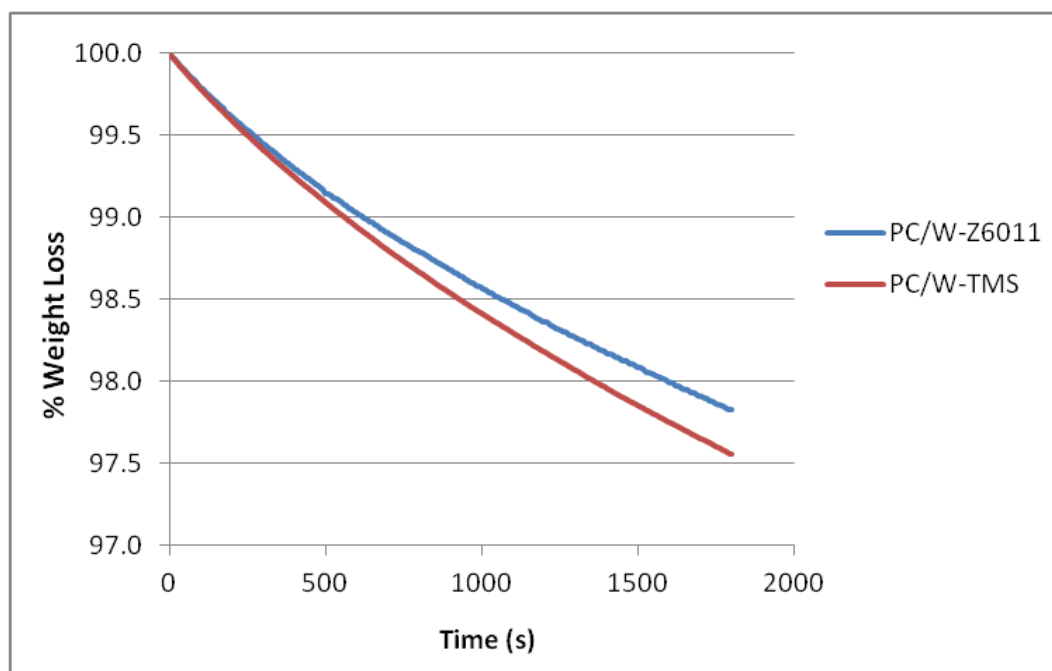
(ค)



(ง)

ภาพที่ 41 แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต (ก) PC/W-Untreated (ข) PC/W-NaOH (ค) PC/W-Z6011 และ (ง) PC/W-TMS ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ความไม่เข้ากันอยู่เดิมของวัสดุจำพวกเซลลูโลสกับวัสดุพอลิเมอร์ อีกทั้งความแข็งแรงของผงซีลีเยอไม้ที่น้อยกว่าตัวพอลิคาร์บอเนตจึงส่งผลให้ค่า tensile strength และ flexural strength มีค่าน้อยกว่า Neat PC อยู่ดี



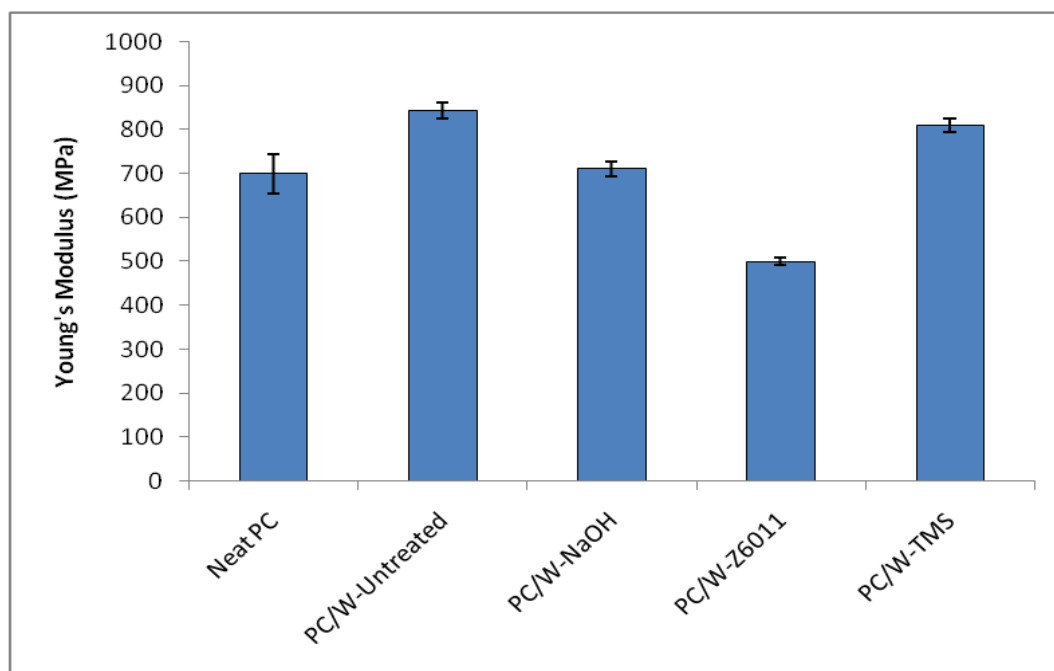
ภาพที่ 42 แสดง TGA thermogram ของพอลิคาร์บอนเอตคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ด้วยไซเลน ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

เมื่อทำการพิจารณาค่า tensile strength ของคอมพอสิตที่มีการใช้และไม่ได้ใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิว พบว่า PC/W-TMS มีค่า tensile strength ต่ำกว่า PC/W-Untreated เล็กน้อย (17.56 MPa สำหรับ PC/W-Untreated และ 14.74 MPa สำหรับ PC/W-TMS) ซึ่งค่า flexural strength ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่คอมพอสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยไซเลน Z6011 (PC/W-Z6011) มีค่า tensile strength และ flexural strength ที่ต่ำกว่าพอลิคาร์บอนเอตบริสุทธิ์ (Neat PC) และวัสดุคอมพอสิตที่ผ่านการปรับปรุงด้วย NaOH และไซเลนชนิด TMS จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวผงซีลี้อยู่ด้วยไซเลนไม่ได้มีส่วนช่วยให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของคอมพอสิตลดลง (ในกรณีของ PC/W-Z6011) ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปมีผลทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์บางส่วน มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง นอกจากนี้การขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์ยังทำให้การส่งผ่านแรงภายในพอลิเมอร์เมตริกซ์เป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของคอมพอสิตโดยรวมลดลง แต่จาก TGA thermogram (ภาพที่ 42) จะเห็นได้ว่า ณ สภาวะขึ้นรูป (compression) ที่ได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลานานๆ พอลิคาร์บอนเอตคอมพอสิตมีการสลายตัวไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 2.5% โดยน้ำหนัก)

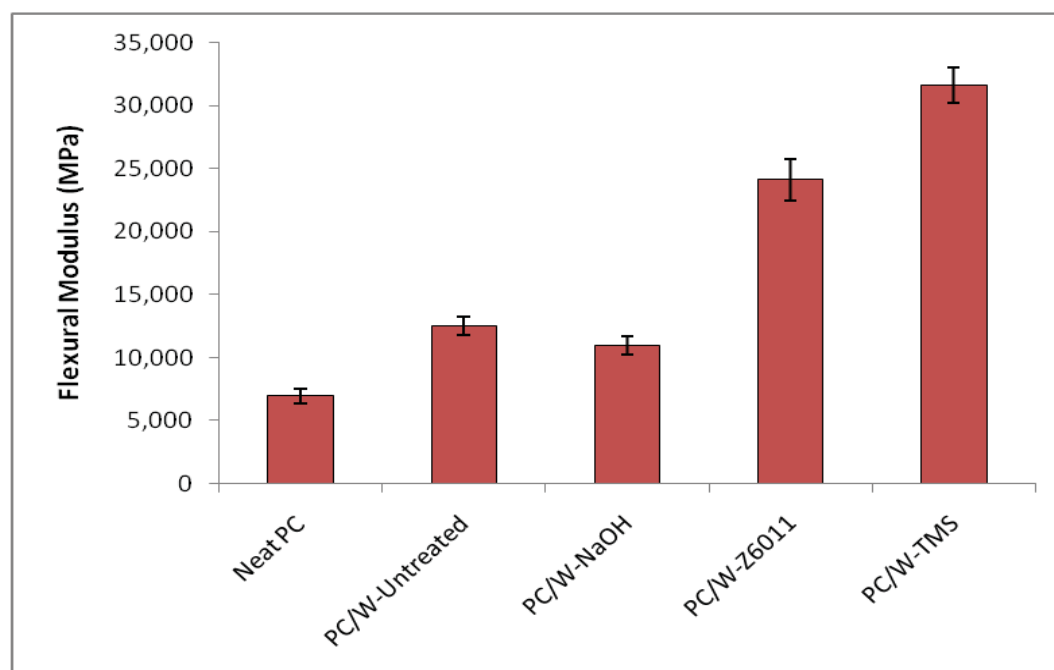
ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงไม่น่าจะทำให้มีการขาดออกจากกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่ลดลงจึงเป็นเรื่องที่อธิบายได้ค่อนข้างยาก

โดยปกติอนุภาคของผงไม้ที่ไม่เกิดการยึดติดกับเมทริกซ์จะก่อตัวเป็นช่องว่างเล็กๆ เกิดขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของความ stiffness ในโครงสร้างของคอมพอสิต ยิ่งไปกว่านั้นช่องว่างเล็กๆอาจรวมตัวเกิดเป็นช่องว่างที่ใหญ่ขึ้นและนำไปสู่จุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว [29] ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดลงของค่า tensile strength และอาจเกิดการแตกหักของชิ้นงานได้ เหตุผลที่ได้อธิบายไปนั้นได้รับการสนับสนุนจากภาพที่ 41 ค โดยจะเห็นได้ว่ามีบริเวณที่เป็นช่องว่าง (void) เกิดขึ้นในชิ้นงานของ PC/W-Z6011 โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้เกิดระหว่างพื้นผิวของอนุภาคผงไม้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์มาจากการยึดติดกันไม่ได้มีระยะห่างพื้นผิว ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นส่วนที่ไม่สามารถทำการส่งผ่านแรงไปยังส่วนอื่นๆ ได้ ทำให้มันจะเกิดการแตกหักขึ้นก่อนเป็นส่วนแรก จนเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย ส่งผลให้ค่า tensile strength และ flexural strength มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตอื่นๆ ในระบบ

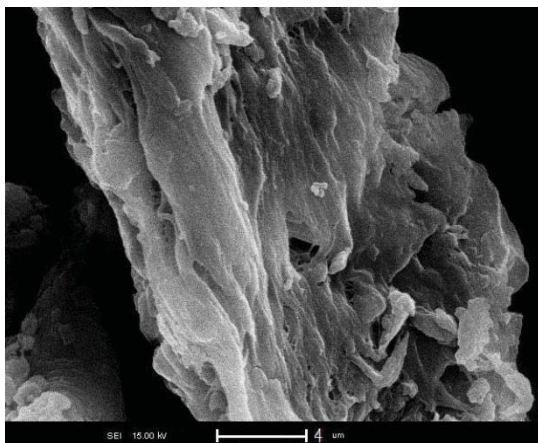
จากภาพที่ 43 แสดงค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงใดๆ ผงไม้ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมที่แตกต่างกัน 2 ชนิด พบว่าค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 699 MPa สำหรับ neat PC ไปเป็น 842 MPa สำหรับ PC/W-Untreated เนื่องจากลิกนิน เป็นสารที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งในไม้ที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นวงเบนซีน ซึ่งโครงสร้างนี้ทำให้ตัวมันมีความ stiffness การเติมผงไม้ลงไปจึงเป็นการเพิ่มเฟสที่มีความ rigid ในเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้มากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างพื้นผิวของผงไม้จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเซลลูโลสและส่วนที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การทำ alkaline treatment หรือปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นการกำจัดลิกนินออกไป โดยตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM จะเห็นได้ว่าอนุภาคผงไม้ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ภาพ 45 ก) จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ แต่หลังจากผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคผงไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว พื้นผิวจากที่มีลักษณะขรุขระจะมีความเรียบของพื้นผิวมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ภาพ 45 ข) จากการที่ลิกนินและไขมันบริเวณพื้นผิวหลุดออกไป ทำให้อนุภาคของผงไม้มีขนาดเล็กลง (ภาพ 45 ง) เมื่อโครงสร้างที่มีความ stiffness ถูกกำจัดออกไปรวมถึงขนาดอนุภาคที่เล็กลงจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของอนุภาคผงไม้ที่มีลดลงไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า ค่า Young's modulus ของ PC/W-NaOH มี คำน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PC/W-Untreated



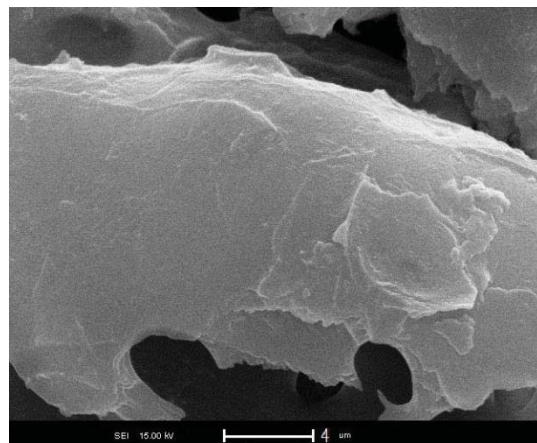
ภาพที่ 43 แสดงค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอนเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนต



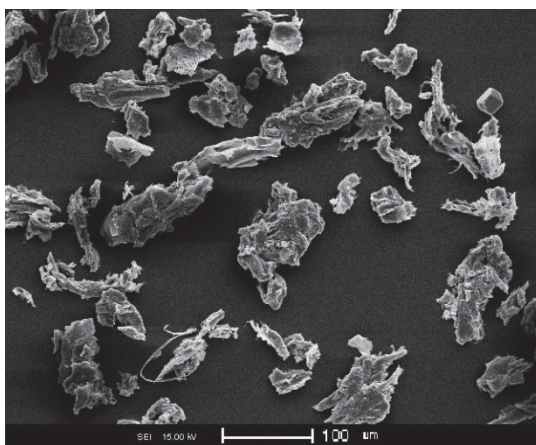
ภาพที่ 44 แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอนเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนต



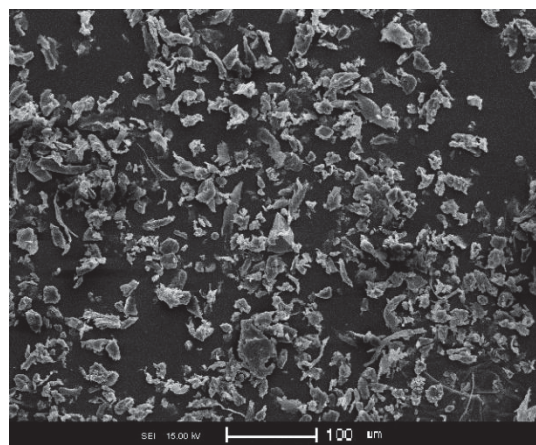
(ก)



(ข)



(ค)



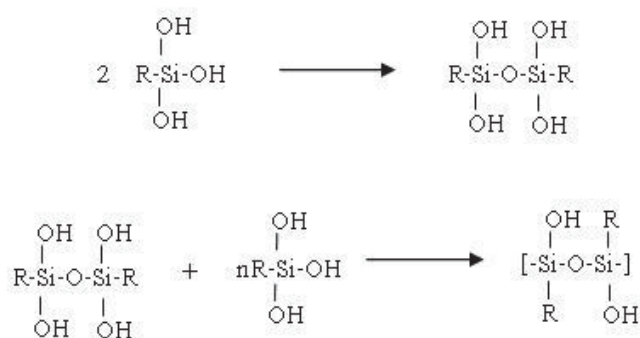
(ง)

ภาพที่ 45 แสดงพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้ (ก) Wood-Untreated (ข) Wood-NaOH ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (ค) Wood-Untreated และ (ง) Wood-NaOH ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงซีลี้อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไฮเลน TMS และ Z6011 (ภาพที่ 43) จากการทดสอบพบว่า ค่า Young's modulus ของ PC/W-TMS (809 MPa) มีค่าสูงกว่า PC/W-Z6011 (500 MPa) อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากเหตุผลเดียวกันกับผลของ tensile strength และ flexural strength คือไฮเลนชนิด TMS ได้แสดงผลของการช่วยในการยึดติดกันหรือปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยได้กับพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่าไฮเลนชนิด Z6011 จากปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างไฮเลนชนิด TMS กับพอลิคาร์บอเนตดังภาพที่ 38 ข ทำให้การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์

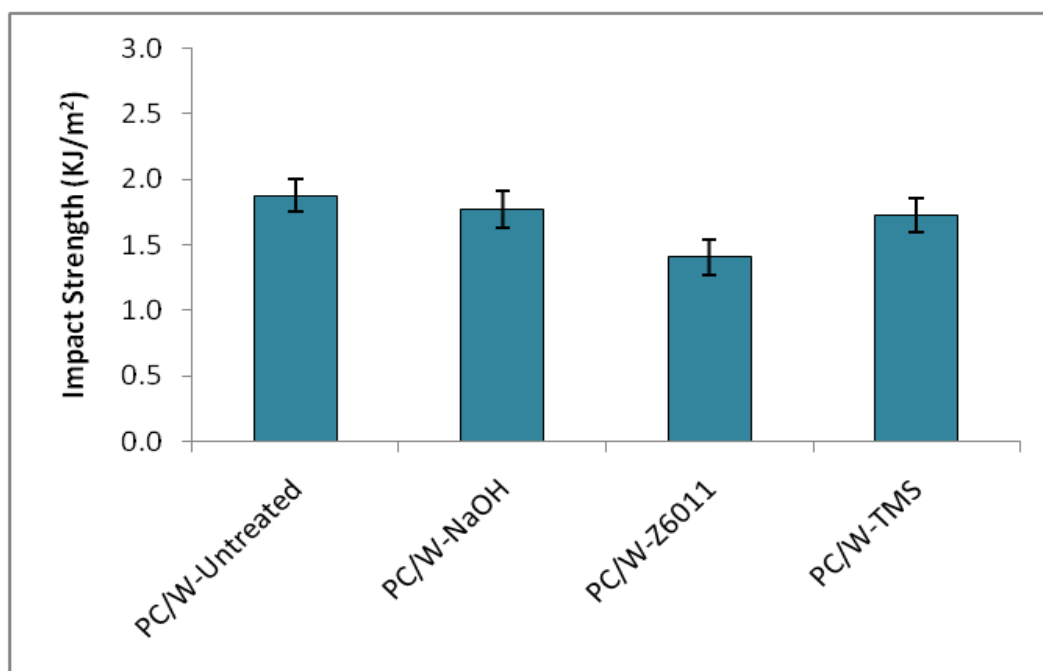
เมตริกซ์ไปยังผงซีลีอ์ไม่เกิดได้ ดีกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างการเชื่อมต่อที่เกิดจากการใช้ไซเลนชนิด Z6011 ดังภาพที่ 38 ก ดังนั้นผลของค่า Young's modulus จึงเป็นไปในแนวโน้มนเดียวกันกับค่า tensile strength และ flexural strength เมื่อทำการพิจารณาผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-TMS จะเห็นได้ว่าคอมพอสิตทั้งสองชนิดนี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกันซึ่งถือว่าค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-TMS มีค่าไม่แตกต่างกัน ในส่วนของ PC/W-Z6011 ก็ให้ผลเป็นไปในแนวโน้มนเดียวกันกับค่า tensile strength และ flexural strength คือมีค่า Young's modulus ที่น้อยที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะเนื่องมาจากบางส่วนของสารคู่ควบไซเลน Z6011 ที่เติมลงไปไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ OH บนพื้นผิวของผงซีลีอ์ โดยไซเลน Z6011 เกิดการพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิไซเลน หรือพอลิซิลอกเซน (Polysiloxane) ขึ้นในวัสดุคอมพอสิต ดังแสดงในภาพที่ 46 ซึ่งพอลิซิลอกเซน ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าไปทำหน้าที่เป็นเสมือนพลาสติกไซเซอร์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น [27, 38] ดังนั้นค่า Young's modulus ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการรับแรงหรือรักษารูปร่างในช่วงที่เป็นอีลาสติกก่อนที่วัสดุจะเกิดการแตกหักเสียหายจึงมีค่าต่ำกว่าคอมพอสิตตัวอื่นๆ

ภาพที่ 44 แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยผงซีลีอ์ไม่ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง (PC/W-Untreated) และที่ผ่านการปรับปรุงแล้วด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ (PC/W-NaOH) มีแนวโน้มเหมือนกับค่า Young's modulus คือ flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH สูงกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) ซึ่งน่าจะเป็นผลของความ stiffness ของสายโซ่เซลลูโลสที่แม้ว่าจะยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวกับพอลิเมอร์ก็ตาม แต่ความ stiffness ของโครงสร้างผงซีลีอ์ไม่ก็ช่วยเพิ่มค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตให้เพิ่มขึ้น และเมื่อได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่า flexural modulus ก็มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับผลของ Young's modulus ซึ่งเหตุผลที่สามารถอธิบายได้ก็เป็นเช่นเดียวกัน คือโครงสร้างของลิกนินที่มีความ stiffness สูงถูกขจัดออกไป



ภาพที่ 46 แสดงปฏิกิริยาการเกิดพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane) [27]

สำหรับค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต โครงสร้างผงซีเลียมที่มีความ stiffness ได้มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการปรับปรุงค่า modulus ของคอมพอสิต ยิ่งเมื่อทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีเลียมและพอลิคาร์บอเนตด้วยสารคู่ควบไซเลน จะเห็นได้ว่าค่า flexural modulus ของทั้ง PC/W-TMS และ PC/W-Z6011 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Neat PC) และ PC/W-Untreated โดยมีค่าเพิ่มจาก 6,943 MPa สำหรับ Neat PC และ 12,529 สำหรับ PC/W-Untreated ไปเป็น 24,132 MPa สำหรับ PC/W-Z6011 และ 31,590 MPa สำหรับ PC/W-TMS ค่า flexural modulus ที่เพิ่มขึ้นมาอย่างมากรนี้เป็นผลมาจากการที่ไซเลนได้เข้าไปช่วยในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับอนุภาคของผงซีเลียม เมื่อได้รับแรงโค้งงอวัสดุจะสามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปได้มากเนื่องจากการเชื่อมต่อกันนี้ไปช่วยในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้การจัดเรียงตัวตามแนวแรงที่ได้รับเป็นไปได้อย่างยากขึ้น เมื่อพิจารณาค่า flexural modulus ของไซเลนทั้งสองชนิดจะเห็นได้ว่าการใช้ไซเลนชนิด TMS จะให้ผลของการปรับปรุง modulus ที่ดีกว่า ซึ่งเหตุผลก็มาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างตัวไซเลนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ทำให้ความแข็งแรงของการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวมีมากกว่า การเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อได้รับแรงจึงเป็นไปได้อย่างยากกว่า



ภาพที่ 47 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

จากภาพที่ 47 จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลี้อยู่ไม่ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่า impact strength ที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (81.15 kJ/m^2) ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนตรวมถึงแรงยึดเกาะบริเวณพื้นผิว (Interface adhesion) ผงซีลี้อยู่ไม่ที่ใส่เข้าไปจึงไปเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานและจุดเริ่มต้นของการแตกหัก เมื่อชิ้นงานได้รับแรงเข้าไปอย่างทันทีทันใดผงซีลี้อยู่ไม่ที่ใส่เข้าไปจึงไม่สามารถช่วยในการดูดซับแรงให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ทัน จากค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH จะเห็นได้ว่าคอมพอสิตทั้งสองชนิดนี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกันซึ่งถือว่าค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-NaOH มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม่ด้วยโซเลน จะเห็นได้ว่าคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม่ด้วยโซเลนทั้ง 2 ชนิด ยังคงมีค่า impact strength ที่ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ แม้ว่าจะมีการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวแล้ว แต่จากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนต รวมถึงความแข็งแรงของ

อนุภาคผงขี้เลื่อยไม้ที่มีน้อยกว่าพอลิคาร์บอเนตมาก ทำให้ผงขี้เลื่อยไม้ที่ใส่เข้าไปเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานและจุดเริ่มต้นของการแตกหักเมื่อชิ้นงานได้รับแรง เนื่องจากไม่สามารถช่วยในการดูดซับแรงให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวผงขี้เลื่อยไม้ด้วยโซเลนชนิด TMS (PC/W-TMS) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกันกับคอมพอสิตของ PC/W-Untreated จึงถือว่าค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของทั้ง PC/W-Untreated และ PC/W-TMS มีค่าไม่แตกต่างกัน การปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเลนจึงไม่ได้มีส่วนช่วยในการปรับปรุงค่า impact strength ให้สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาในส่วน of PC/W-Z6011 จะพบว่ามีค่า impact strength ที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอมพอสิตอื่นๆ ในระบบ ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากช่องว่าง (void) ที่ได้รับการยืนยันจากภาพที่ 41 ค ช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์ไม่สามารถทำการส่งผ่านแรงไปยังส่วนอื่นๆ ได้ ส่งผลให้มันเกิดการแตกหักขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด

4.1.1.3 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ในงานวิจัยนี้สมบัติการเป็นฉนวนความร้อน (Thermal insulation) ของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงขี้เลื่อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตจะถูกทำการตรวจสอบ โดยการวัดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ซึ่งแสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 7 การนำความร้อนคือความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งในทิศทางปกติ โดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวทั้งสอง [36] จากการทดสอบพบว่า การเติมผงขี้เลื่อยไม้แม้จะยังไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวลงไปก็สามารถที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนให้กับพอลิคาร์บอเนต (neat PC) ได้ ค่าการนำความร้อนของ Neat PC ที่มีค่า 0.1650 W/m K มีค่าลดลงเมื่อมีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ลงไปเหลือ 0.1088 W/m K (สำหรับ PC/W- Untreated) และ 0.1081 W/m K (สำหรับ PC/W- NaOH) เนื่องจากโดยปกติแล้วค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) หรือ K value ของไม้ ($K \sim 0.08$ W/m K) มีค่าน้อยกว่าวัสดุจำพวกพลาสติก ดังนั้นเมื่อทำการเติมผงขี้เลื่อยไม้ลงไปเฟสของผงขี้เลื่อยไม้จึงไปลดความสามารถในการนำความร้อนของพอลิเมอร์ให้น้อยลง ทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น ส่วนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นแทบจะไม่ส่งผลใดๆ ต่อสมบัติการนำความร้อนของคอมพอสิตเลย ซึ่งจะเห็นได้จากค่าการนำความร้อนของ PC/W- Untreated และ PC/W- NaOH ที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 7 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ที่ปริมาณการใช้ผงซีลีเนียม 10% โดยน้ำหนักของคอมพอสิต

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
Neat PC	0.1650 ± 0.0018
PC/W- Untreated	0.1088 ± 0.0023
PC/W- NaOH	0.1081 ± 0.0003
PC/W- Z6011 1.0%	0.0904 ± 0.0004
PC/W- TMS 1.0%	0.0941 ± 0.0002

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าคอมพอสิตที่ใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีเนียมจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับทั้ง Neat PC และ PC/W-Untreated เหตุผลที่เกิดการลดลงของค่าการนำความร้อนในคอมพอสิตนั้นอาจเกิดจากผลของพอลิไซลอกเซน (Polysiloxanes) ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าค่าการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตคืออยู่ที่ประมาณ 0.13 W/m K [34] จึงพอที่จะคาดเดาได้ว่าพอลิไซลอกเซนที่เกิดขึ้นระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวมีผลต่อการลดลงของค่าการนำความร้อนในวัสดุคอมพอสิต โดยวัสดุคอมพอสิต PC/W-Z6011 มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS, PC/W-NaOH และ PC/W-Untreated ซึ่งน่าจะเกิดจากผลของช่องว่างที่มีในคอมพอสิต (ดูได้จากภาพที่ 41 ค) ทำให้สมบัติในการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Z6011 มีค่าต่ำที่สุด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนเฉพาะในคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้ไซเลนด้วยกันเอง จะเห็นได้ว่ามีค่าการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกันมากนักคือ 0.0904 W/m K สำหรับ PC/W-Z6011 และ 0.0941 W/m K สำหรับ PC/W-TMS

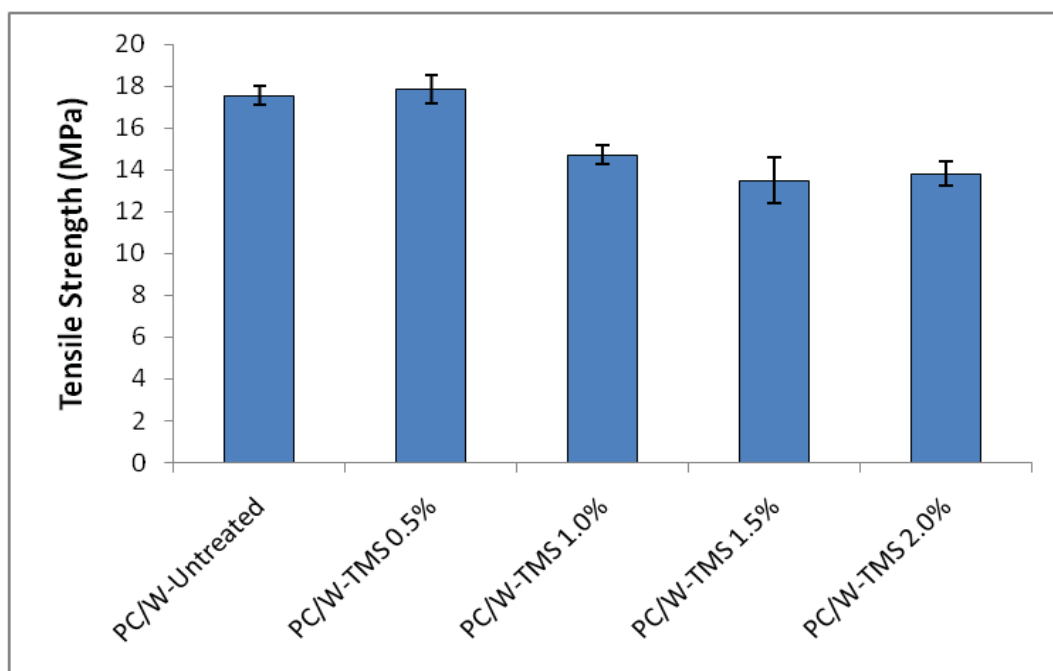
จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตที่ได้กล่าวมา จะเห็นได้ว่าการเติมผงซีลีเนียมช่วยปรับปรุงค่า modulus หรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุคอมพอสิตให้เพิ่มขึ้นได้ ในขณะที่ความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตมีค่าลดลงเมื่อเติมผงซีลีเนียมลงไป โดย PC/W- Untreated, PC/W- NaOH และ PC/W-TMS แสดงค่า strength และ Young's modulus ที่มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ PC/W-Z6011 ให้ค่า strength และ Young's modulus ที่ต่ำที่สุด โดยในส่วนของ flexural modulus ซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงโค้งงอ คอมพอสิตของ PC/W-TMS แสดงค่าการปรับปรุงที่ดีที่สุด โดยสูงกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์เกือบ 5 เท่า และให้ค่าสูงกว่าคอมพอสิตซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวของผงซีลีเนียม

เฉลี่ยไม่ด้วยวิธีใดๆ เกยกว่า 2 เท่า นอกจากนี้แล้ววัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS ยังแสดงถึงการเป็นฉนวนทางความร้อนที่ดีกว่าวัสดุคอมพอสิตตัวอื่นได้ดีพอๆกับ PC/W-Z6011 ซึ่งเป็นคอมพอสิตที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสุด ดังนั้นในการวิจัยขั้นต่อไปที่จะทำการศึกษาผลของปริมาณสารก่อกวนไขเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตกับผงซีลีเนียม โดยใช้สารก่อกวนไขเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอเนต

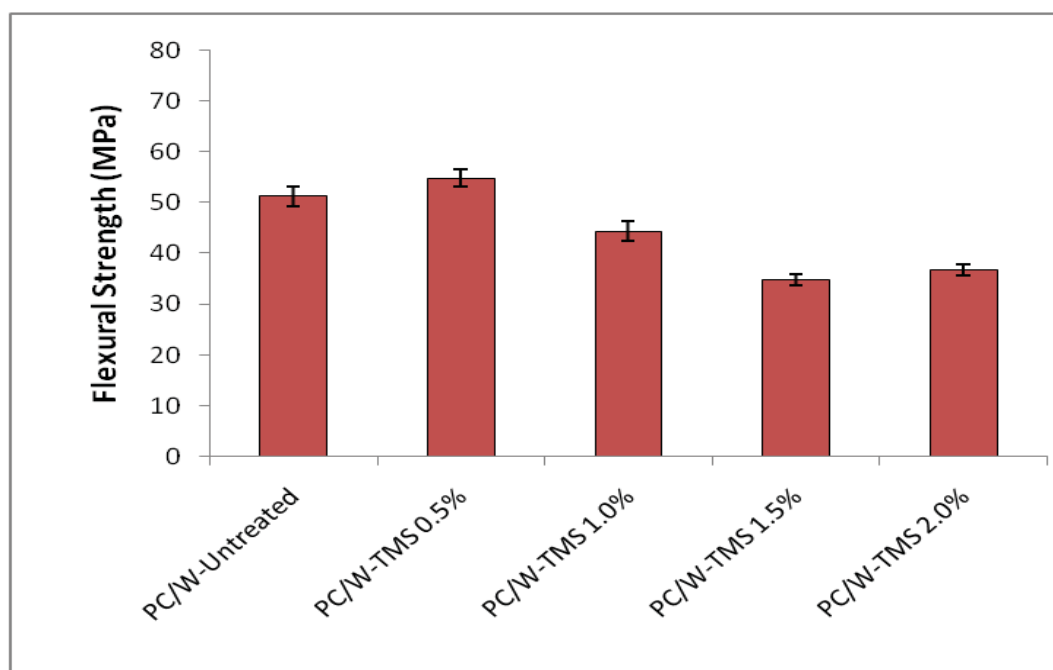
4.1.2 ศึกษาผลของปริมาณสารก่อกวนไขเลนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

4.1.2.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

โดยทั่วไปแล้วสารก่อกวนไขเลนจะเป็นสารที่ช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างพื้นผิวของตัวพอลิเมอร์เมตริกซ์กับฟิลเลอร์หรือสารเสริมแรง ผลที่ได้จากการปรับปรุงจะขึ้นอยู่กับชนิดของไขเลนและปริมาณการใช้ที่เหมาะสม จากภาพที่ 48 แสดงผลของปริมาณสารก่อกวนไขเลนชนิด TMS สำหรับปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอเนตที่มีต่อค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิต ในปริมาณการใช้ไขเลนที่ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% โดยน้ำหนัก พบว่าความเข้มข้นของ TMS ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้คืออยู่ที่ 0.5 wt.% ที่ปริมาณการใช้ TMS น้อยๆ นี้ได้ส่งผลให้เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของพอลิคาร์บอเนตกับอนุภาคผงซีลีเนียมที่ดีขึ้น สังเกตได้จากเมื่อเพิ่มปริมาณการปรับปรุงด้วยไขเลน TMS ค่า tensile strength จะมีแนวโน้มที่ลดลง แต่จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงผิว (จาก 17.56 MPa สำหรับ PC/W-Untreated ไปเป็น 17.86 MPa สำหรับ PC/W-TMS 0.5%) อาจเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา self-condensation ของสารก่อกวนไขเลนทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของสารที่มีความ flexible [39, 40] นั่นก็คือ polysiloxane ซึ่งจะเกิดบนพื้นผิวของผงซีลีเนียม โดย polysiloxane ที่เกิดขึ้นจะไปเป็นตัวขัดขวางให้ความว่องไวของการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอเนตลดลง ทำให้ความสามารถของการที่จะยึดติดกันได้ระหว่างพื้นผิวทั้งสองลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมพอสิตลดลง แนวโน้มของ tensile strength จึงมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้ TMS โดยปฏิกิริยา self condensation ของไขเลนที่ทำให้เกิดเป็น polysiloxane นั้นสามารถตรวจสอบได้



ภาพที่ 48 แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

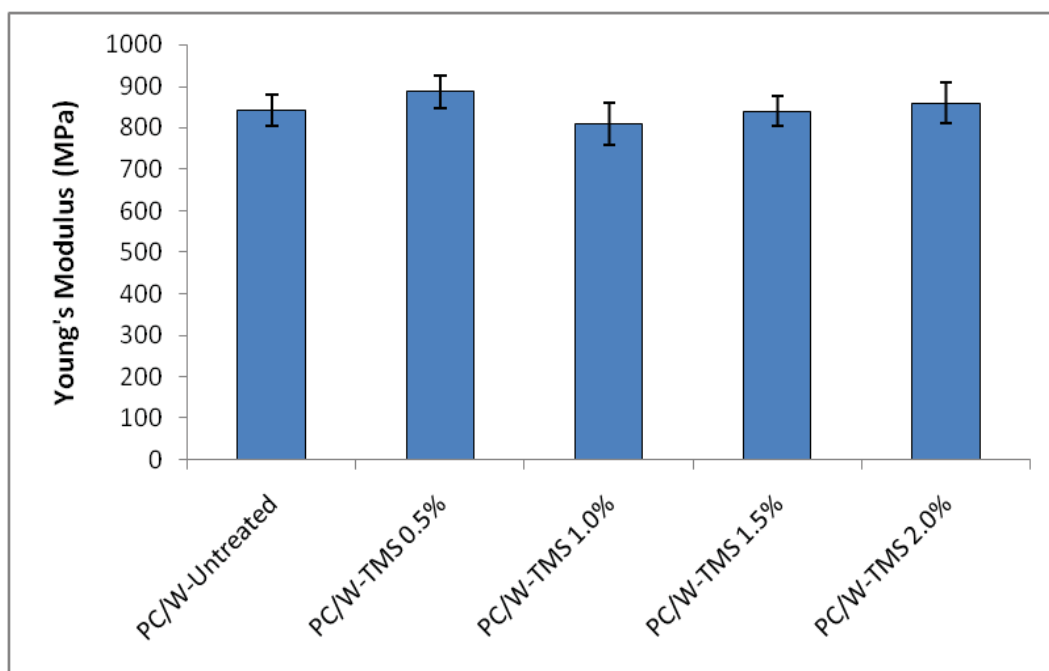


ภาพที่ 49 แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

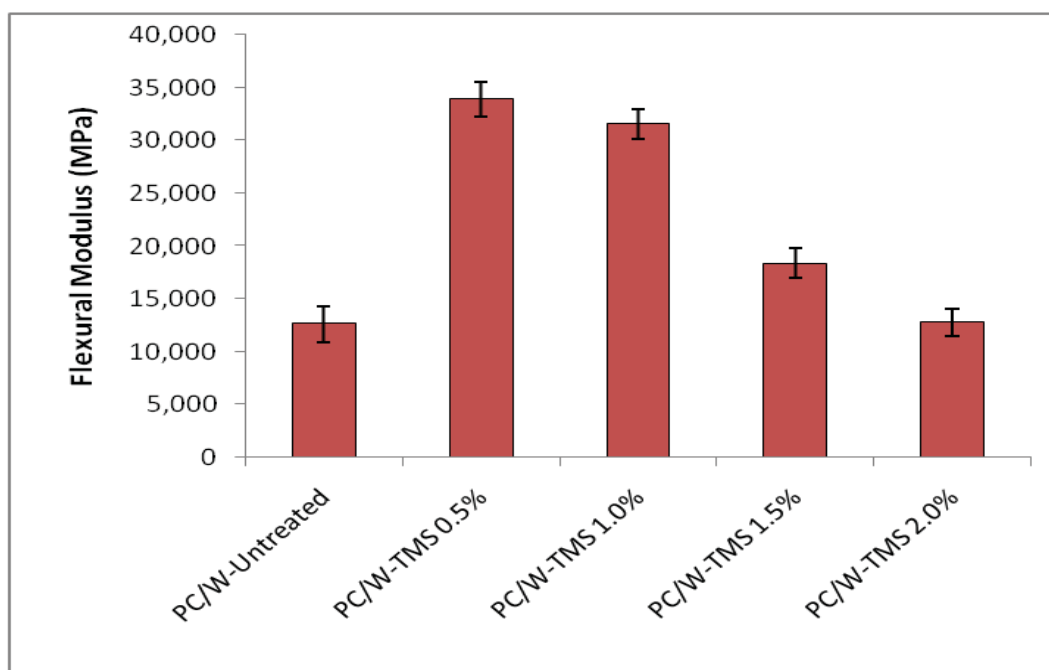
จากเทคนิค FTIR ซึ่งจะพบพีคเอกลักษณ์ของ Si-O-Si (บ่งบอกถึงการมีอยู่ของ polysiloxane) เกิดขึ้นในช่วง wave number ประมาณ $925-1105\text{ cm}^{-1}$ โดยในช่วง wave number นี้ยังพบพีคเอกลักษณ์ของ Si-O-C ($1014-1090\text{ cm}^{-1}$) (บ่งบอกถึงปฏิกิริยาการควบแน่นที่เกิดระหว่างฟังก์ชันแอลกอฮอล์และไซเลน) ได้อีกด้วย [26] ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุพีคที่แน่ชัดของการเกิด polysiloxane จาก FTIR spectrum ได้

จากภาพที่ 49 ปริมาณการใช้ไซเลน TMS ในการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวส่งผลต่อค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตในแนวโน้มเดียวกันกับค่า tensile strength คือที่ปริมาณการใช้ TMS 0.5wt% ให้ผล flexural strength ที่สูงที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนในการปรับปรุง ผลที่ได้ก็เกิดจากผลการรวมตัวของไซเลนด้วยกันเองเกิดเป็น polysiloxane ซึ่งไปส่งผลให้เกิดเป็นช่องว่างเล็กๆ ในส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว เมื่อได้รับแรงโค้งงอส่วนที่เป็นช่องว่างไม่สามารถรับหรือส่งผ่านแรงได้ ส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น ผลที่ได้จึงเป็นเช่นเดียวกันกับผลของ tensile strength

ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมฟังก์ชันแอลกอฮอล์ผ่านการปรับปรุงด้วยสารควบไซเลน TMS ในปริมาณต่างๆกัน แสดงดังภาพที่ 50 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ไซเลน TMS ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงค่า Young's modulus ของคอมพอสิตที่เด่นชัด เนื่องจาก Young's modulus ของคอมพอสิตแต่ละชนิดยังคงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงเดียวกัน แม้ว่าไซเลนชนิด TMS ได้แสดงผลของการช่วยในการยึดติดกันหรือปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของฟังก์ชันแอลกอฮอล์กับพอลิคาร์บอเนต ซึ่งแสดงให้เห็นมาแล้วในผลต่อค่า strength ของคอมพอสิต แต่สำหรับค่า Young's modulus นั้น การเกิด silinol ในคอมพอสิตจากการใช้ TMS ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ ไม่ได้ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงดึงเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน ซึ่งก็อาจเกิดจากปริมาณการรวมตัวเกิดเป็น polysiloxane ที่ไม่ได้มีปริมาณมากเกินไปจนตอบสนองต่อการรับแรงดึงอย่างเห็นได้ชัด แม้จะมีการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุงแล้วก็ตาม ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างไซเลนชนิด TMS กับพอลิคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นทำให้การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปยังฟังก์ชันแอลกอฮอล์ไม่ได้ดีไปกว่าเมื่อเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่ได้รับการปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งจะเห็นได้จากผลของ flexural modulus ดังแสดงในภาพที่ 51 คอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตในทุกปริมาณการปรับปรุงด้วยไซเลน TMS ได้แสดงให้เห็นถึงค่า flexural modulus ที่เพิ่มขึ้น จาก 12,643 MPa สำหรับ PC/W-Untreated ไปเป็น 33,876 MPa สำหรับ PC/W-TMS 0.5% ซึ่งเป็นปริมาณการใช้ที่ส่งผลให้ได้ค่า flexural modulus สูงที่สุด เนื่องจากไซเลนได้เข้าไปช่วยในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เมตริกซ์กับอนุภาคของฟังก์ชันแอลกอฮอล์ เมื่อได้รับแรงโค้งงอวัสดุจะสามารถ

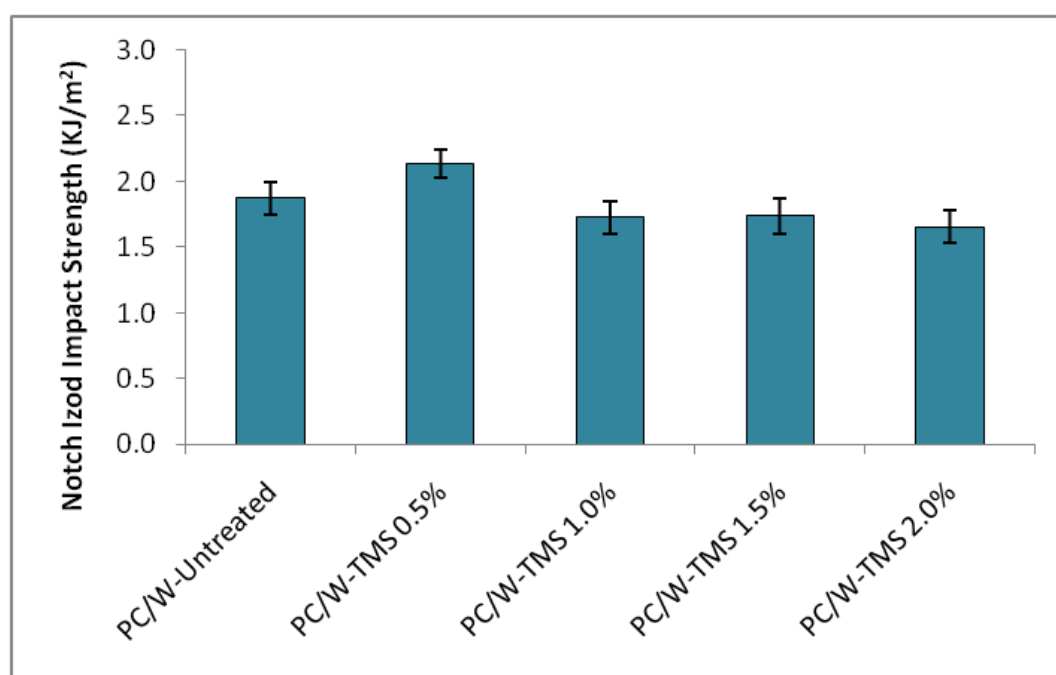


ภาพที่ 50 แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วย ไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 51 แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วย ไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปได้มาก จากการเกิดการยึดติดกันที่แข็งแรงมากขึ้นนี้ไปช่วยในการจัดวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้การจัดเรียงตัวตามแนวแรงที่ได้รับเป็นไปได้ง่ายขึ้น เนื่องจากการรับแรงโค้งงอแตกต่างจากการรับแรงแบบดึงยืด ดังนั้นการเกิด polysiloxane จึงส่งผลอย่างมากต่อความ stiffness ของคอมพอสิต เมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุงจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนด้วยกันเองมีมากขึ้น การเกิด polysiloxane จึงเพิ่มมากขึ้นทำให้ไปลดความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างไซเลนกับพอลิคาร์บอนเนต การเชื่อมขวางระหว่างตัวไซเลนกับพอลิคาร์บอนเนตจึงเกิดน้อยลง ดังนั้นจำนวนอนุภาคผงซีลีอ์ไมท์ที่ช่วยในการต้านทานการเปลี่ยนรูปจึงลดลงไปด้วย ทำให้เมื่อได้รับแรงโค้งงอจึงมีการจัดเรียงโครงสร้างไปตามแนวแรงได้ง่ายขึ้น ค่า flexural modulus จึงมีแนวโน้มที่ลดลงและลดลงอย่างมากสำหรับ PC/W-TMS 1.5% และ PC/W-TMS 2.0%



ภาพที่ 52 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการปรับปรุงด้วยเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ค่า impact strength ของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงซีลีอ์ไมท์กับพอลิคาร์บอนเนตที่การปรับปรุงด้วยไซเลนในปริมาณต่างๆ กันถูกแสดงดังภาพที่ 52 จากการที่ผงซีลีอ์ไมท์ที่ใส่เข้าไปเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานและจุดเริ่มต้นของการแตกหักเมื่อชิ้นงานได้รับแรง แม้จะ

มีการใช้ไซเลนในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว แต่ก็ไม่ได้ส่งผลที่ชัดเจนในการช่วยปรับปรุงค่า impact strength ของคอมพอสิต จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า Notch Izod Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณการใช้ 0.5wt% ซึ่งให้ค่า impact strength ที่สูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการช่วยปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ไซเลนชนิดนี้ในปริมาณอื่นๆ โดยจะเห็นได้จากเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุง ค่า impact strength ของคอมพอสิตจะมีค่าลดลงและมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่ (มีค่าอยู่ในช่วงเบี่ยงเบนมาตรฐานเดียวกัน)

โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่จะส่งผลให้ค่า impact strength ของคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุจำพวกเส้นใยธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นจะมาจาก 2 ปัจจัยด้วยกัน คือ การปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์กับอนุภาคฟิลเลอร์ และอีกวิธีการหนึ่งคือทำให้คอมพอสิตมีความยืดหยุ่นและเป็นออสติกที่เพิ่มขึ้น [41] เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไซเลน TMS ไม่ได้ส่งผลช่วยในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของตัวฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังไม่ได้เพิ่มความยืดหยุ่นและเป็นออสติกให้กับคอมพอสิต เมื่อรวมกับผลของการที่ไซเลนเกิดปฏิกิริยากันเองเกิดเป็น polysiloxane ด้วยแล้ว ทำให้อนุภาคของผงไม้มันไม่สามารถช่วยในการดูดซับและส่งผ่านแรงให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด ค่า impact strength ของคอมพอสิตจึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ TMS จาก 0.5wt%

4.1.2.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ตารางที่ 8 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
PC/W- Untreated	0.1088 ± 0.0023
PC/W- TMS 0.5%	0.0928 ± 0.0005
PC/W- TMS 1.0%	0.0941 ± 0.0002
PC/W- TMS 1.5%	0.0933 ± 0.0010
PC/W- TMS 2.0%	0.0916 ± 0.0008

จากการทดสอบสมบัติการนำความร้อนของคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับผงซีลีเนียม ที่ใช้ไซเลน TMS ปรับปรุงความเข้ากันได้ ในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 8 พบว่าค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงในทุกปริมาณการปรับปรุง โดยปกติการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยไซเลนจะเป็นส่วนที่ช่วยทำให้เกิดการลดลงของปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคผงซีลีเนียมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยช่องว่างที่ว่านี้จะเป็นส่วนที่ส่งผลให้สมบัติการนำความร้อนของคอมพอสิตลดลง เนื่องจากอากาศนำความร้อนได้น้อยกว่าพอลิคาร์บอนเนตและผงซีลีเนียม ดังนั้นการปรับปรุงด้วยไซเลนจึงน่าจะส่งผลให้การนำความร้อนของคอมพอสิตสูงขึ้น แต่จากการทดสอบค่าการนำความร้อนพบว่า ค่าการนำความร้อนที่ลดลงในทุกปริมาณการปรับปรุงด้วยไซเลนก็น่าจะเป็นผลมาจากค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าของโมเลกุล polysiloxanes เมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอนเนต ($K \sim 0.13 \text{ W/m K}$ [42]) จึงเป็นตัวที่ช่วยส่งผลให้ค่าการนำความร้อนรวมในระบบของคอมพอสิตมีค่าลดลง เมื่อทำการพิจารณาผลของปริมาณการปรับปรุงด้วยไซเลนแล้ว พบว่าแม้จะเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนแต่ก็ไม่ได้ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงพอที่จะกล่าวได้ว่าปริมาณการใช้ไซเลน TMS เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอนเนตไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตอย่างเห็นได้ชัด

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอนเนต เมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสมบัติเชิงกลจะเห็นได้ว่า PC/W-TMS 0.5% มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงด้วยไซเลน TMS ในปริมาณมากขึ้น ผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลน TMS จาก 0.5wt.% ไปเป็น 1.0wt.%, 1.5wt.% และ 2.0wt.% ความแข็งแรงของคอมพอสิตมีแนวโน้มที่ลดลงทั้งค่า tensile strength และ flexural strength ส่วนความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (flexural modulus) นั้น มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ในขณะที่ Young's modulus มีค่าค่อนข้างคงที่แม้จะทำการเพิ่มปริมาณการใช้ไซเลนแล้วก็ตาม ผลการทดสอบสมบัติการนำความร้อนนั้น ปริมาณการใช้ไซเลนในการปรับปรุงไม่ได้ส่งผลให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงพอจะกล่าวได้ว่าสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตในระบบแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS 0.5% ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ไซเลน TMS ในปริมาณอื่นๆ

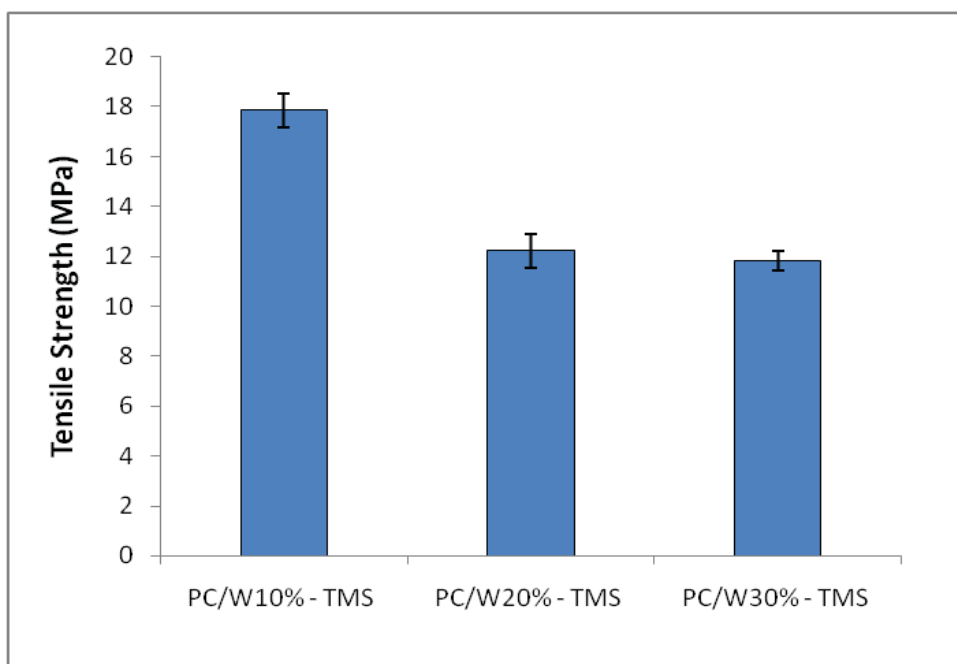
4.2 ผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอลิต

จากการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตในการทดลองส่วนแรก ได้แสดงให้เห็นว่าไซเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine ในปริมาณ 0.5wt.% เหมาะสมที่สุดในการช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต ดังนั้นในการทดลองส่วนที่สองซึ่งจะเป็นการศึกษาผลของปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ซึ่งต้องการเลือกปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีของคอมพอลิต จะทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้ผงซีลี้อยไม้เป็น 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักของคอมพอลิต และในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลี้อยไม้กับพอลิคาร์บอเนตจะเลือกใช้ไซเลน TMS ในปริมาณ 0.5% ของน้ำหนักผงซีลี้อยไม้

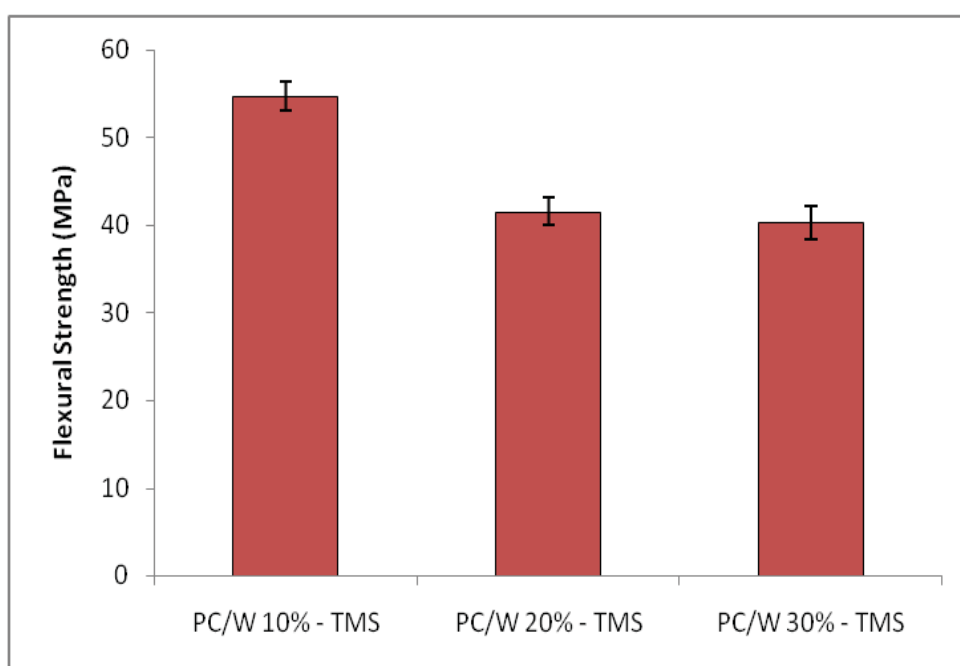
4.2.1 ศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอลิต

4.2.1.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอลิต

จากภาพที่ 53 แสดงผลของ tensile strength ของวัสดุคอมพอลิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลี้อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษาที่ปริมาณการเติมผงซีลี้อยไม้เป็น 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก พบว่า PC/W-TMS เมื่อปริมาณผงซีลี้อยไม้ในคอมพอลิตเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แนวโน้มของความสามารถในการทนแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง สาเหตุเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคผงซีลี้อยไม้ โดยอนุภาคผงซีลี้อยไม้มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมกลุ่มและจับตัวกันเป็นก้อนมากขึ้นจากผลของแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของผงซีลี้อยไม้ [43] ซึ่งเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคของคอมพอลิตที่แสดงให้เห็นพื้นผิวที่แตกหักจากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 55 โดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยไม้ลงในคอมพอลิตจะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคผงซีลี้อยไม้ที่เพิ่มขึ้นด้วย (จากภาพ 53 ข และ ค) ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของผงซีลี้อยไม้ในคอมพอลิตที่แย่ลง นอกจากนี้แล้วภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM ยังแสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคผงซีลี้อยไม้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ สังเกตได้จากการที่มีช่องว่างหรือส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวทั้งสองเฟสในจำนวนที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากความสามารถในการขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion) ของวัสดุทั้งสองที่แตกต่างกัน [43] เมื่อทำการผสมสารทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันแล้วนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนหลังจากนั้นก็ให้ความเย็นในกระบวนการหล่อเย็น สิ่งเหล่านี้จะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลอย่างมากต่อการหดตัวของวัสดุที่

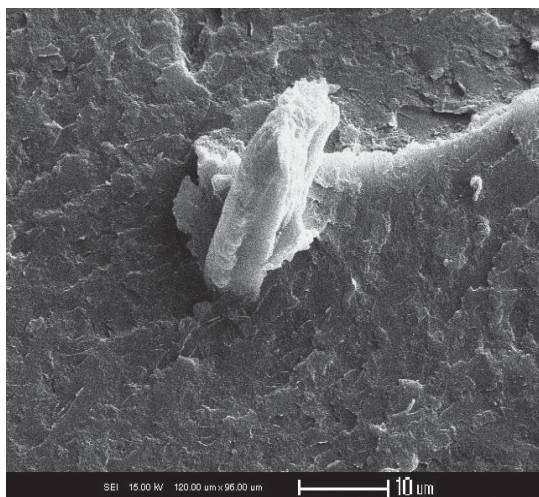


ภาพที่ 53 แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

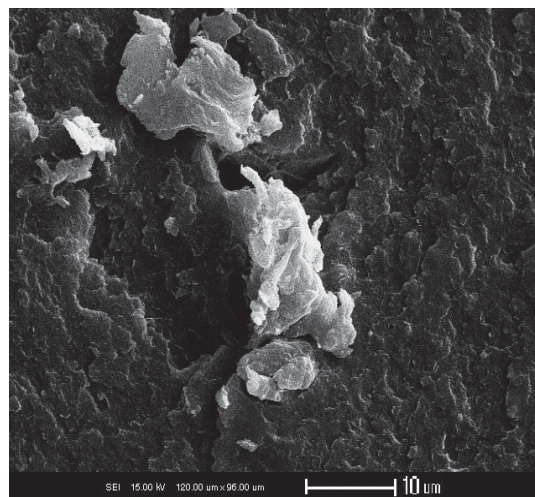


ภาพที่ 54 แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

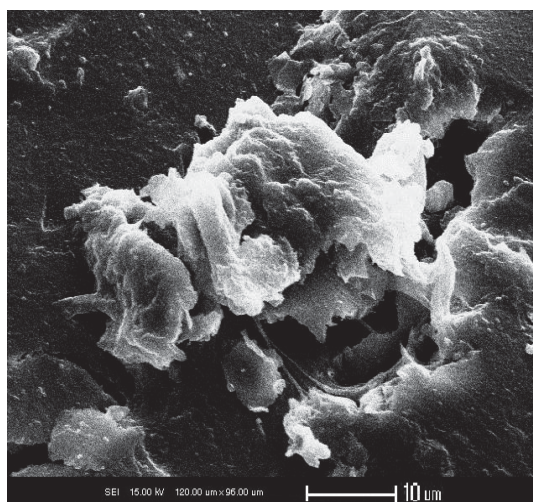
ไม่เท่ากันเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเฟสทั้งสอง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้ค่า tensile strength ของคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลีเยอไมล์ลงในวัสดุคอมพอสิต และเมื่อทำการพิจารณาถึงค่า flexural strength (ภาพที่ 54) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งก็สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นโดยให้เหตุผลเดียวกันกับค่า tensile strength ก่อนหน้านี้นี้



(ก)



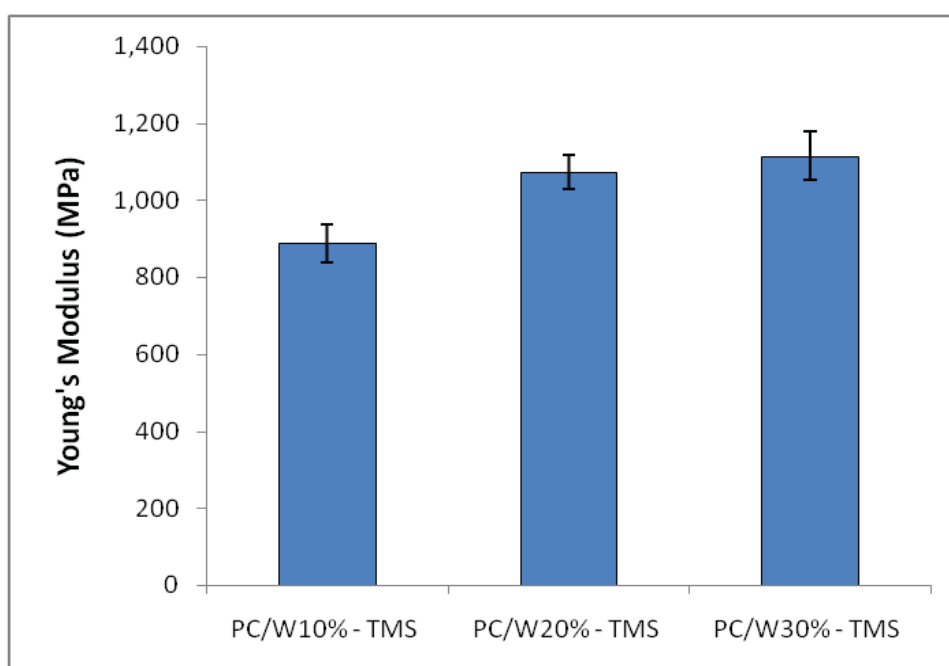
(ข)



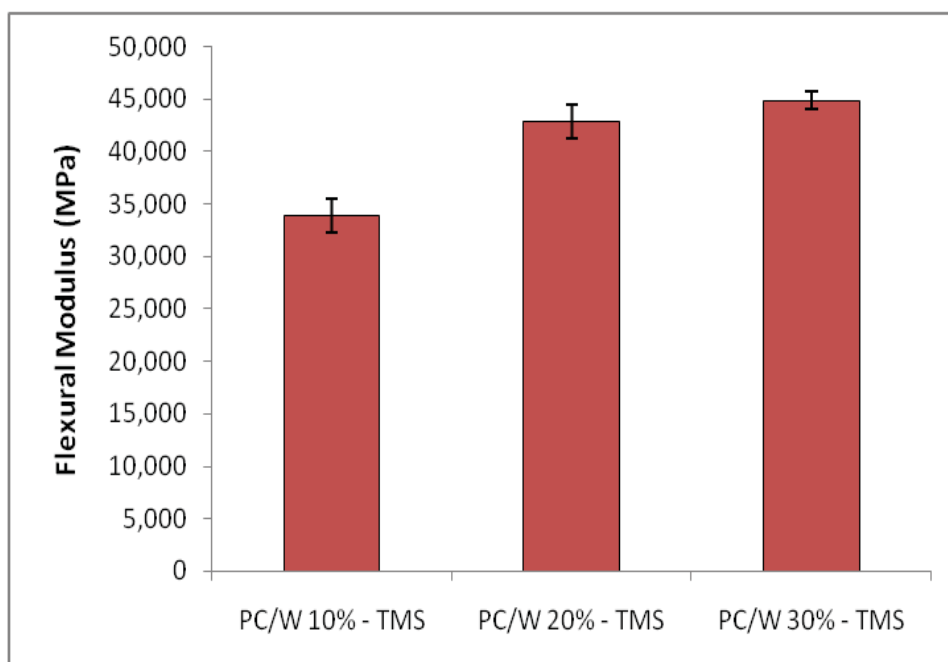
(ค)

ภาพที่ 55 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ปริมาณการเติมผงไมล์ที่แตกต่างกัน (ก) 10%wt (ข) 20%wt (ค) 30%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

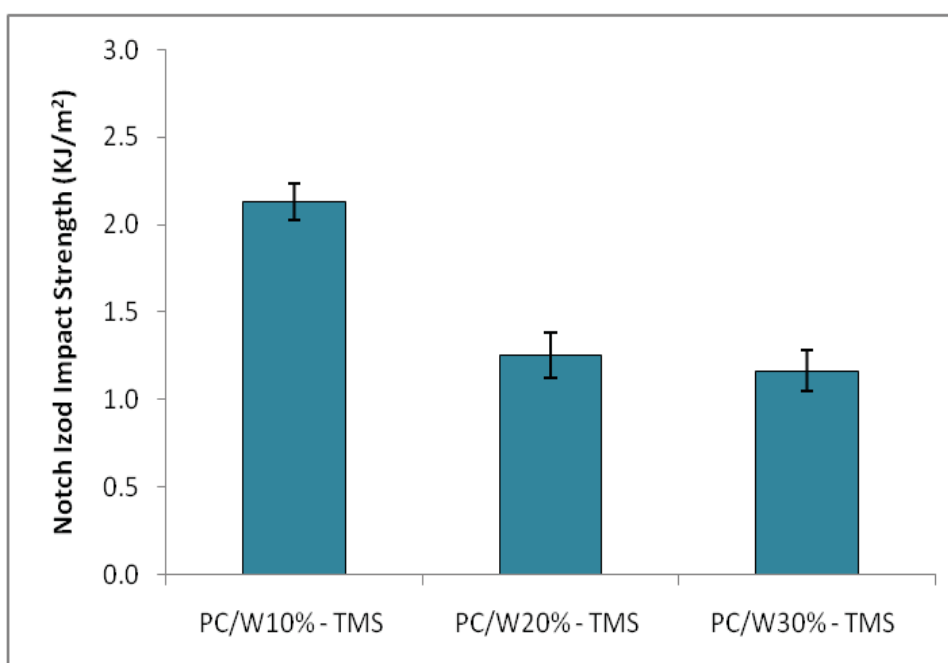
ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ในปริมาณที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 56 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยู่ในคอมพอสิต ค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (จากประมาณ 887 MPa สำหรับ PC/W10%-TMS ไปเป็น 1,073 MPa และ 1,115 MPa สำหรับ PC/W20%-TMS และ PC/W30%-TMS ตามลำดับ) การที่ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเติมเฟสของผงซีลี้อยู่ซึ่งมีความ rigid ที่มากกว่าเฟสของพอลิคาร์บอเนต ทำให้เมื่อยังเพิ่มปริมาณการเติมผงซีลี้อยู่ในคอมพอสิตที่ได้จะยังมีความอดุลล์หรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปที่สูงขึ้น แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยู่ในคอมพอสิตจาก 20wt.% ไปเป็น 30wt.% ค่า Young's modulus ของคอมพอสิตมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สาเหตุก็อาจจะเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคผงซีลี้อยู่กับพอลิคาร์บอเนต ปริมาณผงซีลี้อยู่ที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวทำให้เกิดพื้นที่ที่เป็นช่องว่าง (void) (ภาพที่ 55 ค) หรือมีความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคผงซีลี้อยู่กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มากขึ้นด้วย [27] ด้วยเหตุนี้ค่าความอดุลล์โดยรวมของคอมพอสิตจึงไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างที่เราจะเห็น



ภาพที่ 56 แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ในปริมาณที่ต่างกัน



ภาพที่ 57 แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 58 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

การเพิ่มเฟสของผงไม้ลงไปโพลีเมอร์ส่งผลอย่างยิ่งต่อการเพิ่มขึ้นของค่า flexural modulus ของวัสดุเพราะเป็นส่วนที่ช่วยลดการเสียรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรง จากภาพที่ 57 จะเห็นได้ว่าค่า flexural modulus ของคอมพอสิตเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงไม้จะมีแนวโน้มเหมือนกันกับผลของ Young's modulus คือมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้จาก 10wt.% ไปเป็น 20wt.% จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30wt.% ซึ่งเหตุผลที่ใช้อธิบายก็เป็นเช่นเดียวกันกับผลของ Young's modulus

ค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงไม้กับพอลิคาร์บอเนตแสดงดังภาพที่ 58 หลังจากที่มีการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงในคอมพอสิตพบว่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเฟสของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับอิทธิพลที่มีต่อค่า tensile strength และ flexural strength การเพิ่มปริมาณผงไม้ไม่มีผลทำให้บริเวณที่เป็นช่องว่าง (void) หรือส่วนที่ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งยืนยันผลการทดลองจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM (ภาพที่ 55 ก และ 55 ข) ช่องว่างที่เกิดขึ้นส่งผลเป็นอย่างยิ่งต่อค่า impact strength เนื่องจากเฟสที่ไม่ต่อเนื่องกันนี้ไม่สามารถที่จะทำการรับและส่งผ่านแรงได้ดี โดยเฉพาะเมื่อต้องทำการรับแรงอย่างทันทีทันใด เมื่อพิจารณาถึงการรวมตัวของอนุภาคผงไม้ที่เกิดเป็นกลุ่มก้อนแล้ว ความสามารถในการส่งผ่านแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ยังเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นผลในการต้านทานแรงกระแทกจึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้ลงในคอมพอสิต

4.2.1.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนต ผงไม้ ไม้ และคอมพอสิตสามารถหาได้จากสมการที่ 7 (Rule of mixtures) ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าทางทฤษฎีและมีการเปรียบเทียบผลกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9 โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงในเฟสของพอลิเมอร์ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์น่าจะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผงไม้เป็นเฟสที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเฟสของพอลิเมอร์ การเพิ่มปริมาณผงไม้ที่แตกต่างกันในแต่ละระดับ (10wt.% ไปเป็น 20wt.% และ 30wt.%) น่าจะแสดงให้เห็นถึงผลของค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างแตกต่างกัน แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงไปโพลีเมอร์ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยในแต่ละระดับของการเพิ่มปริมาณ โดยจากตารางที่ 9 ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตมีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแม้จะทำการเพิ่มปริมาณผงไม้จาก 10wt.% ไปเป็น 20wt.% และ 30wt.% ซึ่งจากทฤษฎีแล้วแต่ละระดับของการเพิ่มผงไม้ลงไป

ควรจะมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกันมากกว่านี้ การเติมผงซีลี้อยู่ในพอลิเมอร์ได้แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้นมาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีดังสมการที่ 7 พบว่าค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าที่น้อยกว่ามาก สาเหตุอาจมาจากช่องว่างที่เกิดขึ้นจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมตริกซ์กับผงซีลี้อยู่ โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวที่ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าการนำความร้อนในวัสดุเป็นอย่างมาก

$$k_c = k_m\phi_m + k_f\phi_f \quad \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ k_c , k_m และ k_f คือค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอสิต, พอลิคาร์บอนเนตเมตริกซ์, และฟิลเลอร์ (ผงซีลี้อยู่) ตามลำดับ ϕ_m และ ϕ_f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของเมตริกซ์และฟิลเลอร์ ตามลำดับ [33]

ตารางที่ 9 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอนเนตที่มีการเติมผงซีลี้อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน

สัดส่วนในคอมพอสิต (%wt)		ค่าการนำความร้อน (W/m K)	
พอลิคาร์บอนเนต	ผงซีลี้อยู่	การทดลอง	ทฤษฎี
0	100	0.0800	
100	0	0.1650	
90	10	0.0928 ± 0.0005	0.1565
80	20	0.0920 ± 0.0001	0.1480
70	30	0.0916 ± 0.0004	0.1395

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต เมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสมบัติเชิงกลสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ไม่ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตโดยรวมลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่า tensile strength, flexural strength รวมถึง impact strength ที่มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ modulus ของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางตรงกันข้ามคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ เมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลทั้งสองแบบนี้แล้ว จะเห็นได้ว่าผลของ strength มีค่าที่แตกต่างกันมากกว่าผลของ modulus ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุคอมพอสิต PC/W10%-TMS ได้ให้ผลทางสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างดีที่สุดเมื่อเมื่อเทียบกับการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณอื่นๆ ในส่วนของผลการทดสอบสมบัติการนำความร้อนนั้น ปริมาณการเติมผงขี้เลื่อยไม้ไม่ได้ส่งผลให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตในระบบแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ดังนั้นจากการศึกษาผลของปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต PC/W10%-TMS 0.5% ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณอื่นๆ

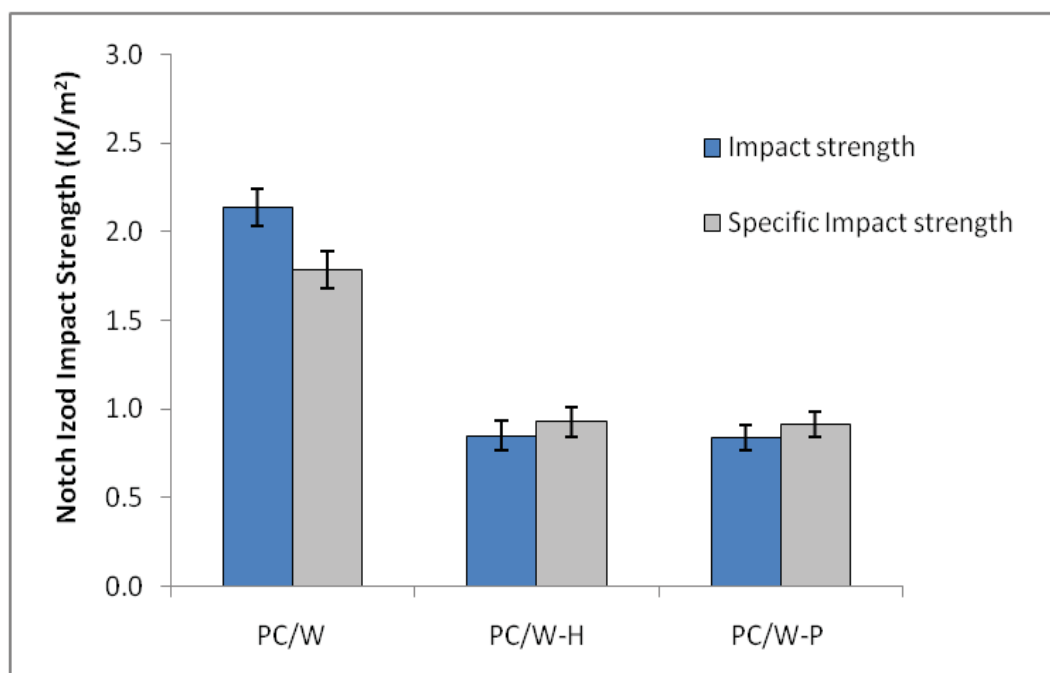
4.3 ผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

จากการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของผงซีเลียมกับพอลิคาร์บอนเนตในการทดลองส่วนแรก และการศึกษาผลของปริมาณผงซีเลียมที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตในส่วนที่สอง ได้แสดงให้เห็นว่าไซเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine ในปริมาณ 0.5wt.% กับการเติมผงซีเลียมในปริมาณ 10wt.% มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีที่สุด ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้จะเลือกใช้คอมพอสิต PC/W10%-TMS 0.5% เพื่อการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) 2 ชนิด คือ Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุโฟมคอมพอสิต โดยจะทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้เป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr

4.3.1 ศึกษาผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

4.3.1.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

จากการศึกษาถึงผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อค่า impact strength ซึ่งแสดงดังภาพที่ 59 โดยทำการเปรียบเทียบกับวัสดุคอมพอสิต PC/W ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีที่สุดซึ่งได้จากการทดลองในสองส่วนแรก จะเห็นได้ว่าความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกของคอมพอสิตที่เป็นโฟมมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใดชิ้นงานไม่สามารถดูดซับและกระจายแรงได้ดีพอ เพราะมีเฟสของช่องว่างที่เข้ามาเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านแรงภายในเมตริกซ์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างเซลล์โฟมที่มีช่องว่างอยู่ภายใน วัสดุจึงเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ทันสำหรับค่า impact strength ของวัสดุโฟมคอมพอสิตของทั้ง PC/W-H และ PC/W-P นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 59 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด Hydrocerol HK 40B (H) และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole (P) ปริมาณ 0.5phr

ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตกับผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง

ตัวอย่างชิ้นงาน	Hardness (Shore D)
PC/W	61.8 ± 1.6
PC/W - H 0.5	44.4 ± 2.5
PC/W - P 0.5	50.6 ± 1.8

ความแข็ง (Hardness) คือสมบัติความต้านทาน ในการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่าง หรือการเกิดรอยขีดข่วนเสียหายบริเวณพื้นผิว หรือความแข็งที่พื้นผิววัสดุนั่นเอง [44] จากการทดสอบสมบัติ Hardness ของชิ้นงานคอมพอสิตซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 10 พบว่าค่า Hardness จะลดลงเมื่อมีการใช้สารทำให้เกิดฟองในการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวัสดุโฟมคอมพอสิต เมื่อพื้นผิวได้รับแรงกดจากเดิมที่ภายใต้พื้นผิวมีส่วนของเนื้อเมตริกซ์ในการช่วยรับและส่งผ่านแรง แต่จากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโพรงและมีช่องว่างอยู่เป็นจำนวนมากในวัสดุโฟมทำให้การรับและ

ส่งผ่านแรงเป็นไปได้อย่างขึ้น ผิวหน้าของวัสดุจึงเกิดการยุบตัวได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงกด ค่าความแข็งจึงลดลงเหลือเพียง D44.4 สำหรับ PC/W - H และ D50.6 สำหรับ PC/W - P ทั้งนี้เนื่องจากผลของโครงสร้างเซลล์โฟมที่ใหญ่กว่าสำหรับการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B เมื่อเทียบกับการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole เมื่อขึ้นงานวัสดุโฟมคอมพอสิตได้รับแรงกดบนพื้นผิวจะมีการส่งผ่านแรงภายใต้พื้นผิวของชิ้นงานเกิดขึ้น ส่วนของเมตริกซ์ในวัสดุคอมพอสิตจะช่วยในการรับและส่งผ่านแรง โครงสร้างของเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นนี้ไปมีผลในการลดพื้นที่ในการรับและส่งผ่านแรง ยิ่งเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ก็จะไปมีผลในการลดพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้น ดังนั้นวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ซึ่งให้ขนาดของเซลล์โฟมในวัสดุโฟมคอมพอสิตที่เล็กกว่าจึงมีค่า Hardness ที่มากกว่า

จากโครงสร้างเซลล์โฟมที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด การสลายตัวของ Hydrocerol HK 40B จะมีการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ [23] ในขณะที่การสลายตัวของ 5-Phenyl-1H-Tetrazole จะทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซ N₂ ออกมา [24] ทำให้วัสดุคอมพอสิตมีโครงสร้างเป็นโพรงหรือรูพรุน เมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนหรือโพรงที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าวัสดุโฟมคอมพอสิตที่ใช้ Hydrocerol HK 40B เป็นสารทำให้เกิดฟองมีขนาดของรูพรุนหรือโพรงที่ใหญ่กว่าวัสดุโฟมคอมพอสิต 5-Phenyl-1H-Tetrazole เป็นสารทำให้เกิดฟอง จากกฎการแพร่ของเกรแฮม ซึ่งกล่าวว่าอัตราการแพร่ผ่านของแก๊สจะแปรผกผันกับรากที่สองของความหนาแน่นของแก๊ส ภายใต้อุณหภูมิและความดันเดียวกัน [46] ดังสมการต่อไปนี้

$$r \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

เมื่อ r คือ อัตราการแพร่ และ d = ความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าเปรียบเทียบอัตราการแพร่ของแก๊สภายใต้สภาวะเดียวกัน จะได้ดังนี้

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

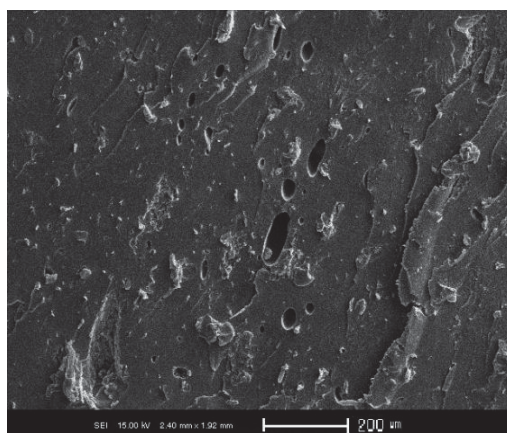
แต่ความหนาแน่นแปรผันตรงกับมวลโมเลกุล (M) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

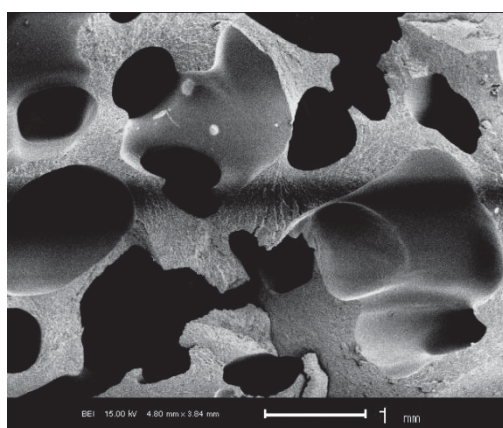
นั่นหมายความว่า แก๊สที่มีน้ำหนักมากกว่าจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าแก๊สที่เบากว่านั่นเอง ซึ่งจากการปลดปล่อยการของสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด แก๊ส CO_2 (ได้จากสารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B) มีน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่าแก๊ส N_2 (ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole) แก๊ส CO_2 จึงมีความสามารถในการแพร่ได้น้อยกว่า ดังนั้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเมื่อสารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมา โมเลกุลของแก๊ส CO_2 ก็น่าจะแพร่ผ่านพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตได้น้อยและเกิดเป็นเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับเซลล์โฟมที่เกิดจากแก๊ส N_2 ซึ่งสามารถแพร่ผ่านเนื้อพอลิคาร์บอเนตได้ดีกว่า แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 60 จะเห็นได้ว่าเซลล์โฟมที่เกิดจากแก๊ส CO_2 (ภาพที่ 60 ง) จะมีขนาดใหญ่กว่าเซลล์โฟมที่เกิดจากแก๊ส N_2 (ภาพที่ 60 จ) ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความหนืดที่แตกต่างกันในวัสดุโฟมคอมพอสิต จากการทดสอบดัชนีการไหล (MFI) ของวัสดุโฟมคอมพอสิต (ดังตารางที่ 11) จะเห็นได้ว่าวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-P 0.5 จะมีความหนืดมากกว่าวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-H 0.5 ภายใต้สภาวะที่มีความหนืดสูง แรงดันของแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองไม่สามารถทำให้เซลล์โฟมที่เกิดขยายขนาดใหญ่ขึ้นได้ มีผลทำให้เซลล์โฟมของวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-P 0.5 มีขนาดของเซลล์โฟมที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุโฟมคอมพอสิต PC/W-H 0.5 ซึ่งในระบบมีความหนืดน้อยกว่านั่นเอง

ตารางที่ 11 แสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิคาร์บอเนตและโฟมพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตไม้ที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 0.5 phr

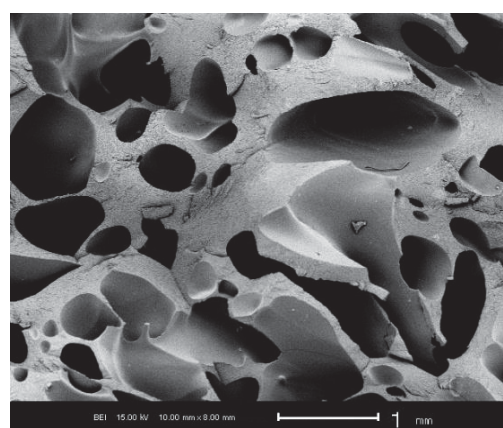
ตัวอย่างชิ้นงาน	MFI (g/10min)
Neat PC	5.20
PC/H	4.76
PC/P	4.05
PC/W-H	3.23
PC/W-P	2.34



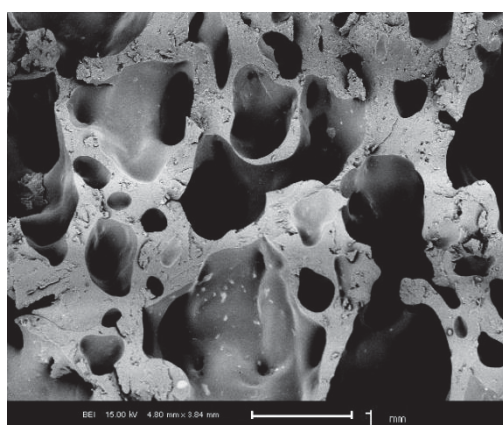
(ก)



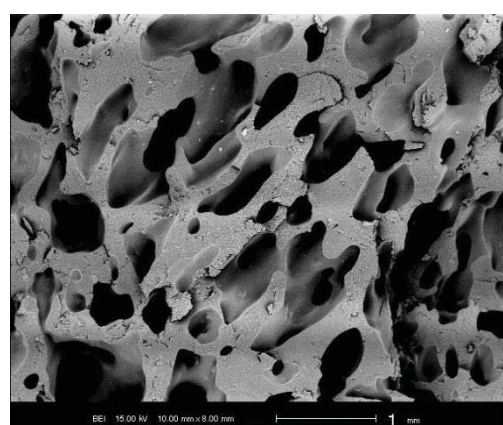
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 60 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโฟมคอมพอสิตของ (ก) PC/W ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) PC/H (ค) PC/P (ง) PC/W-H และ (จ) PC/W-P ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 0.5 phr ที่กำลังขยาย 25 เท่า

สำหรับวัสดุโพลีคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่ไม่ได้รับการเติมผงซีลีเนียม พบว่าวัสดุโพลีคอมพอสิต PC/P 0.5 (ภาพที่ 60 ค) ซึ่งมีความหนืดในระบบที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุโพลีคอมพอสิต PC/H 0.5 (ภาพที่ 60 ข) ให้เซลล์โพลีที่มีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาหาระบบของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการเติมและไม่ได้เติมผงซีลีเนียมจะเห็นได้ว่าระบบที่มีการเติมผงซีลีเนียม (ค่าความหนืดมากกว่า) ก็ให้ผลของขนาดเซลล์โพลีที่เล็กกว่าระบบที่ไม่ได้เติมผงซีลีเนียม (ค่าความหนืดน้อยกว่า) เช่นเดียวกัน โดยจากภาพที่ 60 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของวัสดุโพลีคอมพอสิตของ PC/W-H และ PC/W-P จะมีจำนวนรูพรุนหรือเซลล์โพลีที่มากกว่าวัสดุโพลีคอมพอสิตของ PC/H และ PC/P ทั้งนี้เนื่องจากผงซีลีเนียมที่เติมลงไปได้ทำหน้าที่เป็น nucleating agent คือเป็นตัวก่อให้เกิดโครงสร้างเซลล์ของโพลีขึ้น โดยผงซีลีเนียมจะช่วยให้การลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวกับก๊าซ หรืออาจไปเกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสทำให้สามารถเกิดฟองก๊าซได้ง่ายขึ้น [18, 20] ดังนั้นการเติมผงซีลีเนียมจึงเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนเซลล์โพลีในโครงสร้างของวัสดุโพลีคอมพอสิต

4.3.1.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมและโพลีคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมแสดงดังตารางที่ 12 จากการศึกษาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุโพลีคอมพอสิตกับผงซีลีเนียมพบว่า สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนให้คอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมได้ โดยการใช้ Hydrocerol HK 40B ในสัดส่วน 0.5 phr (PC/W - H 0.5) เป็นสารทำให้เกิดฟองให้ค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 0.0844 W/mK ส่วนการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในสัดส่วน 0.5 phr (PC/W - P 0.5) เป็นสารทำให้เกิดฟองให้ค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 0.0875 W/mK ค่าการนำความร้อนที่ลดลงของคอมพอสิตเมื่อมีการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด เกิดจากการที่สารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปภายใต้ความดัน เมื่อความดันของกระบวนการลดลงก๊าซจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดโครงสร้างแบบเซลล์ขึ้นในเนื้อเมทริกซ์ [45] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิค SEM ดังแสดงในภาพที่ 60 จากภาพที่ 60 ง และ 60 จ ได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบโพลีที่เกิดจากการใช้สารทำให้เกิดฟองในวัสดุคอมพอสิต โครงสร้างแบบเซลล์โพลีนี้เป็นตัวที่ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิตลดลง เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นเป็นตัวเพิ่มระยะทางในการส่งผ่านความร้อนในเนื้อพอลิเมอร์ โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีอากาศแทรกอยู่ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอากาศจะมีความสามารถในการนำความร้อนที่น้อยกว่าของแข็ง ดังนั้นคอมพ

ลิตที่ได้จึงมีค่าการนำความร้อนที่ลดลง เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุโพลีคอมพอสิตพบว่ามีความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกัน นั่นหมายถึงภายในชิ้นงานวัสดุโพลีคอมพอสิตมีพื้นที่ที่เป็นช่องว่างในปริมาตรใกล้เคียงกัน แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (ภาพที่ 60 ง และ 60 จ) พบว่าวัสดุโพลีคอมพอสิต PC/W-H มีขนาดของเซลล์โพลีที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัสดุโพลีคอมพอสิต PC/W-P และเมื่อพิจารณาถึงค่าการนำความร้อนพบว่าวัสดุโพลีคอมพอสิต PC/W-H มีค่าการนำความร้อนที่น้อยกว่า PC/W-P แสดงให้เห็นว่าวัสดุโพลีคอมพอสิตที่โครงสร้างของเซลล์โพลีมีขนาดใหญ่จะมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าวัสดุโพลีคอมพอสิตที่โครงสร้างของเซลล์โพลีมีขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากในวัสดุโพลีที่มีขนาดของเซลล์โพลีใหญ่จะมีพื้นที่หรือระยะทางที่ใช้ในการพาความร้อนมากกว่าวัสดุโพลีที่มีขนาดของเซลล์โพลีเล็ก ซึ่งการส่งผ่านความร้อนโดยการพาความร้อนนี้จะช่วยลดค่าการนำความร้อนให้กับตัววัสดุได้ [22]

ตารางที่ 12 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตของพอลีคาร์บอนเนตกับผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PC/W	0.0928 ± 0.0005	1.197 ± 0.001
PC/W - H 0.5	0.0844 ± 0.0002	0.825 ± 0.003
PC/W - P 0.5	0.0875 ± 0.0003	0.829 ± 0.003

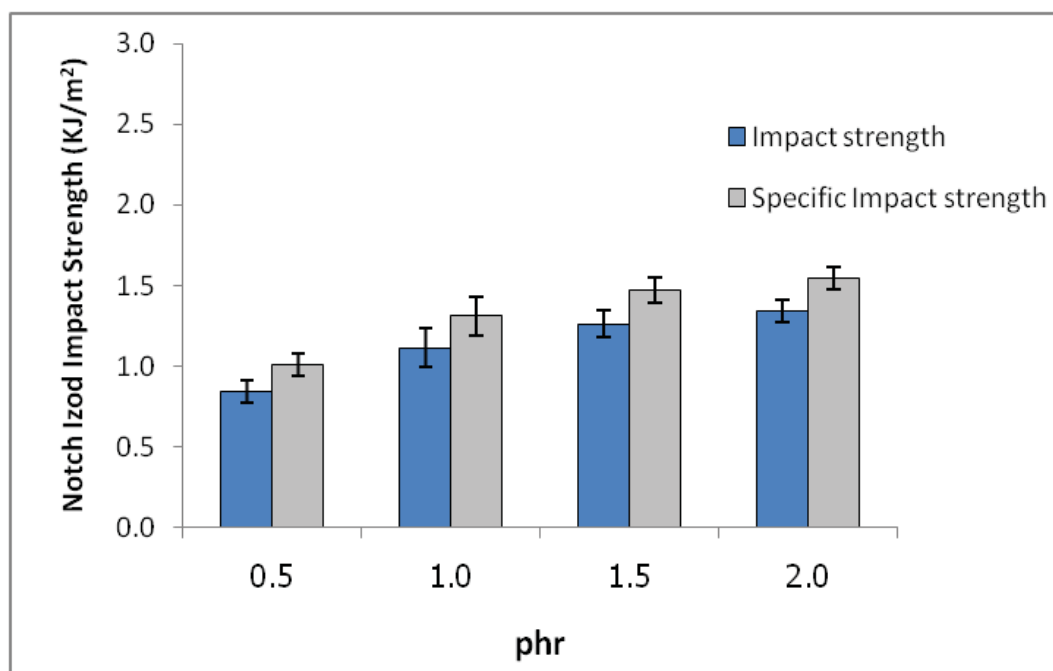
4.3.2 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิต

จากการศึกษาผลของการใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตในตอนแรกของการทดลองส่วนที่ 3 พบว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองเพื่อจุดประสงค์ในการขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็นวัสดุโพลีคอมพอสิตได้ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้มีค่า impact strength ที่ลดลงเล็กน้อย รวมถึงค่า Hardness ที่มีการลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตก็มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนให้กับวัสดุคอมพอสิต สารทำให้เกิดฟองทั้ง Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ซึ่งได้ทำการทดลองใช้ในปริมาณ 0.5 phr ได้ทำให้คอมพอสิตที่ได้มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นเซลล์โพลี ในขั้นต่อไปจึงได้ทำการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้ง

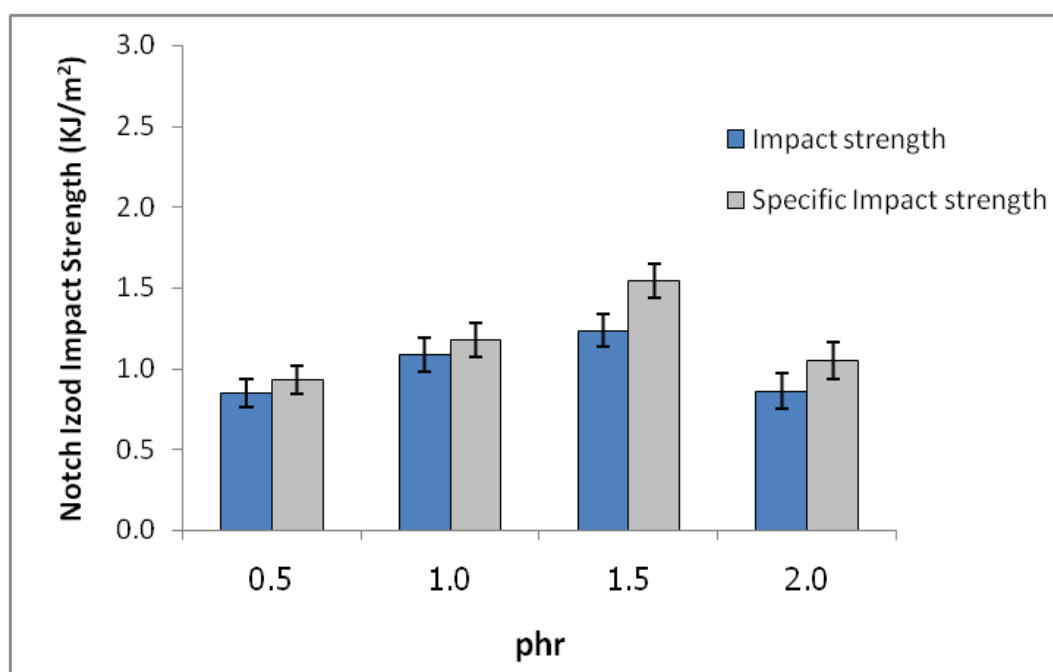
สองชนิดในการขึ้นรูปเป็นวัสดุโพลีคอมพอสิต แล้วทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

4.3.2.1 ผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

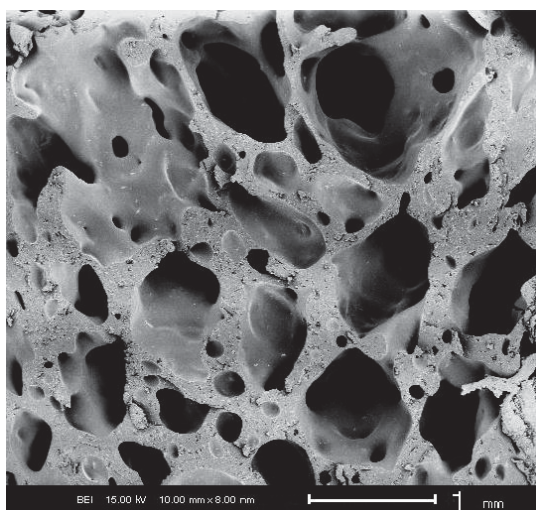
ค่า impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟอง 5-Phenyl-1H-Tetrazole (PC/W-P) และ Hydrocerol HK 40B (PC/W-H) แสดงดังภาพที่ 61 และ 62 ตามลำดับ จากการศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง พบว่าค่า impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตในทุกๆ ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง 2.0 phr โดยการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ปริมาณ 2.0 phr (PC/W-P2.0) จะให้ค่า impact strength ที่สูงกว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ปริมาณ 2.0 phr (PC/W-H2.0) และเป็นค่า impact strength ที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองของทั้งสองชนิด จากภาพที่ 61 จะเห็นได้ว่าค่า impact strength ของ PC/W-P มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อสารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยก๊าซออกมา การใช้สารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณน้อยๆ ก็จะทำให้ได้ก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาน้อยเช่นกัน ก๊าซที่ปลดปล่อยออกมานี้จึงมีแรงดันไม่มากพอที่จะทำให้เกิดเป็นเซลล์โฟมที่เสถียร โดยสามารถยืนยันจากภาพที่ได้จากการผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในภาพที่ 63 จะเห็นได้ว่าจากการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 0.5 phr (ภาพที่ 63 ก) ทำให้ได้โพลีคอมพอสิตที่มีลักษณะเป็นโพรงหรือรูพรุนขนาดใหญ่ มีเซลล์โฟมที่เป็นทรงกลมเล็กๆ อยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่มากกว่า โครงสร้างโพรงหรือรูพรุนขนาดใหญ่นี้เป็นสาเหตุของการลดลงของค่า impact strength ซึ่งน่าจะเกิดจากการสลายตัวของผงไม่รวมถึงความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ แรงดันจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่น้อยไม่สามารถทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ไปแทนพื้นที่ของรูพรุนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นได้ โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole จำนวนรูพรุนหรือเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลงและเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งก็เนื่องมาจากมีการปลดปล่อยก๊าซจากการสลายตัวที่มากขึ้นทำให้มีแรงดันมากพอที่จะทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์เคลื่อนที่ไปแทนส่วนที่เป็นโพรงขนาดใหญ่รวมถึงเกิดเป็นเซลล์โฟมที่เสถียรได้ ดังนั้นช่องว่างขนาดใหญ่ซึ่งถือเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานในการรับแรงจึงลดลง ค่า impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole



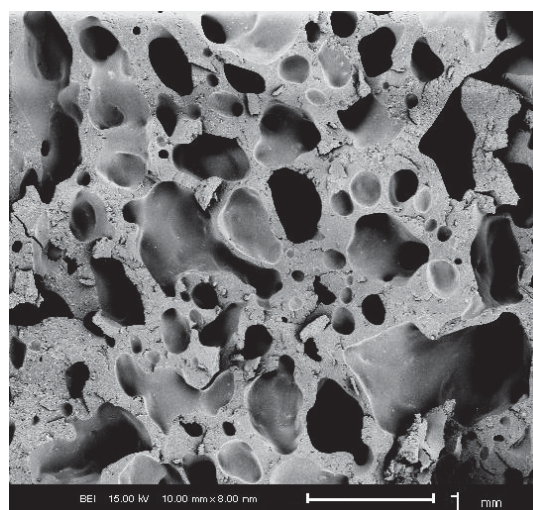
ภาพที่ 61 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน



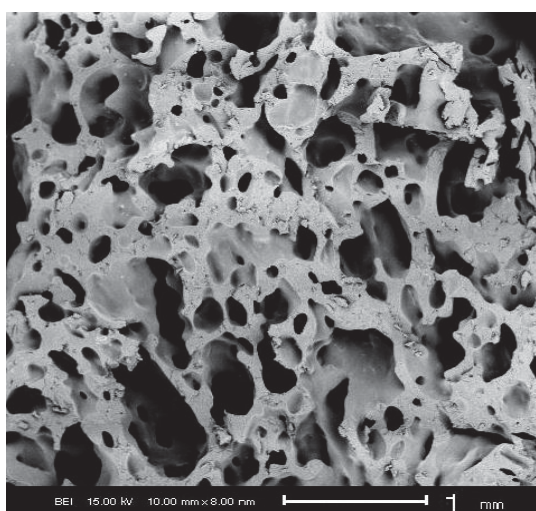
ภาพที่ 62 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน



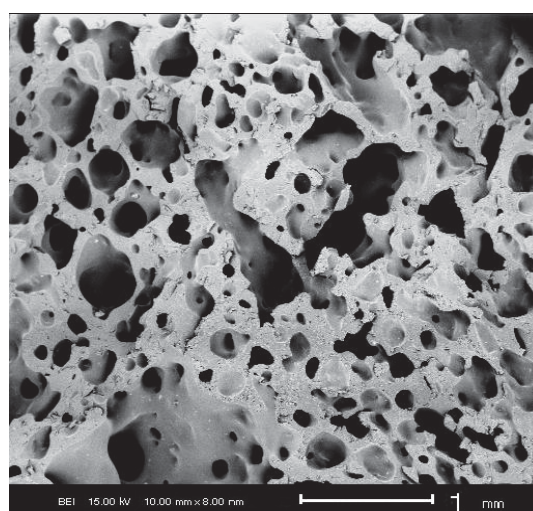
(ก)



(ข)

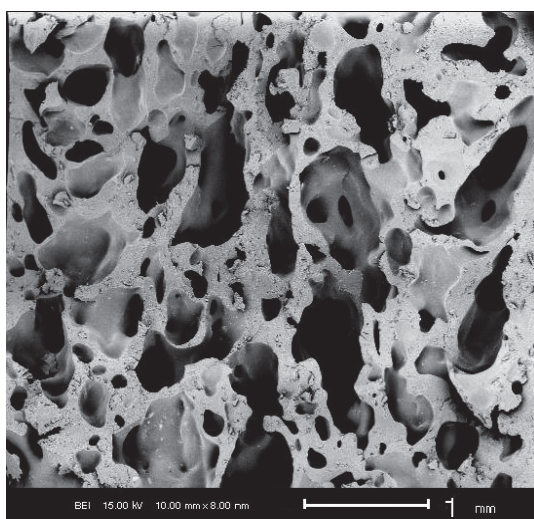


(ค)

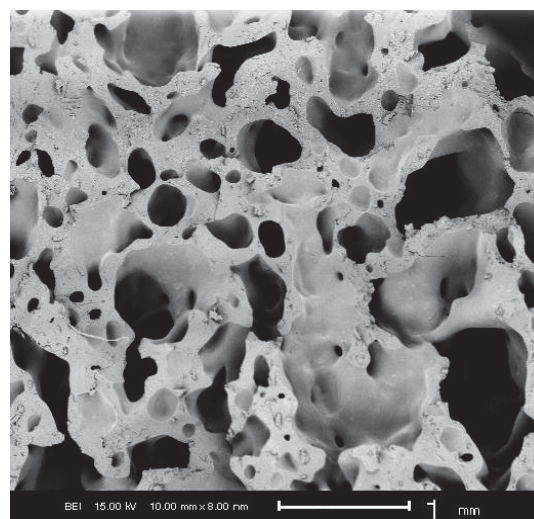


(ง)

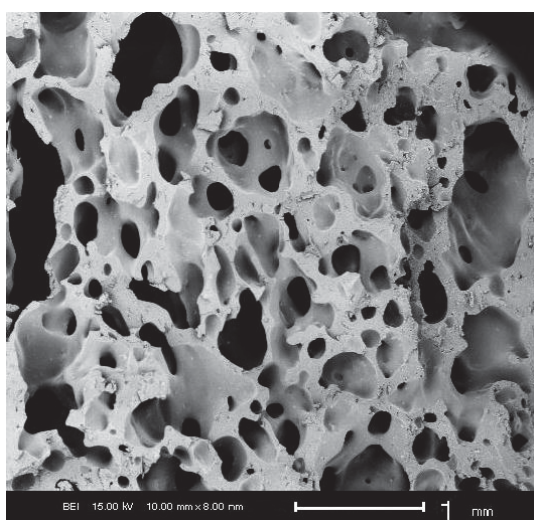
ภาพที่ 63 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) 0.5 (ข) 1.0 (ค) 1.5 และ (ง) 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



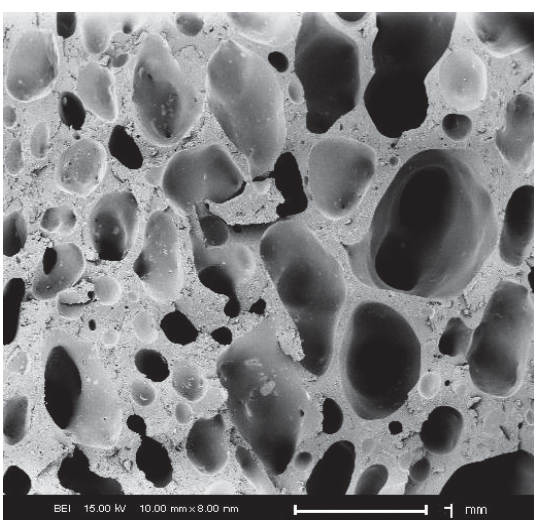
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 64 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีโพรพิลีนคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) 0.5 (ข) 1.0 (ค) 1.5 และ (ง) 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า

ในส่วนของการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B (ภาพที่ 62) พบว่าค่า impact strength ของวัสดุโพลีโพรพิลีนคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟอง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ถึง 2.0 ค่า impact strength กลับมีการลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองทำให้ความดันภายในเซลล์

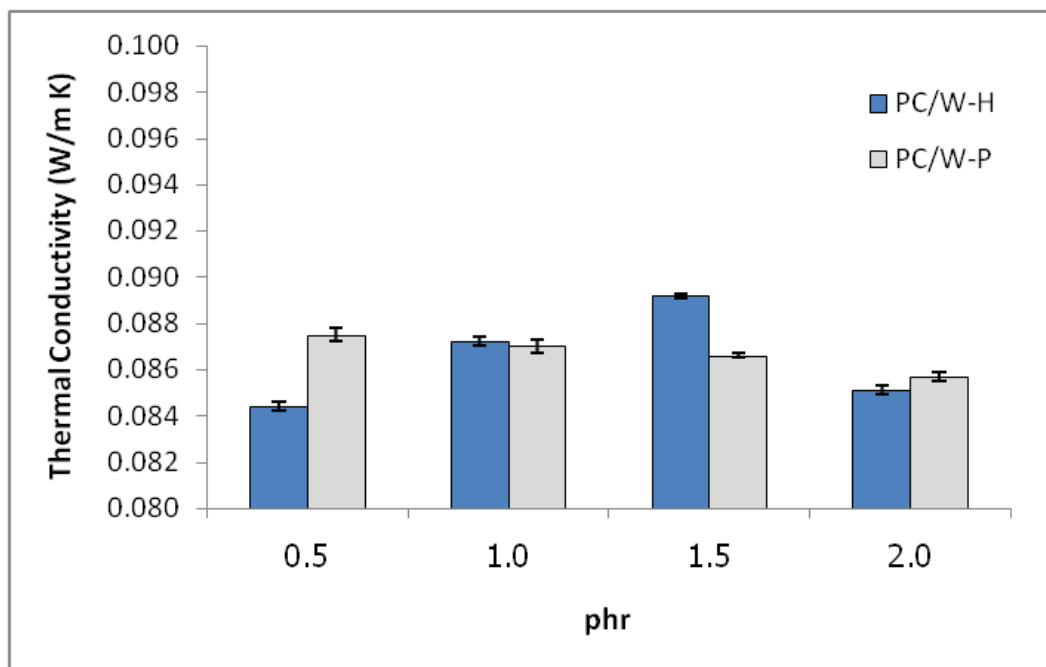
โพลีมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันที่มากเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกออกของเซลล์โพลีเมอร์ เซลล์โพลีเมอร์ที่แตกออกจึงเกิดการรวมตัวกับเซลล์โพลีเมอร์ที่อยู่ใกล้ๆ เกิดเป็นเซลล์โพลีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของการใส่สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ดังแสดงในภาพที่ 64 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณการใช้ Hydrocerol HK 40B 0.5, 1.0 และ 1.5 phr มีรูพรุนหรือเซลล์โพลีเมอร์ขนาดเล็กเกิดขึ้นในชิ้นงานจำนวนมาก แต่สำหรับการใส่สารทำให้เกิดฟองปริมาณ 2.0 phr จะพบว่าเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่และมีลักษณะที่ค่อนข้างกลม อีกทั้งยังมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ Hydrocerol HK 40B ในปริมาณอื่น ซึ่งเซลล์โพลีเมอร์ขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลอย่างยิ่งต่อความสามารถในการรับและส่งผ่านแรง ค่า impact strength ของโพลีคอมพอสิตจึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ Hydrocerol HK 40B จนถึง 2.0 phr

จากตารางที่ 13 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติ Hardness ของชิ้นงานโพลีคอมพอสิต พบว่าการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองของทั้ง Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ ค่าความแข็งบริเวณพื้นผิวของวัสดุโพลีคอมพอสิตในแต่ละปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ได้ทำให้วัสดุโพลีคอมพอสิตที่ได้มีค่า Hardness ที่มากกว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ซึ่งก็เนื่องมาจากผลของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ที่เล็กกว่า แต่จากค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตทั้งสองชนิดทำให้ทราบได้ว่าโพลีคอมพอสิตที่ได้เป็นโพลีเมอร์ประเภทโพลีเมอร์แข็ง

ตารางที่ 13 แสดงค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใส่สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ปริมาณการใช้ (phr)	Hardness (Shore D)	
	PC/W-H	PC/W-P
0.5	44.4 ± 2.5	50.6 ± 1.8
1.0	47.0 ± 1.4	51.6 ± 1.9
1.5	40.2 ± 2.5	52.1 ± 1.8
2.0	38.9 ± 2.3	52.7 ± 1.5

4.3.2.2 ผลต่อสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

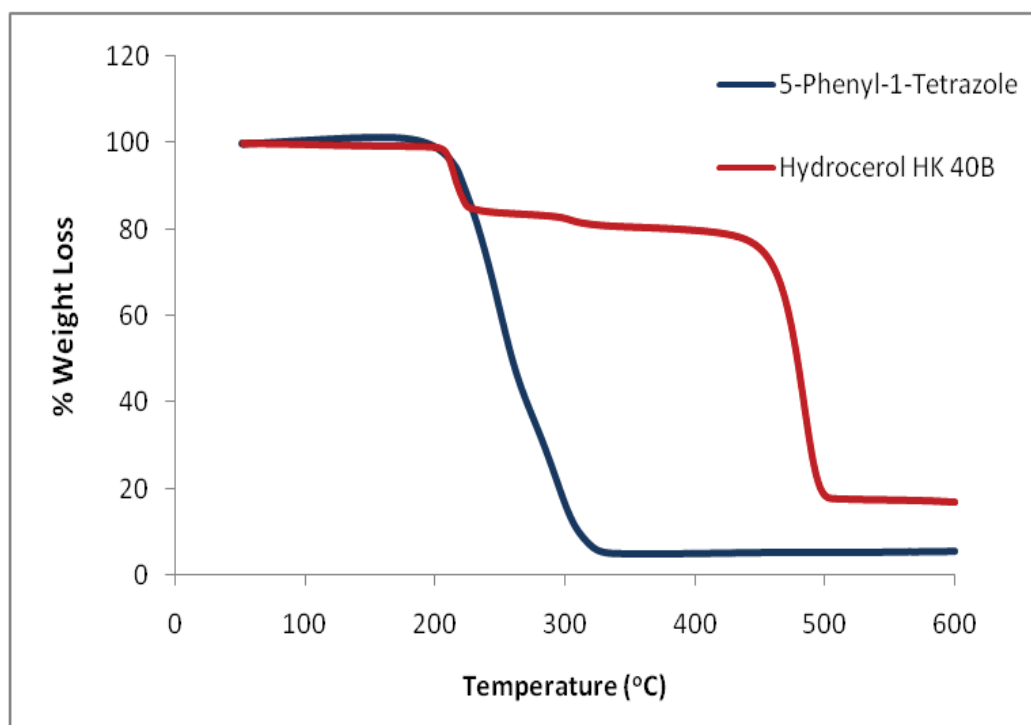


ภาพที่ 65 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบสมบัติในการนำความร้อนของชิ้นงานโพลีคอมพอสิตที่ได้จากการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดให้ผลเป็นไปดังภาพที่ 65 ค่าการนำความร้อนของโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole เป็นสารทำให้เกิดฟองมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้นได้ทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการฟอร์มตัวเป็นเซลล์โฟมมีมากขึ้น โครงสร้างภายในจึงเกิดเป็นเซลล์โฟมจำนวนมาก โดยสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 63 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์โฟมจะมีความสม่ำเสมอและมีจำนวนมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole จำนวนเซลล์โฟมที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ไปเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านความร้อนภายในเนื้อเมทริกซ์ ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของคอมพอสิตลดลง แม้ว่าที่ปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองน้อยๆ ได้ทำให้โพลีคอมพอสิตมีโครงสร้างภายในเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ แต่ก็มีจำนวนไม่มากพอที่จะทำให้ค่าการนำความร้อนของโพลีคอมพอสิตลดลง ส่วนค่าการนำความร้อนของโพลีคอมพอสิตที่ใช้ Hydrocerol HK 40B เป็น

สารทำให้เกิดฟอง กลับพบว่าค่าการนำความร้อนของชิ้นงานโฟมคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้จาก 0.5 phr ไปเป็น 1.0 และ 1.5 phr ซึ่งเป็นเรื่องที่ยอมรับได้ยาก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่ปริมาณการใช้น้อยๆ แรงดันของก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ไม่สามารถผลักดันให้โครงสร้างภายในเนื้อเมตริกซ์เกิดเป็นเซลล์โฟมที่เสถียรได้ เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่รวมอยู่กับเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งโพรงหรือรูพรุนขนาดใหญ่นี้เป็นตัวที่ส่งผลอย่างยิ่งให้เกิดการลดลงของค่าการนำความร้อน และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้สารทำให้เกิดฟองแรงดันก๊าซภายในที่เกิดจากการสลายตัวของ Hydrocerol HK 40B ก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น จนทำให้สามารถฟอร์มตัวเกิดเป็นเซลล์โฟมขนาดเล็กและเสถียรได้ ทำให้พื้นที่ภายในเมตริกซ์ที่เป็นโพรงขนาดใหญ่ลดจำนวนลง ค่าการนำความร้อนจึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณการใช้ Hydrocerol HK 40B เป็น 2.0 phr เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจะเกิดการแตกออกของผนังเซลล์โฟมและเชื่อมต่อกับเซลล์ที่อยู่ใกล้เคียง เกิดเป็นเซลล์โฟมที่มีขนาดใหญ่ ช่องว่างหรือรูพรุนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเพิ่มระยะทางในการส่งผ่านความร้อนในเนื้อเมตริกซ์ ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีการลดลงอีกครั้ง

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าวัสดุโฟมคอมพอสิตของ 5-Phenyl-1H-Tetrazole มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุดที่ปริมาณการใช้ 2.0 phr ในขณะที่วัสดุโฟมคอมพอสิตของ Hydrocerol HK 40B มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุดที่ปริมาณการใช้ 0.5 phr และเป็นปริมาณการใช้ที่ทำให้ได้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 2.0 phr แต่เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างภายในของวัสดุโฟมคอมพอสิตจากภาพที่ 63 และ 64 พบว่าโฟมคอมพอสิตที่ใช้ Hydrocerol HK 40B เป็นสารทำให้เกิดฟองมีปริมาณเซลล์โฟมที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole โดยจากภาพที่ 66 ซึ่งแสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด ทำให้ทราบว่า ณ อุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป (ประมาณ 238°C) Hydrocerol HK 40B ได้เกิดการสลายตัวไปประมาณ 16% ในขณะที่ 5-Phenyl-1H-Tetrazole เกิดการสลายตัวไปประมาณ 25% ส่งผลให้ก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ 5-Phenyl-1H-Tetrazole มีปริมาณมากกว่า ทำให้มันสามารถฟอร์มตัวเป็นเซลล์โฟมที่มีความเสถียรและมีปริมาณเซลล์ที่มากกว่าการใช้ Hydrocerol HK 40B ดังนั้นการใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ที่ปริมาณ 2.0 phr จะทำให้ได้โฟมคอมพอสิตที่มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีโครงสร้างของเซลล์โฟมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 66 แสดง TGA thermogram ของสารทำให้เกิดฟอง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียม โดยทำการศึกษาผลของการเติมสารคู่ควบไซเลน เพื่อช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีเนียมกับและพอลิคาร์บอเนต รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของโฟมคอมพอสิตพอลิคาร์บอเนต

วัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมให้ผลที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละการปรับปรุงพื้นผิว โดยพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตชนิดที่ผงซีลีเนียมไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ให้ผลของสมบัติความต้านทานแรงดึงรวมถึงความแข็งแรงของวัสดุที่ดีที่สุดเทียบเท่ากับพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตชนิดที่ผงซีลีเนียมได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine (TMS) ในปริมาณ 0.5% (PC/W-TMS 0.5) ขณะที่สมบัติการนำความร้อนก็มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ จึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงน้อยกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์แต่ต้องการสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น ในส่วนของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตชนิด PC/W-TMS 0.5 ให้ผลของสมบัติความต้านทานแรงโค้งงอที่ดีกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะผลของความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงโค้งงอซึ่งดีกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ถึงเกือบ 5 เท่า ขณะที่สมบัติการนำความร้อนของ PC/W-TMS 0.5 ก็มีค่าที่ต่ำกว่าพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิตชนิดที่ผงซีลีเนียมไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ดังนั้นจึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่ต้องการเสถียรภาพหรือความสามารถในการคงรูปของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงโค้งงอ รวมถึงสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี

สำหรับวัสดุโฟมคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมนั้น มีความแข็งแรงที่ค่อนข้างน้อย แต่มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงซีลีเนียมที่ไม่ได้มีโครงสร้างเป็นโฟม โดยในส่วนของคอมพอสิตชนิด PC/W – P2.0 ซึ่งใช้ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 2.0 phr เป็นสารทำให้เกิดฟอง จะมี

ความเสถียรของโครงสร้างเซลล์โฟมที่สูง เซลล์โฟมมีขนาดเล็กและกระจายอยู่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานมากกว่าคอมพอสิตชนิดอื่นๆ และมีสมบัติการนำความร้อนที่น้อยกว่าพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์เกือบเท่าตัว ดังนั้นจึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุประเภทนวนกันความร้อนที่ไม่ต้องการสมบัติในการรับแรง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1. ขนาดและชนิดของผงซีลี้อยู่ไม่อาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติในการนำความร้อนของคอมพอสิต จึงควรมีการศึกษาถึงผลของขนาดและชนิดของผงซีลี้อยู่ไม่ที่ใช้เสริมแรง
2. ควรมีการศึกษาอิทธิพลของสารก่อกวนโซ่เลนชนิดอื่น ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนต
3. พอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ที่ไวต่อการดูดความชื้น ดังนั้นก่อนที่จะนำไปเข้ากระบวนการผสม จึงควรอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเสียก่อน
4. ในการผสมผงซีลี้อยู่ไม่เข้ากับเม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตด้วยเครื่อง twin screw extruder ไม่ควรใช้อุณหภูมิที่สูงและเวลาที่นานเกินไป เนื่องจากผงซีลี้อยู่ไม่มีความเสถียรทางความร้อนต่ำ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนในระหว่างกระบวนการผสมได้
5. ในการขึ้นรูปชิ้นงานโฟมคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต ไม่สามารถทำการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ เนื่องจากความหนืดที่สูงมากของพอลิคาร์บอเนตทำให้ต้องใช้แรงดันในการฉีดที่ค่อนข้างสูง โดยแรงดันที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองจะมีน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันในการฉีด ทำให้โครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ไม่สามารถฟอร์มตัวเกิดเป็นเซลล์โฟมได้ การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานโฟมคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือฉีดที่มีความจำเพาะเจาะจง

บรรณานุกรม

- [1] ปิ่นสุดา ปิตรีกษ์กุล, “พอลิเมอร์เบื้องต้น 1,” ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2546, 49-56.
- [2] ปรีชา พหลเทพ, “โพลีเมอร์ HIGH POLYMERS,” พิมพ์ครั้งที่ 11, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2548.
- [3] The free encyclopedia, “Polycarbonate,” เข้าถึงเมื่อ 13 กันยายน 2553, เข้าถึงได้จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>
- [4] บริษัท วินิไทย จำกัด (มหาชน), “พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate),” เข้าถึงเมื่อ 18 มีนาคม 2554, เข้าถึงได้จาก <http://www.vinythai.co.th/ourchemicalproducts/causticsoda/mkt1chemicalindustry/app1polycarbonate/0,,2186-8-0,00.htm>
- [5] A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal, “Natural fibers: biopolymers and biocomposites,” CRC Press, USA, 2005.
- [6] D.N.S. Hon and N.Shiraishi, “Wood and cellulosic chemistry.” New York, Marcel Dekker INC, 2001.
- [7] ไทยเคมีสิ่งทอ, “บทความเรื่อง Fiber Science,” เข้าถึงเมื่อ 18 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก <http://www.ttcexpert.com>
- [8] D. Ray et al, “The mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres,” Composites: Part A, 32 (2001): 119-127.
- [9] W. Liu et al, “Effect of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites,” J. Mater. Sci, 39 (2004): 1051-1054.
- [10] Madison, “Attractive, Durable Roofing Made From Recycled Plastic and Wood Fiber,” Forest Products Laboratory, issue (April 2005).
- [11] The free encyclopedia, “Silane.” เข้าถึงเมื่อ 22 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Silane>
- [12] WebElements Periodic Table on the Web, “Silicon compounds,” เข้าถึงเมื่อ 22 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก <http://www.webelements.com/compounds/silicon/silane.html>
- [13] M. Jebrane and G. Sèbe, “A new process for the esterification of wood by reaction with vinyl esters,” Carbohydrate Polymers, 72 (2008): 657-663.

- [14] Power Chemical Corporation - SiSiB® Silane, “Silane Coupling Agents/Adhesion Promoters,” เข้าถึงเมื่อ 20 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก <http://www.powerchemical.net/coupling.htm>
- [15] Sigma - Aldrich, “โครงสร้างของ Gamma - Aminopropyltrimethoxysilane,” เข้าถึงเมื่อ 29 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?lang=en&N4=281778|ALDRICH&N5=SEARCH_CONCAT_PNO|BRAND_KEY&F=SPEC
- [16] Chemical Book, “โครงสร้างของ 3-[2-(2-Aminoethylamino)ethylamino]propyltrimethoxy silane,” เข้าถึงเมื่อ 29 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB8443944_EN.htm
- [17] จีราวรรณ หาญวัฒนกุล, (2007), “โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน,” เข้าถึงเมื่อ 22 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก [www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/ bla_4_2550 _foams.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/bla_4_2550_foams.pdf)
- [18] ศรีนิล, “เทคโนโลยีพลาสติก,” ร. ศ. บ. 1999.
- [19] “นวนวนโฟม,” เข้าถึงเมื่อ 27 สิงหาคม 2553, เข้าถึงได้จาก <http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/book/foam.htm>
- [20] พงศ์สรฤทธิ์, “ผลของ Chemical foaming agents และชนิดของสารเสริมแรงต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่มีโครงแบบโฟม,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2004.
- [21] เดไส, “ผลร่วมของพอลิเมอร์ร่วมเอทิลีนออกทีน ทัลค์ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเอทิลีนแบบอัดฉีด,” ช. ช. 2004.
- [22] วรมงคลชัย, “เทคโนโลยี พอลิเมอร์,” ร. ค. ศ. 2005.
- [23] Chemsynthesis, “1,2,3-propanetricarboxylic acid,” เข้าถึงเมื่อ 27 มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก <http://www.chemsynthesis.com/base/chemical-structure-14678.html>
- [24] Chemicaland 21, “5-Phenyl-1H-tetrazole,” เข้าถึงเมื่อ 30 มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก <http://www.chemicaland21.com/lifescience/phar/5-PHENYL-1H-TETRAZOLE.htm>
- [25] Patentstorm, “N-substituted 5-phenyltetrazoles as high temperature blowing agents,” เข้าถึงเมื่อ 30 มิถุนายน 2554, เข้าถึงได้จาก <http://www.patentstorm.us/patents/4774266/description.html>

- [26] M.A. Khan., F. Mina, and L.T. Drzal, "Influence of silane coupling agents of different functionalities on the performance of jute-polycarbonate composite," Composite Materials and Structures Center, (2000): 5-10.
- [27] P. Threepopnatkul, N. Keaerkitcha, and N. Athipongarporn, "Effect of surface treatment on performance of pineapple leaf fiber-polycarbonate composites," Composites: Part B, 40 (2009): 628-632.
- [28] M. Abdelmouleh et al, "Modification of cellulosic fibres with functionalised silanes: development of surface properties," International Journal of Adhesion & Adhesives, 24 (2004): 43–54.
- [29] Z. Dominkovics, L. Danyadi, and B. Pukanszky, "Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites," Composites: Part A, 38 (2007): 1893–1901.
- [30] R. Gosselin and D. Rodrigue, "Injection Molding of Postconsumer Wood–Plastic Composites II: Mechanical Properties," Journal of Thermoplastic Composite Materials, 19 (2006): 659-669.
- [31] C. Xiong, R. Qi, and Y. Wang, "Wood-Thermoplastic Composites from Wood Flour and High-Density Polyethylene," Applied Polymer Science, 114 (2009): 1160–1168.
- [32] A. K. Bledzki and O. Faruk, "Injection moulded microcellular wood fibre–polypropylene composites," Composites: Part A, 37 (2006): 1358–1367.
- [33] R. Nayak, T. Dora, and A. Satapathy, "A computational and experimental investigation on thermal conductivity of particle reinforced epoxy composites," Computational Materials Science, 48 (2010): 576–581.
- [34] W. Yamsaengsung and N. Sombatsompop, "Effect of chemical blowing agent on cell structure and mechanical properties of EPDM foam, and peel strength and thermal conductivity of wood/NR composite–EPDM foam laminates," Composites: Part B, 40 (2009): 594–600.
- [35] F.N. Liberti et al., "Polycarbonate Resin Foam," U.S. Patent, Patent No. 4,581,382 Apr. 8 (1986).
- [36] J.E. Parrott and A.D. Stuckes, "Thermal Conductivity of Solids," Pion Limited, London, (1975), 1.

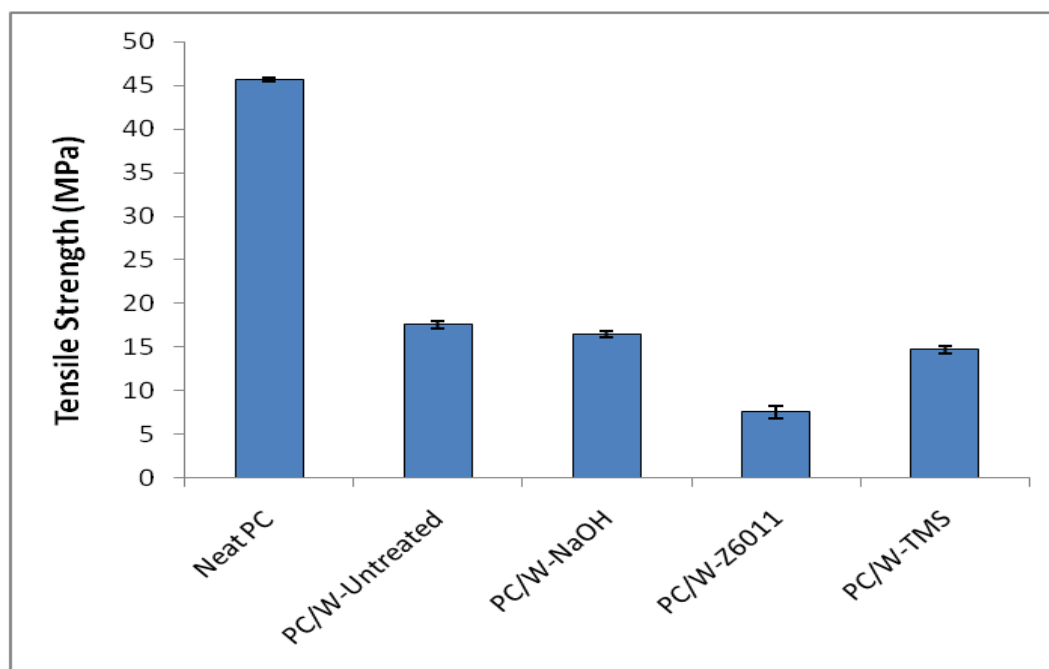
- [37] S. Thongsang and N. Sombatsompop, "Effect of NaOH and Si69 treatments on properties of fly ash/natural rubber composites," Polymer Processing and Flow (P-Prof) group, 30-40.
- [38] N. Sombatsompop and K. Chaochanchaikul, "Average mixing torque, Tensile and Impact Properties, and Thermal stability of Poly(vinyl chloride)/Sawdust composites with difference silane coupling agents," Polymer Processing and Flow (P-Prof) group, Wiley InterScience, 213-221.
- [39] P.J. Herrera-Franco and A. Valadez-González, "Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites," *Composites: Part A* (2004), 35:339-345.
- [40] J. Gassan and A.K. Bledzki, "Effect of the moisture content on the properties of silanized jute-epoxy composites," *Polym Compos* 1997, 18: 179-84.
- [41] L. Chotirat, K. Chaochanchaikul, and N. Sombatsompop, "On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile-butadiene-styrene/wood sawdust composites," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27 (2007): 669-678.
- [42] V.G. Nemzer and V.V. Pugach, "Thermal Conductivity of Polythyl Siloxane Liquids at High Pressures," (1976), 1061.
- [43] L. Danyadi, J. Moczo, and B. Pukanszky, "Effect of various surface modifications of wood flour on the properties of PP/wood composites," *Composites: Part A*, 41 (2010): 199-206.
- [44] Engineering Seramics, "บทที่ 9 การทดสอบความแข็ง," เข้าถึงเมื่อ 9 มกราคม 2555, เข้าถึงได้จาก http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u97-10.htm
- [45] สุภัทรชัย แสงวงศ์, "สมบัติเชิงกลพลวัตและสัณฐานวิทยาของโพลีคอมพอสิตพอลิโพรไพลีนและผงจีเลื้อยไม้ยางพารา," (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550).
- [46] City Collegiate, "GRAHAM'S LAW OF DIFFUSION," เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2555, เข้าถึงได้จาก http://www.citycollegiate.com/grahams_lawXI.htm

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิ
คาร์บอเนต

1. ข้อมูลการทดสอบ Tensile ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอลิตระบบต่างๆ

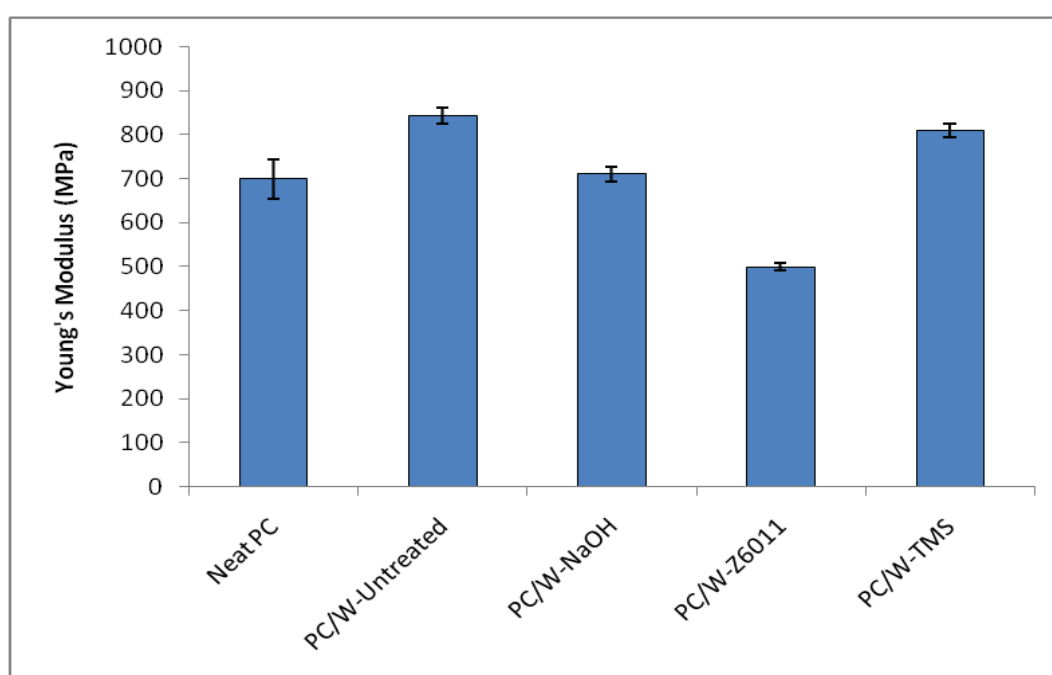


ภาพที่ 67 แสดงค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอลิตของพอลิคาร์บอเนต

ตารางที่ 14 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า tensile strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอลิตของพอลิคาร์บอเนต

ตัวอย่างที่	Tensile strength (MPa)				
	Neat PC	PC/W-Untreated	PC/W-NaOH	PC/W-Z6011	PC/W-TMS
1	45.472	17.016	16.250	7.130	15.254
2	45.759	17.946	16.547	8.421	15.344
3	45.488	18.087	16.025	7.211	14.518
4	45.962	17.849	16.468	8.407	14.641
5	45.922	17.004	16.480	7.099	14.335
6	45.636	17.594	16.603	7.155	14.014
7	45.633	17.990	15.962	8.665	14.894

8	45.135	17.109	16.896	8.017	14.444
9	45.562	17.230	16.770	6.561	14.703
10	45.737	17.795	16.188	6.961	15.277
Average	45.63	17.56	16.47	7.56	14.74
SD	0.24	0.43	0.32	0.75	0.45

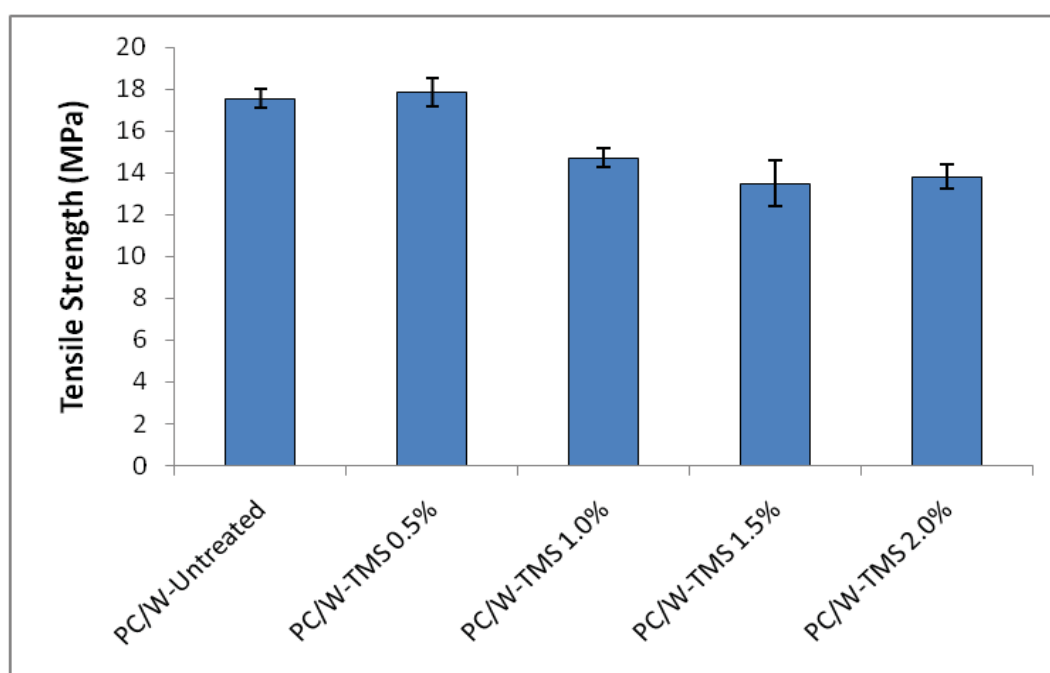


ภาพที่ 68 แสดงค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตารางที่ 15 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Young's modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตัวอย่างที่	Young's modulus (MPa)				
	Neat PC	PC/W-Untreated	PC/W-NaOH	PC/W-Z6011	PC/W-TMS
1	770.67	900.08	781.06	559.45	755.71
2	635.25	909.17	694.53	461.65	802.83

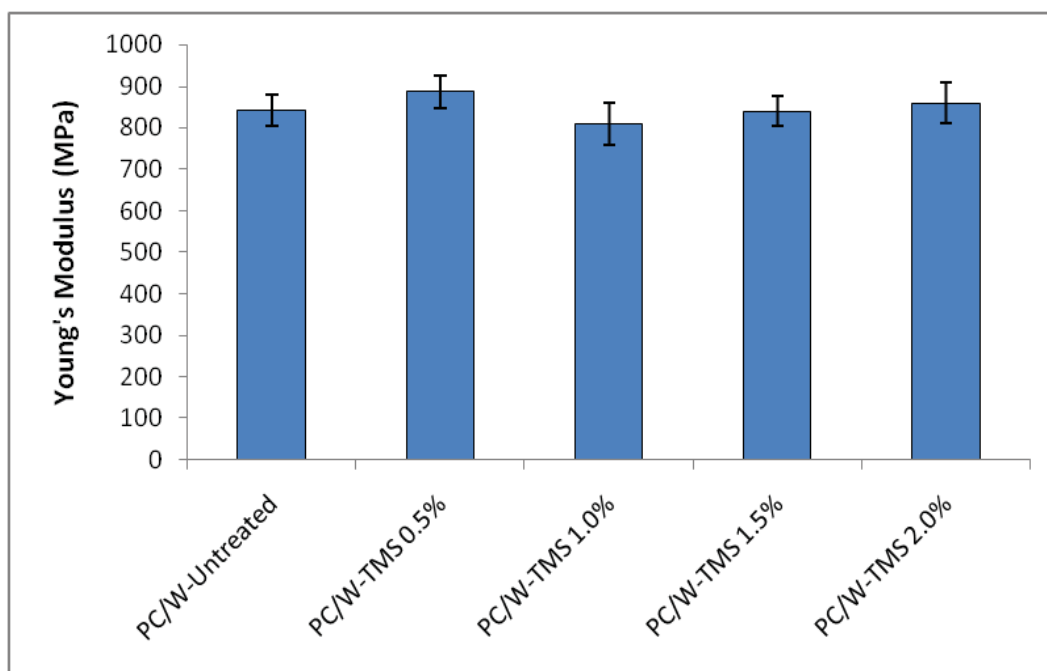
3	659.44	858.94	654.12	479.77	767.49
4	675.47	802.96	752.24	590.84	760.59
5	739.44	911.39	763.54	559.99	743.13
6	769.00	845.88	768.95	461.57	848.73
7	677.50	854.59	650.73	472.11	829.35
8	675.07	923.13	631.70	460.17	882.03
9	640.89	747.29	639.99	420.84	877.06
10	751.68	760.74	770.43	531.30	826.59
Average	699.44	842.85	710.73	499.77	809.35
SD	52.8	67.0	62.1	56.2	51.1



ภาพที่ 69 แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไฮโดรเจน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 16 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไฮเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Tensile strength (MPa)				
	PC/W-Untreated	PC/W-TMS 0.5%	PC/W-TMS 1.0%	PC/W-TMS 1.5%	PC/W-TMS 2.0%
1	17.016	17.536	755.71	13.477	13.340
2	17.946	18.088	802.83	14.951	14.445
3	18.087	19.630	767.49	13.500	13.247
4	17.849	17.408	760.59	12.634	14.245
5	17.004	17.503	743.13	12.278	13.226
6	17.594	17.886	848.73	13.094	14.096
7	17.990	17.790	829.35	13.824	13.330
8	17.109	17.166	882.03	13.251	14.634
9	17.230	18.044	877.06	13.063	13.336
10	17.795	17.508	826.59	14.976	14.201
Average	17.56	17.86	809.35	13.50	13.81
SD	0.43	0.69	51.1	1.07	0.56

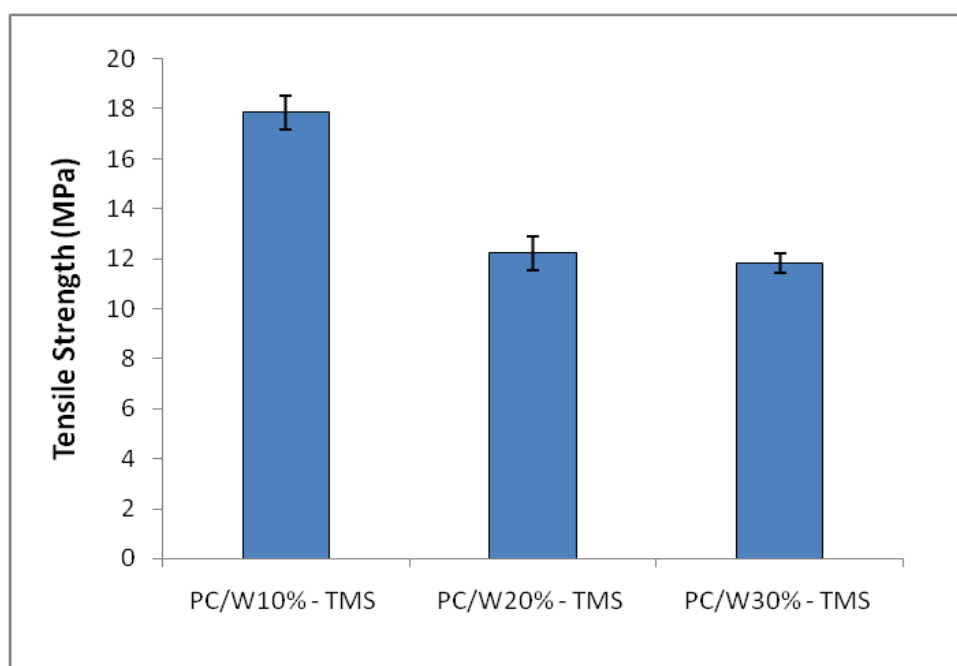


ภาพที่ 70 แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไฮเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 17 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไฮเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Young's modulus (MPa)				
	PC/W-Untreated	PC/W-TMS 0.5%	PC/W-TMS 1.0%	PC/W-TMS 1.5%	PC/W-TMS 2.0%
1	900.08	843.19	755.71	816.01	857.83
2	909.17	845.77	802.83	817.69	803.80
3	858.94	897.56	767.49	803.25	923.96
4	802.96	944.04	760.59	828.06	818.26
5	911.39	876.73	743.13	893.48	917.25
6	845.88	849.80	848.73	901.59	938.32
7	854.59	868.61	829.35	826.08	826.62
8	923.13	933.82	882.03	806.00	842.82

9	747.29	877.41	877.06	870.27	818.40
10	760.74	938.45	826.59	838.17	846.85
Average	842.85	887.54	809.35	840.06	859.41
SD	67.0	39.0	51.1	35.7	49.1

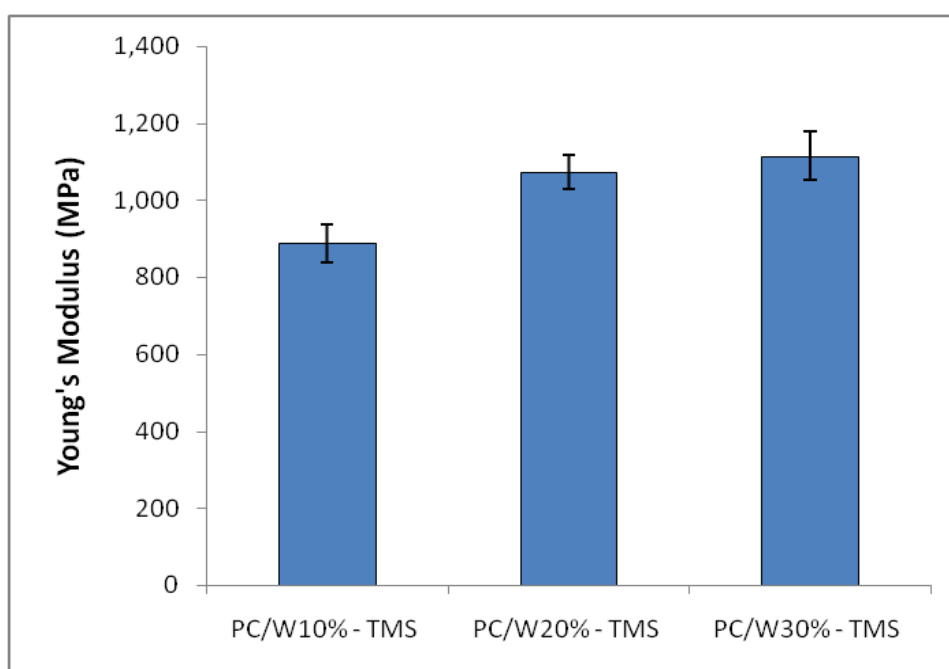


ภาพที่ 71 แสดงค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 18 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Tensile strength (MPa)		
	PC/W10%-TMS 0.5%	PC/W20%-TMS 0.5%	PC/W30%-TMS 0.5%
1	17.536	11.331	11.450
2	18.088	12.972	12.234
3	19.630	11.522	11.345

4	17.408	12.088	11.441
5	17.503	12.850	12.253
6	17.886	13.014	11.610
7	17.790	13.032	12.315
8	17.166	12.441	11.932
9	18.044	11.650	11.994
10	17.508	11.414	11.757
Average	17.86	12.23	11.83
SD	0.69	0.66	0.37

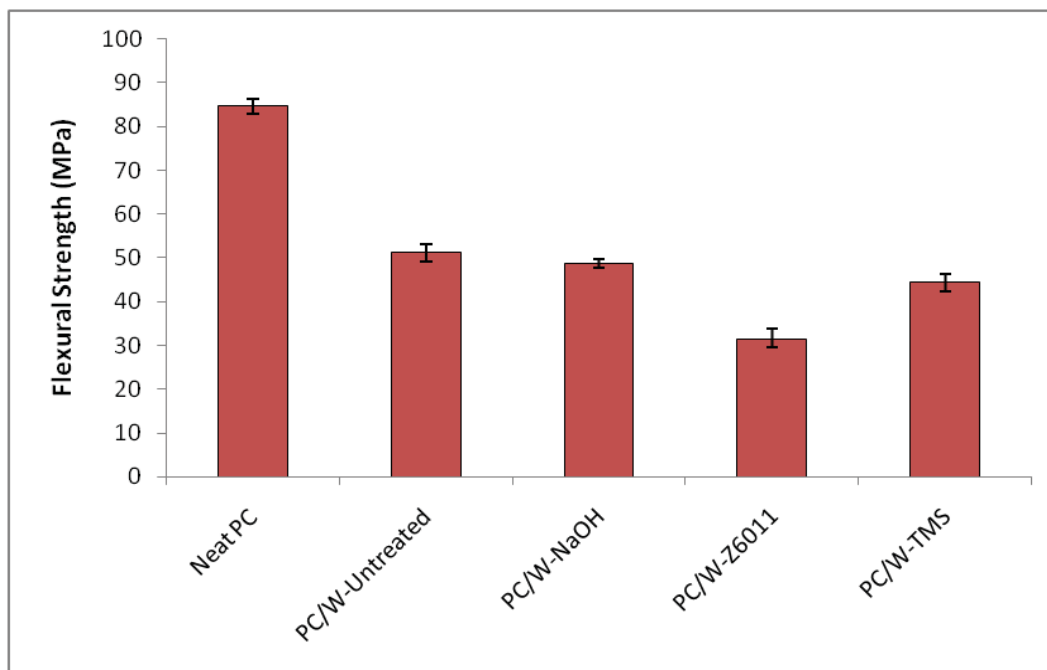


ภาพที่ 72 แสดงค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเยียมไนโอในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 19 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Young's modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่ต่างกัน

ตัวอย่างที่	Young's modulus (MPa)		
	PC/W10%-TMS 0.5%	PC/W20%-TMS 0.5%	PC/W30%-TMS 0.5%
1	843.19	1,073.04	1,061.69
2	845.77	1,127.34	1,180.27
3	897.56	1,010.57	1,197.23
4	944.04	1,011.46	1,061.31
5	876.73	1,071.49	1,021.08
6	849.80	1,057.39	1,175.71
7	868.61	1,103.00	1,141.17
8	933.82	1,124.67	1,053.39
9	877.41	1,043.42	1,113.67
10	938.45	1,108.01	1,145.57
Average	887.54	1,073.04	1,115.11
SD	39.0	42.9	62.1

2. ข้อมูลการทดสอบ Flexural ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตระบบต่างๆ

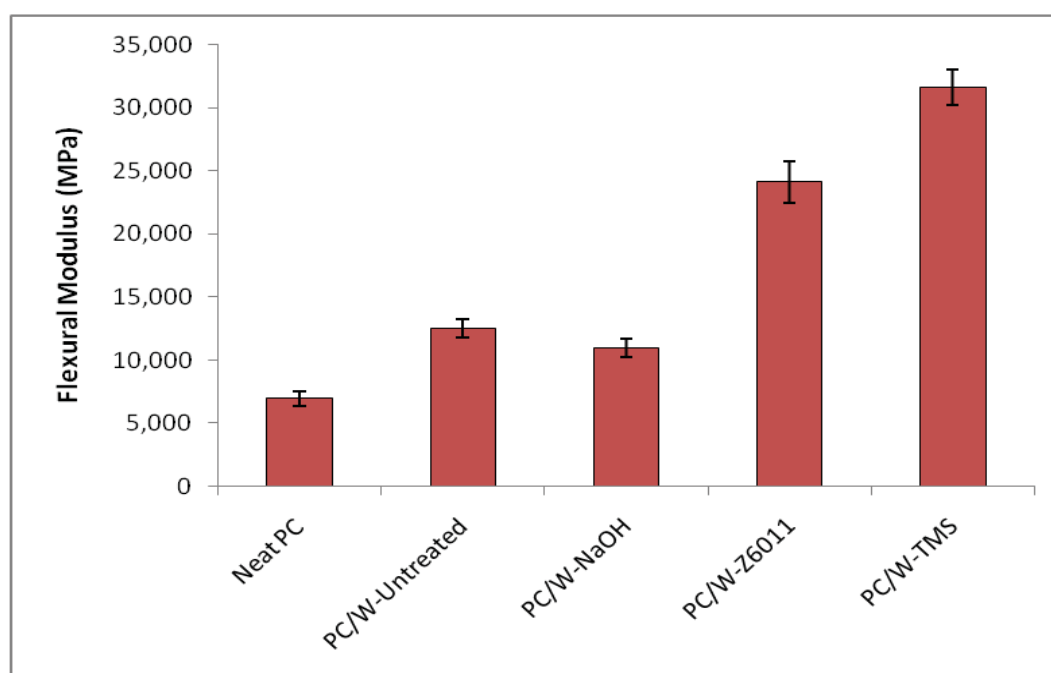


ภาพที่ 73 แสดงค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)				
	Neat PC	PC/W-Untreated	PC/W-NaOH	PC/W-Z6011	PC/W-TMS
1	86.659	53.856	47.028	28.898	41.128
2	86.263	53.850	49.291	29.116	46.012
3	83.715	50.195	48.147	33.101	45.338
4	82.259	49.039	49.650	33.025	43.620
5	82.649	51.432	50.046	32.177	46.308
6	86.243	50.275	48.062	34.477	45.321
7	85.030	49.856	48.352	30.289	42.874

Average	84.69	51.22	48.65	31.58	44.37
SD	1.8	1.9	1.1	2.2	1.9

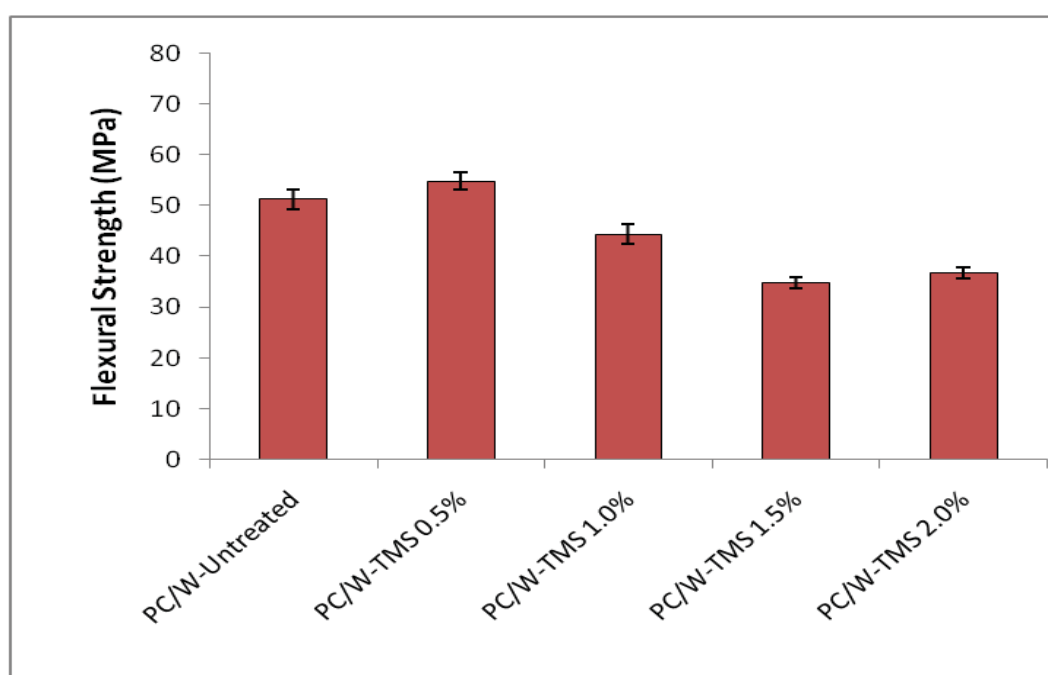


ภาพที่ 74 แสดงค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural modulus ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตัวอย่างที่	Flexural modulus (MPa)				
	Neat PC	PC/W-Untreated	PC/W-NaOH	PC/W-Z6011	PC/W-TMS
1	7,180.39	12,781.01	10,912.48	25,430.47	29,133.70
2	6,493.30	12,264.39	14,457.39	27,475.11	27,781.52
3	6,369.57	12,136.79	10,318.72	29,694.09	28,205.95
4	6,601.27	12,199.54	13,661.23	21,038.10	36,118.79
5	7,880.37	11,706.06	12,717.53	20,767.03	31,035.69

6	6,451.38	12,612.02	14,457.39	24,301.69	35,021.24
7	7,626.40	14,005.06	11,175.72	20,218.52	33,832.96
Average	6,943	12,529	10,943	24,132	31,590
SD	618	736	703	1,652	1,406

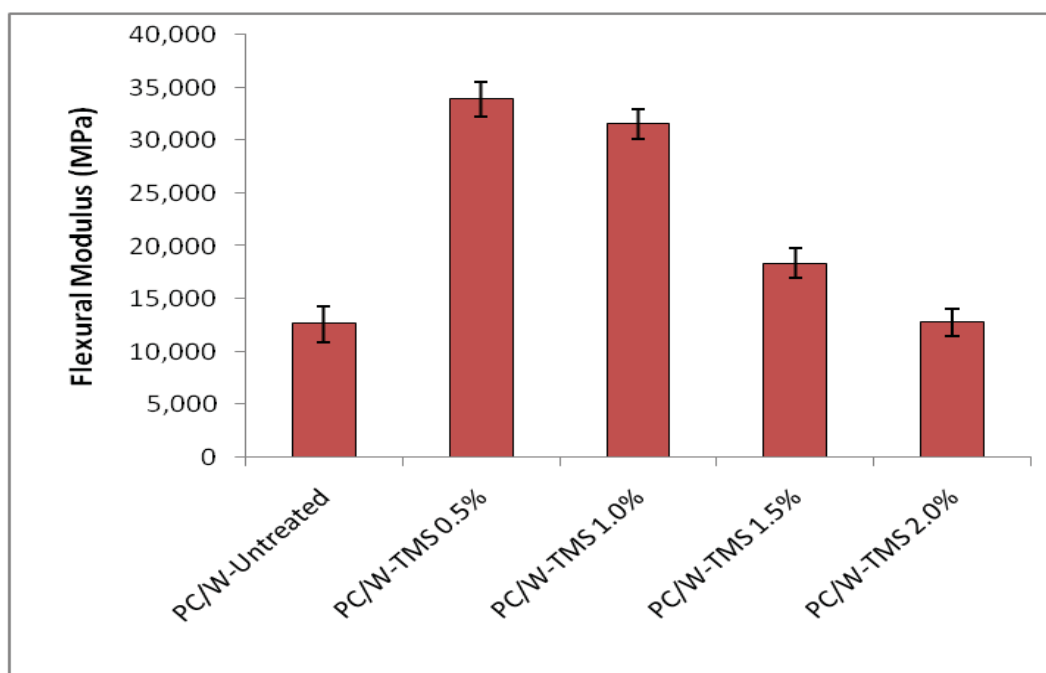


ภาพที่ 75 แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 22 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยไซเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)				
	PC/W-Untreated	PC/W-TMS 0.5%	PC/W-TMS 1.0%	PC/W-TMS 1.5%	PC/W-TMS 2.0%
1	53.856	56.659	41.128	35.845	35.771
2	53.850	53.319	46.012	34.850	36.933

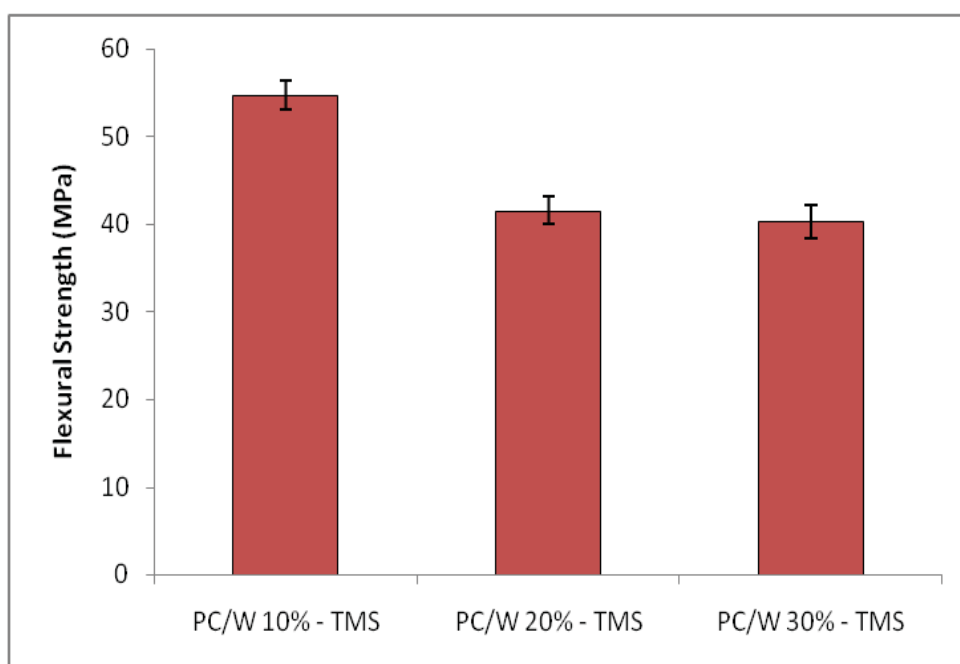
3	50.195	54.805	45.338	36.152	35.374
4	49.039	54.124	43.620	33.610	38.270
5	51.432	55.760	46.308	34.918	36.181
6	50.275	56.630	45.321	32.838	37.654
7	49.856	52.053	42.874	35.094	37.220
Average	51.22	54.76	44.37	34.76	36.77
SD	1.9	1.7	1.9	1.1	1.0



ภาพที่ 76 แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วย
 เกล็ด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วยเลนชนิด TMS ในปริมาณที่ต่างกัน

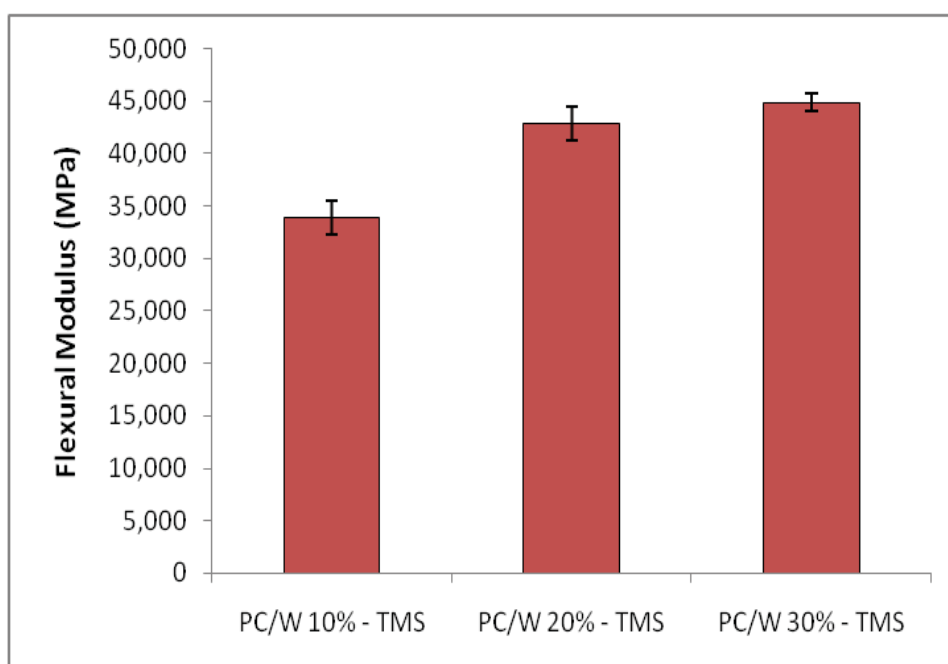
ตัวอย่างที่	Flexural modulus (MPa)				
	PC/W-Untreated	PC/W-TMS 0.5%	PC/W-TMS 1.0%	PC/W-TMS 1.5%	PC/W-TMS 2.0%
1	12,781.01	33,260.15	29,133.70	17,228.21	11,808.30
2	12,264.39	34,876.13	27,781.52	17,358.64	12,187.10
3	12,136.79	32,299.29	28,205.95	19,939.97	12,162.06
4	12,199.54	34,912.83	36,118.79	19,997.26	14,613.28
5	11,706.06	32,374.33	31,035.69	17,073.06	13,830.71
6	12,612.02	32,780.88	35,021.24	17,231.00	11,202.29
7	14,005.06	36,629.60	33,832.96	19,625.13	13,832.62
Average	12,529	33,876	31,590	18,350	12,805
SD	1,703	1,632	1,406	1,413	1,273



ภาพที่ 77 แสดงค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 24 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)		
	PC/W10%-TMS 0.5%	PC/W20%-TMS 0.5%	PC/W30%-TMS 0.5%
1	56.659	39.465	40.305
2	53.319	40.342	40.375
3	54.805	41.777	39.356
4	54.124	43.473	41.607
5	55.760	39.975	37.227
6	56.630	43.050	43.151
7	52.053	42.684	39.727
Average	54.76	41.54	40.25
SD	1.7	1.6	1.9

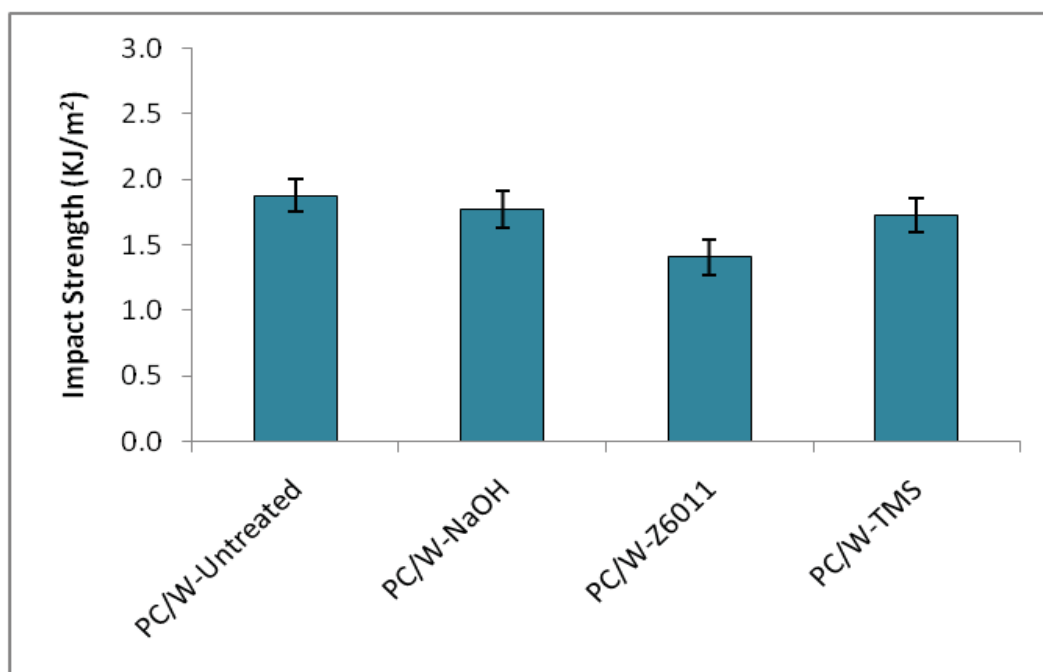


ภาพที่ 78 แสดงค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า flexural modulus ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Flexural modulus (MPa)		
	PC/W10%-TMS 0.5%	PC/W20%-TMS 0.5%	PC/W30%-TMS 0.5%
1	33,260.15	13,675.37	14,004.05
2	34,876.13	14,170.07	15,149.93
3	32,299.29	13,811.65	16,144.96
4	34,912.83	10,502.93	14,776.36
5	32,374.33	11,595.74	13,779.01
6	32,780.88	14,703.54	14,907.53
7	36,629.60	11,700.61	15,360.25
Average	33,876	42,880	44,875
SD	1,632	1,591	806

3. ข้อมูลการทดสอบ Impact strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตระบบต่างๆ

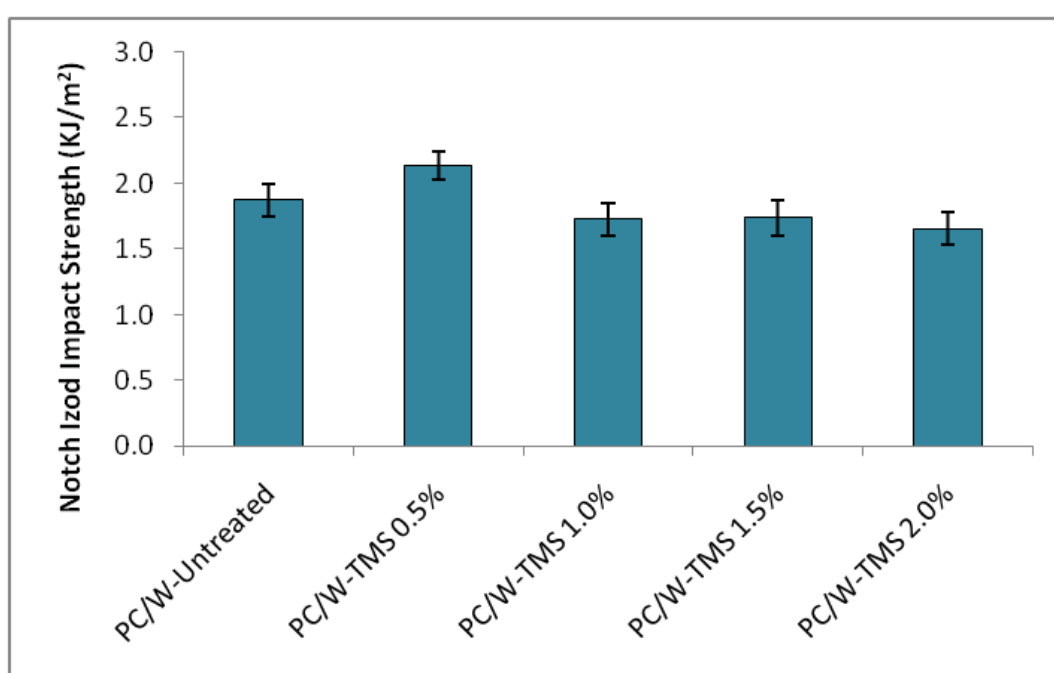


ภาพที่ 79 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ตัวอย่างที่	Impact strength (MPa)				
	Neat PC	PC/W-Untreated	PC/W-NaOH	PC/W-Z6011	PC/W-TMS
1	84.967	1.716	1.154	0.735	1.301
2	87.791	1.201	1.093	0.943	1.591
3	69.353	1.620	1.284	0.794	1.443
4	77.898	1.839	1.742	1.014	1.296
5	85.730	1.594	1.939	1.072	1.193
6	-	1.410	1.599	0.873	0.991
7	-	1.819	-	0.732	0.972
8	-	1.411	-	1.026	1.020

9	-	-	-	0.841	-
10	-	-	-	0.804	-
11	-	-	-	1.132	-
Average	81.148	1.576	1.469	0.906	1.226
SD	7.573	0.222	0.343	0.139	0.225

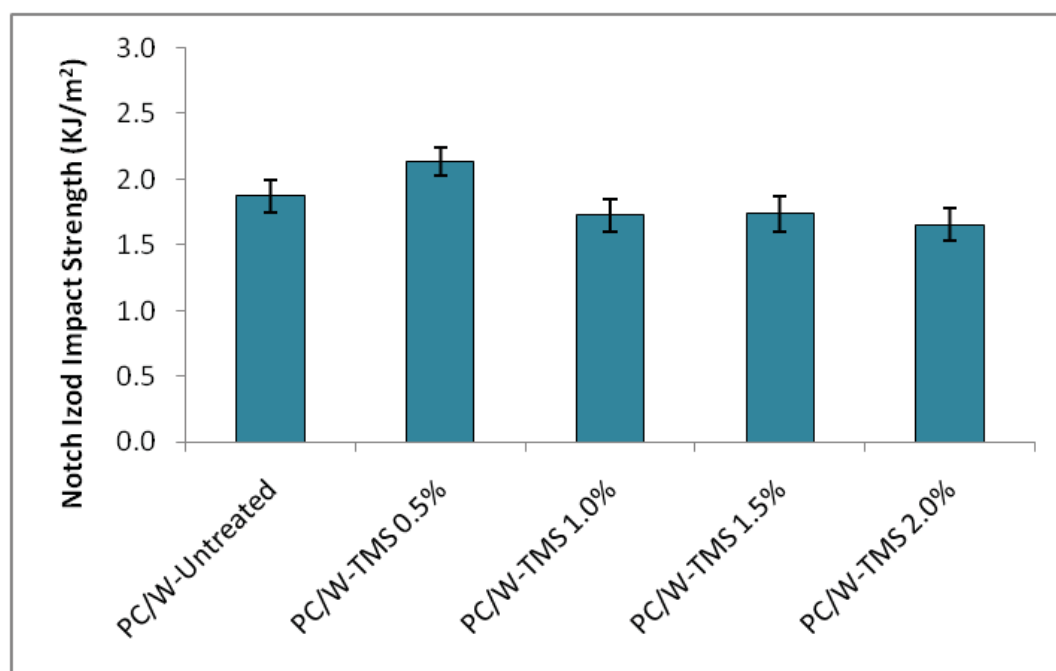


ภาพที่ 80 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงด้วย
เลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 27 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มี
การปรับปรุงด้วยเลนชนิด TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Impact strength (MPa)				
	PC/W- Untreated	PC/W-TMS 0.5%	PC/W-TMS 1.0%	PC/W-TMS 1.5%	PC/W-TMS 2.0%
1	1.716	1.884	1.301	1.133	1.295

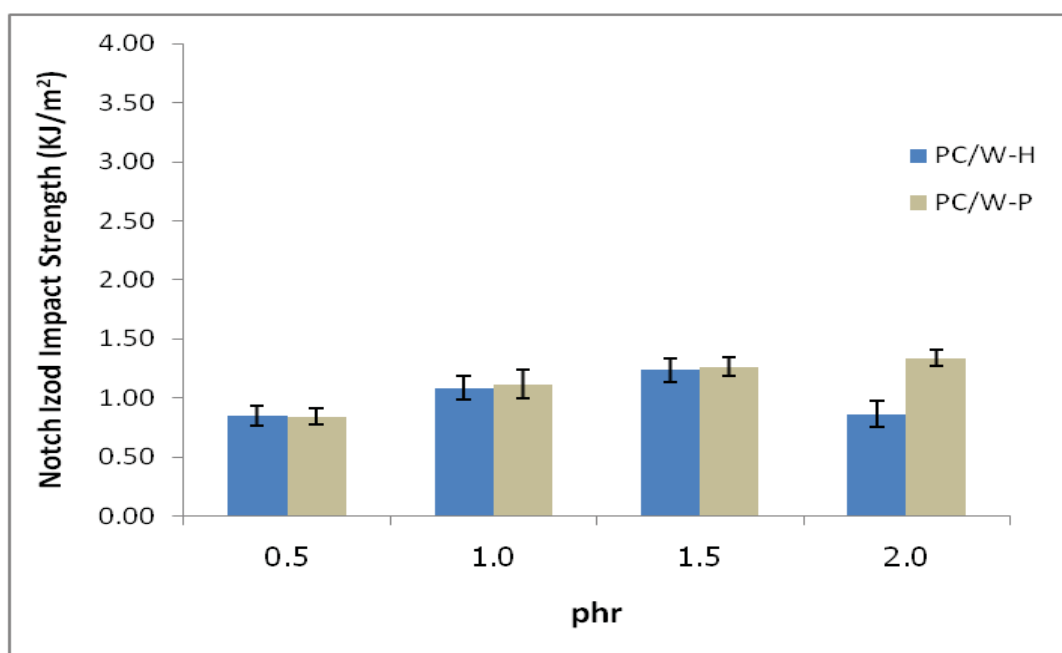
2	1.201	1.534	1.591	1.480	1.381
3	1.620	1.458	1.443	1.816	1.466
4	1.839	1.853	1.296	1.439	1.663
5	1.594	1.555	1.193	1.269	1.443
6	1.410	1.520	0.991	1.487	1.124
7	1.819	-	0.972	-	1.124
8	1.411	-	1.020	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-
Average	1.576	1.634	1.226	1.437	1.357
SD	0.222	0.185	0.225	0.232	0.194



ภาพที่ 81 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงขี้เถ้าในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 28 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Impact strength (MPa)		
	PC/W10%-TMS 0.5%	PC/W20%-TMS 0.5%	PC/W30%-TMS 0.5%
1	1.301	0.960	0.934
2	1.591	0.946	1.139
3	1.443	1.411	0.938
4	1.296	1.080	0.957
5	1.193	1.307	1.262
6	0.991	1.197	1.095
7	0.972	1.157	1.128
8	1.020	1.135	-
9	-	1.279	-
10	-	1.071	-
Average	1.226	1.154	1.065
SD	0.225	0.149	0.125



ภาพที่ 82 แสดงค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคาร์บอเนตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 29 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของพอลิคาร์บอเนต และวัสดุโพลีคาร์บอเนตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Impact strength (MPa)					
	PC Pure	PC/W-H0.0	PC/W-H0.5	PC/W-H1.0	PC/W-H1.5	PC/W-H2.0
1	11.490	1.107	0.800	1.299	1.338	0.749
2	11.458	1.097	0.975	1.265	1.442	0.811
3	11.169	1.206	0.997	0.910	1.405	0.813
4	10.046	1.084	0.803	1.201	1.164	0.882
5	10.735	1.079	0.932	1.268	1.281	0.834
6	10.514	1.109	0.812	0.986	1.155	0.959
7	11.586	1.065	0.889	0.894	1.318	0.792
8	11.477	1.174	0.995	0.946	1.157	0.773
9	10.325	1.226	0.871	1.012	1.392	0.885

10	-	1.222	0.861	0.904	1.255	0.956
11	-	-	0.906	0.867	1.378	0.747
12	-	-	0.828	0.813	1.280	0.751
13	-	-	0.994	-	1.258	0.906
Average	10.778	1.180	0.850	1.088	1.237	0.869
SD	0.657	0.161	0.080	0.198	0.228	0.077

ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Impact strength ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง ที่	Impact strength (MPa)				
	PC/W-P0.0	PC/W-P0.5	PC/W-P1.0	PC/W-P1.5	PC/W-P2.0
1	1.107	0.874	1.299	1.164	1.378
2	1.097	0.881	1.265	1.278	1.278
3	1.206	0.866	1.201	1.255	1.405
4	1.084	0.925	1.036	1.164	1.296
5	1.079	0.793	0.986	1.278	1.255
6	1.109	0.880	1.098	1.255	1.378
7	1.065	0.927	0.986	1.378	1.278
8	1.174	0.756	1.201	1.289	1.280
9	1.226	0.811	1.036	1.173	1.442
10	1.222	0.750	1.265	1.278	1.255
11	-	0.866	1.098	1.255	1.378
12	-	0.732	0.986	1.378	1.378
13	-	0.743	1.201	1.280	1.280
14	-	0.874	0.952	1.258	1.442
15	-	0.941	-	-	1.405
Average	1.180	0.841	1.115	1.263	1.342
SD	0.161	0.071	0.121	0.081	0.069

3. ข้อมูลการทดสอบ Hardness ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตระบบต่างๆ

ตารางที่ 31 แสดงค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ปริมาณการใช้ (phr)	Hardness (Shore D)	
	PC/W-H	PC/W-P
0.5	44.4 ± 2.5	50.6 ± 1.8
1.0	47.0 ± 1.4	51.6 ± 1.9
1.5	40.2 ± 2.5	52.1 ± 1.8
2.0	38.9 ± 2.3	52.7 ± 1.5

ตารางที่ 32 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Hardness (Shore D)					
	PC Pure	PC/W-H0.0	PC/W-H0.5	PC/W-H1.0	PC/W-H1.5	PC/W-H2.0
1	71	30	39	47	38	40
2	71	31	46	45	42	39
3	71	34	46	46	40	38
4	71	33	45	45	44	39
5	70	32	48	47	42	40
6	70	30	40	46	36	42
7	69	30	44	47	38	43
8	69	31	48	49	38	41
9	70	32	48	48	40	38
10	68	30	39	48	44	40
11	70	35	40	49	42	37
12	70	33	44	45	40	29

13	72	32	46	47	42	40
14	71	-	48	-	40	39
15	69	-	-	-	37	-
Average	70.13	31.77	44.36	47.00	40.20	38.93
SD	1.06	1.64	3.48	1.41	2.46	3.27

ตารางที่ 33 แสดงข้อมูลการทดสอบค่า Hardness ของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	Hardness (Shore D)				
	PC/W-P0.0	PC/W-P0.5	PC/W-P1.0	PC/W-P1.5	PC/W-P2.0
1	30	51	54	54	54
2	31	52	49	50	53
3	34	53	50	53	52
4	33	51	51	52	52
5	32	52	53	50	53
6	30	53	54	49	51
7	30	52	53	50	50
8	31	50	48	54	50
9	32	51	50	54	53
10	30	47	52	51	54
11	35	49	52	53	53
12	33	50	53	54	54
13	32	48	54	53	53
14	-	49	50	53	55
15	-	-	51	-	53
Average	31.77	50.57	51.60	52.14	52.67
SD	1.64	1.83	1.92	1.79	1.45

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตของพอลิ
คาร์บอเนต

2. ข้อมูลการทดสอบ Thermal conductivity ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตระบบต่างๆ

ตารางที่ 34 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ที่ปริมาณการใช้ผงซีลีเนียม 10% โดยน้ำหนักของคอมพอสิต

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
Neat PC	0.1650 ± 0.0018
PC/W- Untreated	0.1088 ± 0.0023
PC/W- NaOH	0.1081 ± 0.0003
PC/W- Z6011 1.0%	0.0904 ± 0.0004
PC/W- TMS 1.0%	0.0941 ± 0.0002

ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต

ครั้งที่	Thermal conductivity (W/m ² K)				
	Neat PC	PC/W- Untreated	PC/W- NaOH	PC/W- Z6011 1.0%	PC/W- TMS 1.0%
1	0.166657496	0.111129131	0.107784028	0.090433273	0.094127973
2	0.163076329	0.106479922	0.108354299	0.090102823	0.094265757
3	0.165480584	0.108671526	0.108090087	0.090810968	0.093953539
Average	0.165071470	0.108760193	0.108076138	0.090449021	0.094115756
SD	0.00182530	0.002325873	0.00028539	0.000354335	0.000156467

ตารางที่ 36 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างชิ้นงาน	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
PC/W- Untreated	0.1088 ± 0.0023
PC/W- TMS 0.5%	0.0928 ± 0.0002
PC/W- TMS 1.0%	0.0941 ± 0.0002
PC/W- TMS 1.5%	0.0933 ± 0.0010
PC/W- TMS 2.0%	0.0916 ± 0.0008

ตารางที่ 37 แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน TMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ครั้งที่	Thermal conductivity (W/m ² K)				
	PC/W- Untreated	PC/W- TMS 0.5%	PC/W- TMS 1.0%	PC/W- TMS 1.5%	PC/W- TMS 2.0%
1	0.111129131	0.092675569	0.094127973	0.093127533	0.092365816
2	0.106479922	0.092981133	0.094265757	0.093368563	0.091631612
3	0.108671526	0.092746372	0.093953539	0.093350079	0.090715316
Average	0.108760193	0.092801025	0.094115756	0.093282058	0.091570915
SD	0.002325873	0.000159945	0.000156467	0.000134142	0.000826923

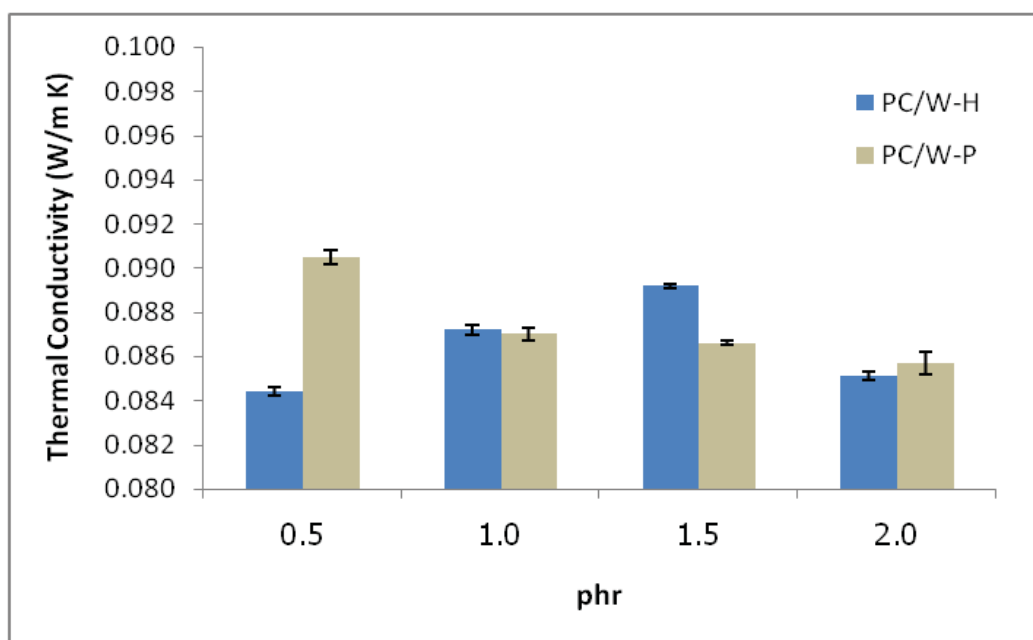
ตารางที่ 38 แสดงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

สัดส่วนในคอมพอสิต (%wt)		ค่าการนำความร้อน (W/m K)	
พอลิคาร์บอเนต	ผงซีลีเนียม	การทดลอง	ทฤษฎี
0	100	0.0800	
100	0	0.1650	

90	10	0.0928 ± 0.0005	0.1565
80	20	0.0920 ± 0.0001	0.1480
70	30	0.0916 ± 0.0004	0.1395

ตารางที่ 39 แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนตที่มีการเติมผงซีลีเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน

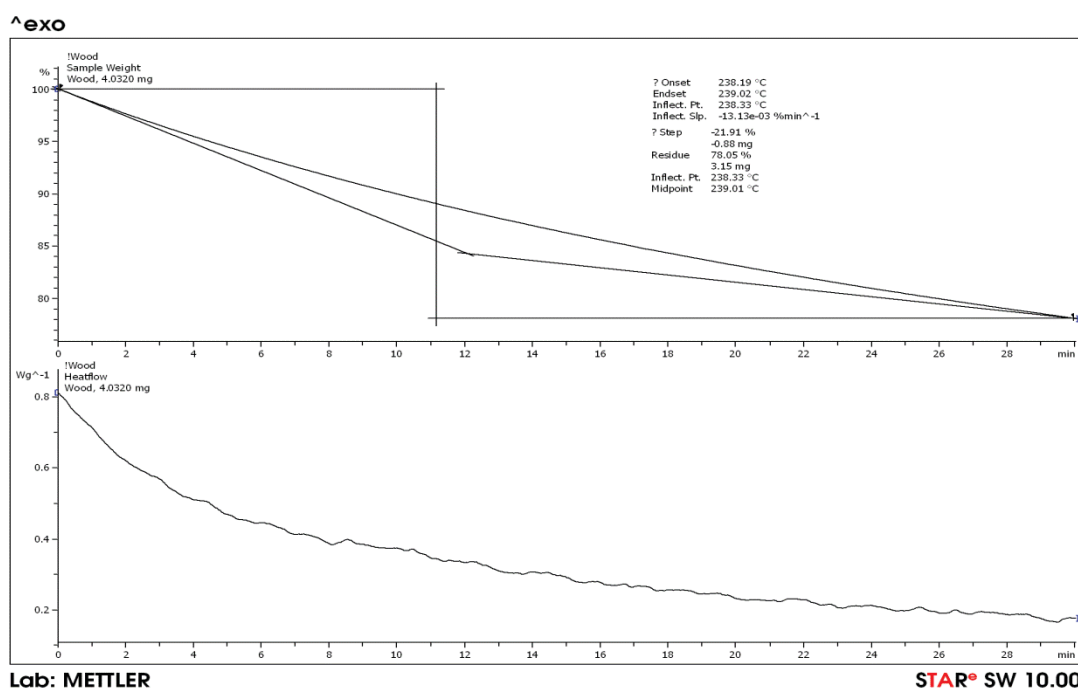
ครั้งที่	Thermal conductivity ($\text{W/m}^2\text{K}$)		
	PC/W10%- TMS 0.5%	PC/W20%- TMS 0.5%	PC/W30%- TMS 0.5%
1	0.092675569	0.092157064	0.091186494
2	0.092981133	0.091912611	0.091914125
3	0.092746372	0.092044671	0.091719544
Average	0.092801025	0.092038115	0.091606721
SD	0.000159945	0.000122358	0.000376707



ภาพที่ 83 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุไฟคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 40 แสดงข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุโฟมคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่ต่างกัน

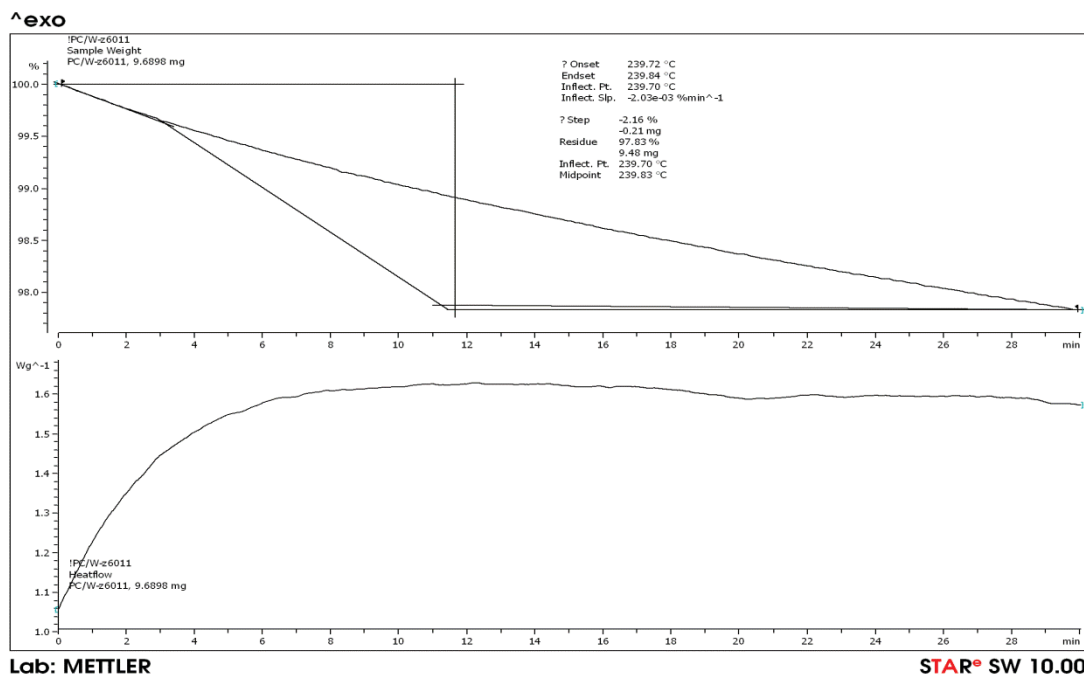
Sample	Thermal conductivity (W/m ² K)				
	1	2	3	Average	SD
PC/W-H0.5	0.084330816	0.084631612	0.084152158	0.084371529	0.000242306
PC/W-H1.0	0.087435448	0.087623165	0.087209833	0.087422815	0.000206956
PC/W-H1.5	0.089214567	0.089205266	0.089366155	0.089261996	0.000090324
PC/W-H2.0	0.085358467	0.085492660	0.085111555	0.085320894	0.000193311
PC/W-P0.5	0.087183201	0.087625198	0.087813812	0.087540737	0.000323678
PC/W-P1.0	0.087305095	0.087224751	0.086739472	0.087089773	0.000306017
PC/W-P1.5	0.086614071	0.086505448	0.086391262	0.086559760	0.000111416
PC/W-P2.0	0.085487249	0.085376244	0.086269274	0.085710922	0.000486722



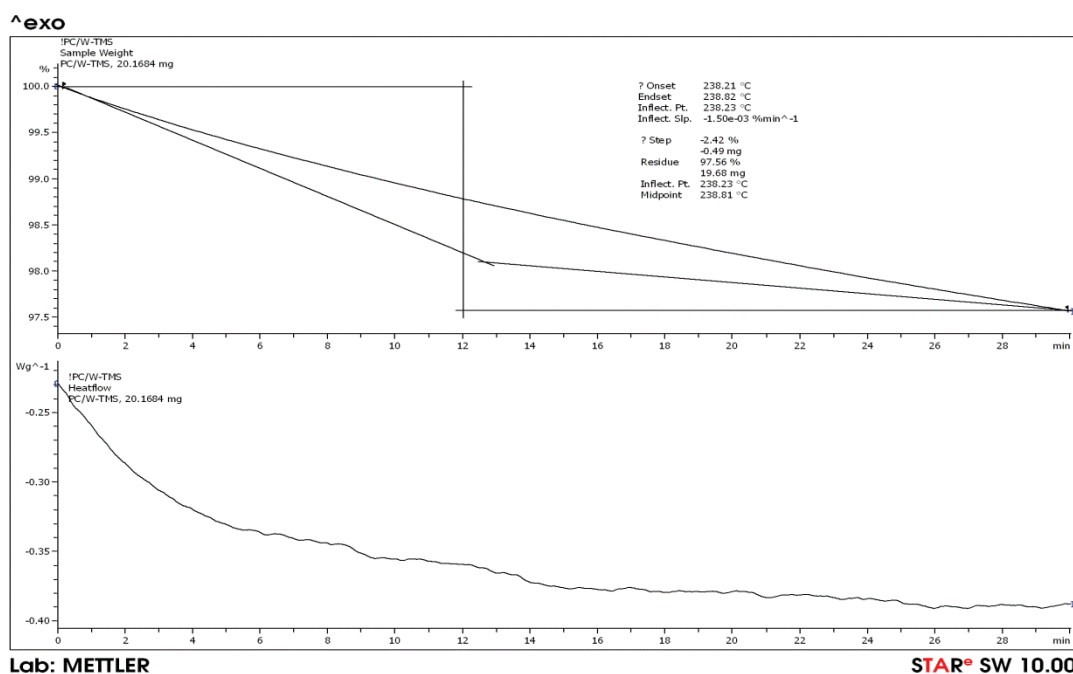
Lab: METTLER

STAR® SW 10.00

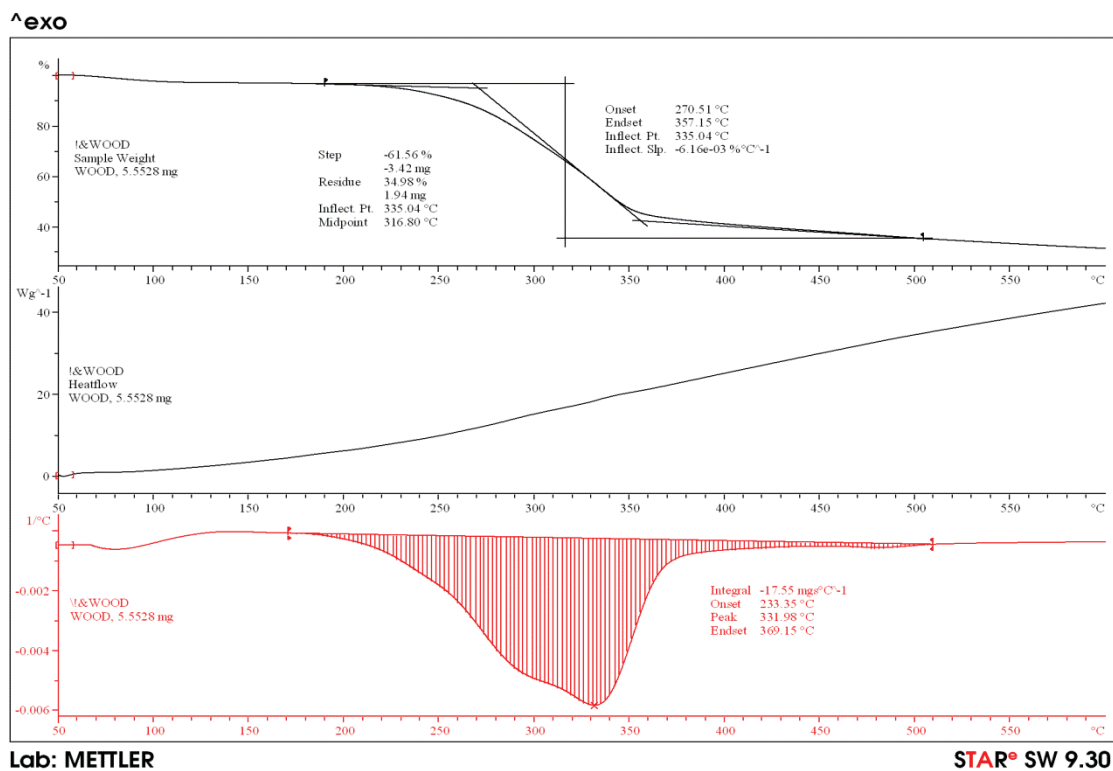
ภาพที่ 84 แสดง TGA thermogram ของผงขี้เลื่อยไม้ ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



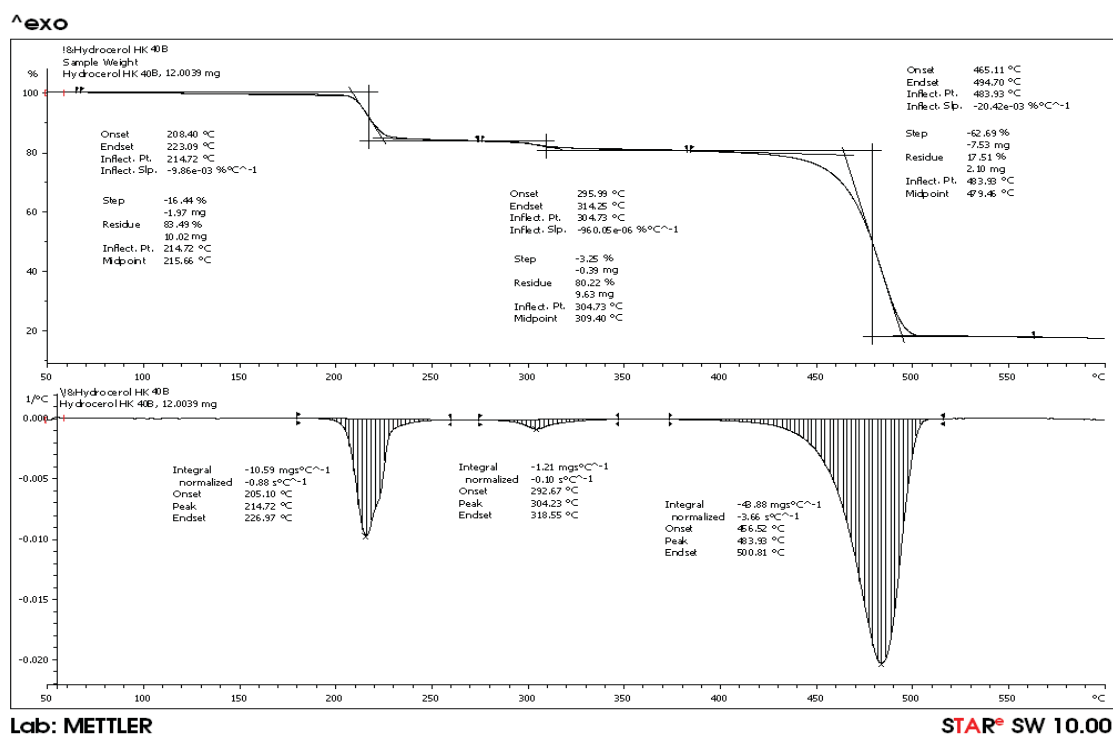
ภาพที่ 85 แสดง TGA thermogram ของคอมพอสิต PC/W-Z6011 ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



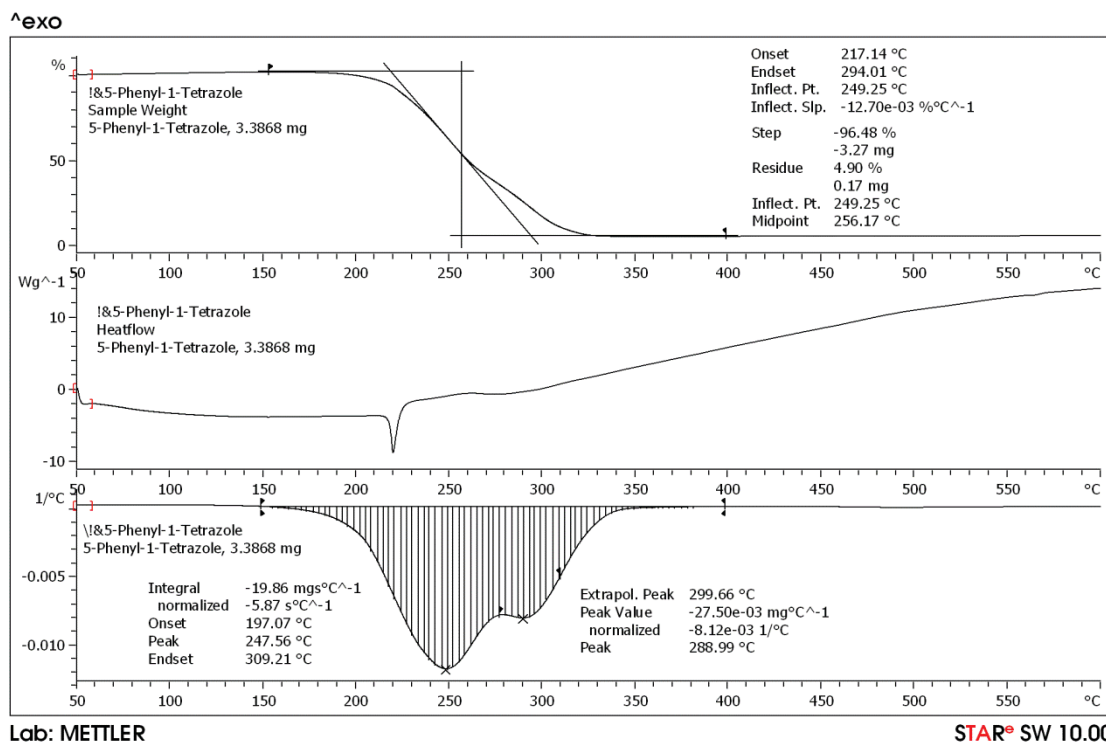
ภาพที่ 86 แสดง TGA thermogram ของคอมพอสิต PC/W-TMS ณ อุณหภูมิ 240°C คงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



ภาพที่ 87 แสดง TGA thermogram ของผงขี้เลื่อยไม้



ภาพที่ 88 แสดง TGA thermogram สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B



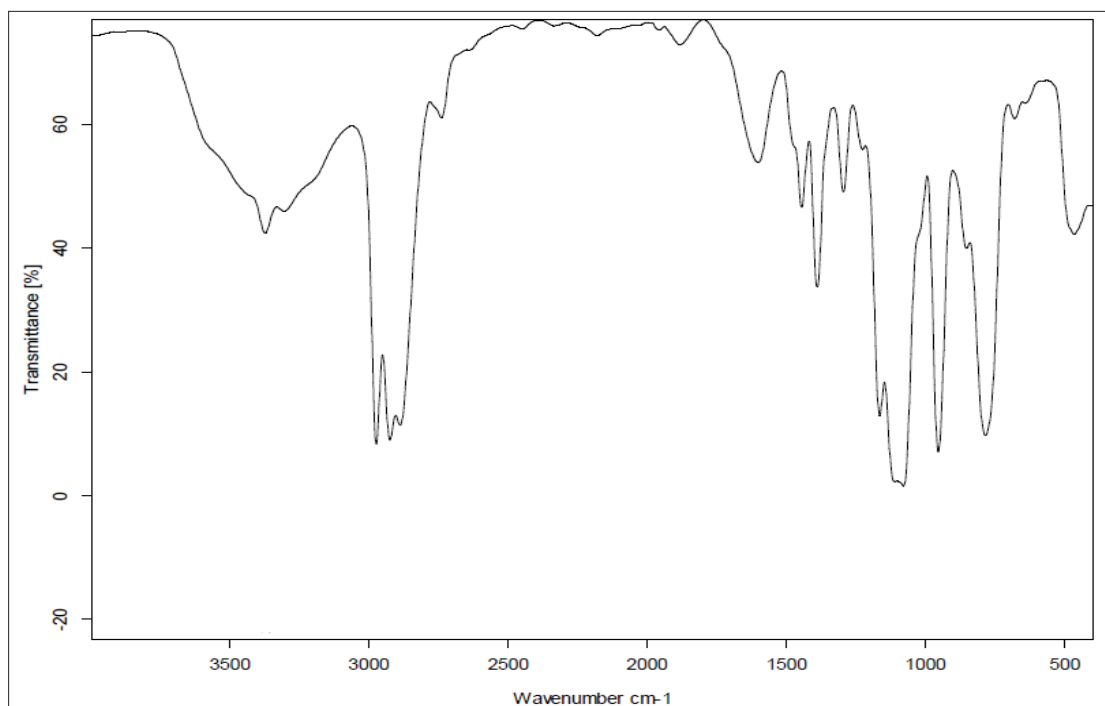
ภาพที่ 89 แสดง TGA thermogram สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1-Tetrazole

ตารางที่ 41 แสดงข้อมูลการทดสอบ TGA ของผงขี้เลื่อยไม้และสารทำให้เกิดฟอง

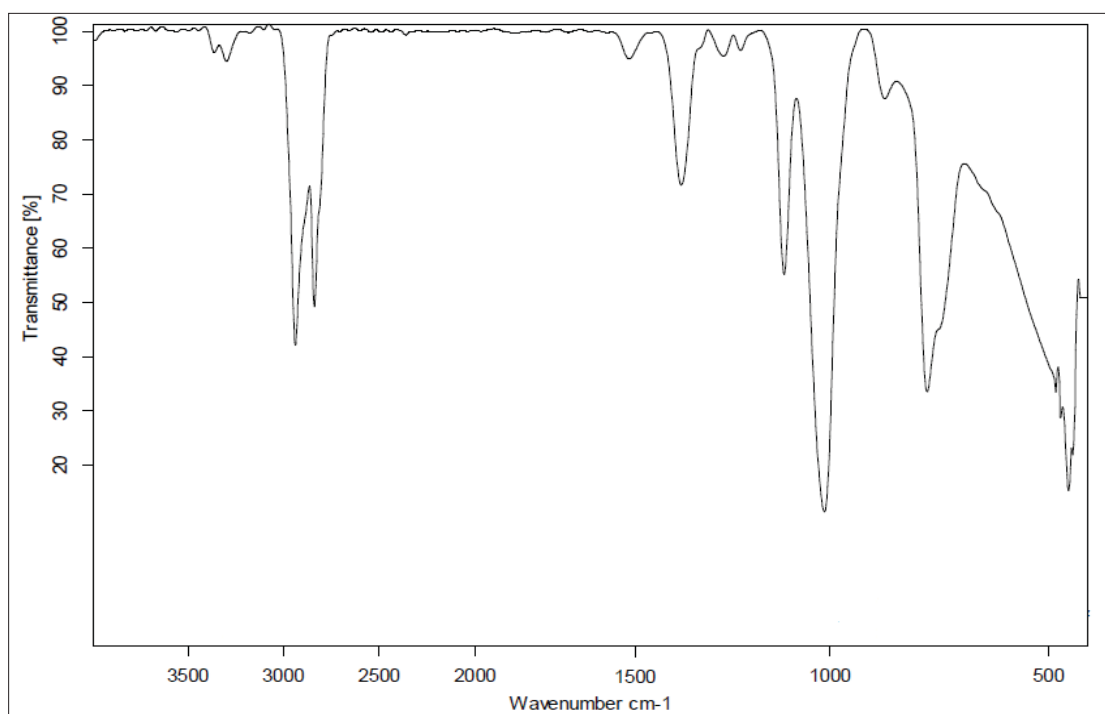
ชนิดสารทำให้เกิดฟอง	Onset (°C)	Endset (°C)	Inflection temperature (°C)
Wood sawdust	233.35	369.15	331.98
Hydrocerol HK 40B (step 1)	208.40	223.09	214.72
Hydrocerol HK 40B (step 2)	465.11	494.70	483.93
5-Phenyl-1H- Tetrazole	217.14	294.01	249.25

ภาคผนวก ค

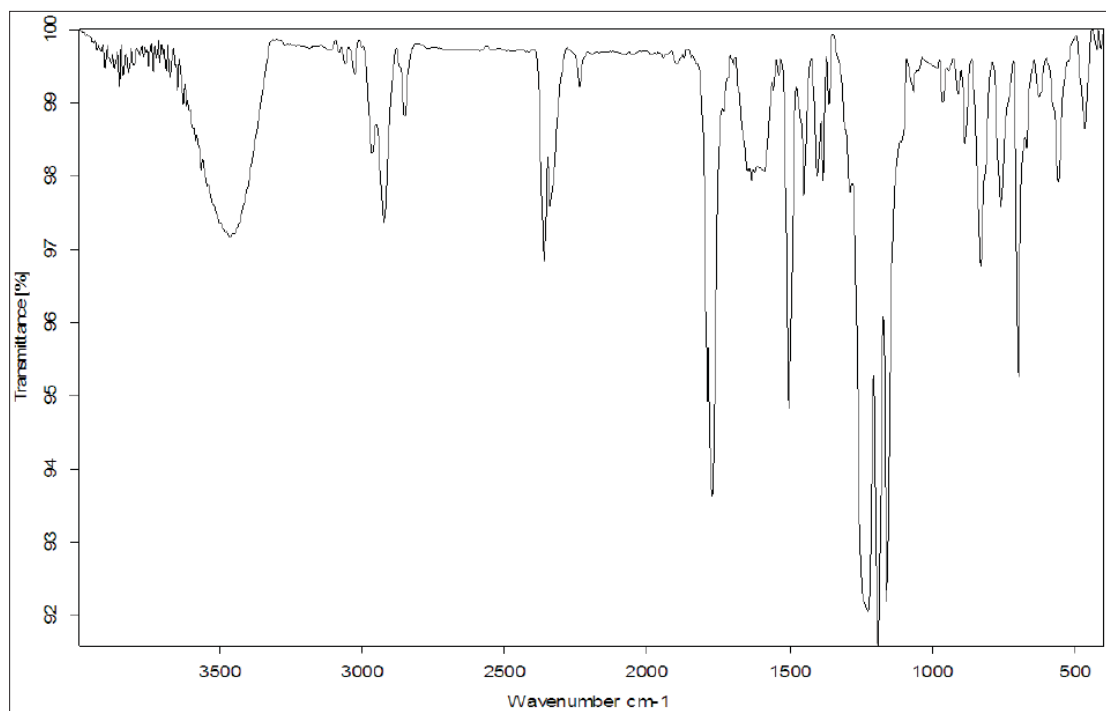
ข้อมูลการทดสอบ FTIR ของพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต



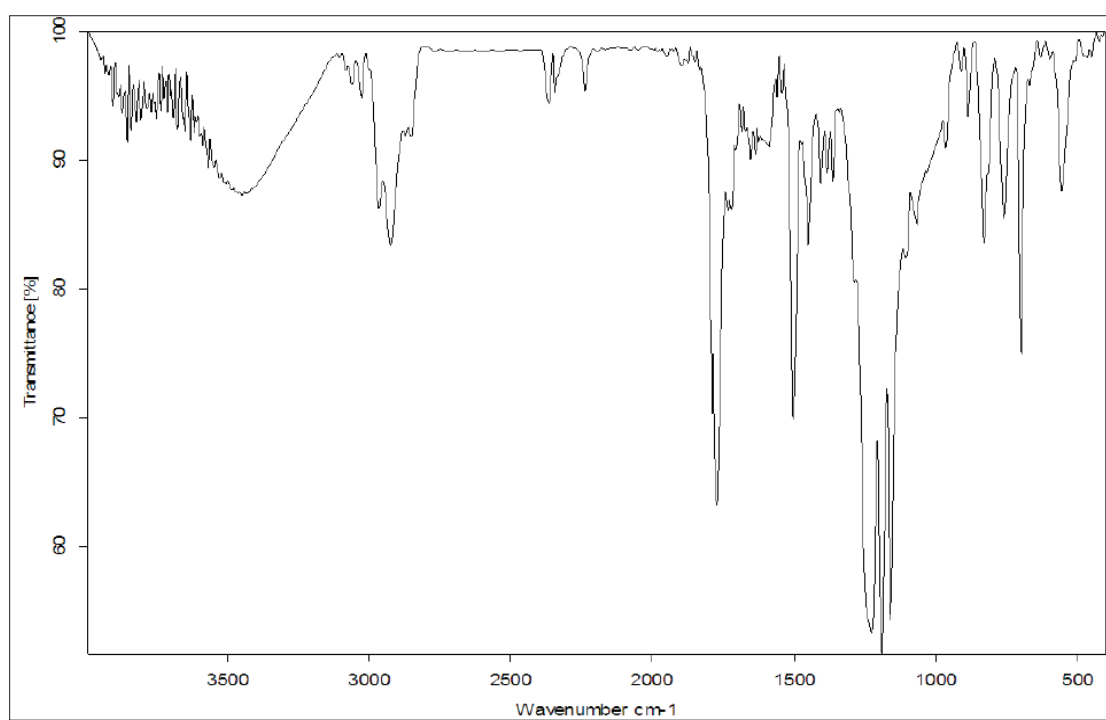
ภาพที่ 90 แสดง FTIR สเปกตรัมของไฮเลนชนิด γ -aminopropyl trimethoxy silane (Z6011)



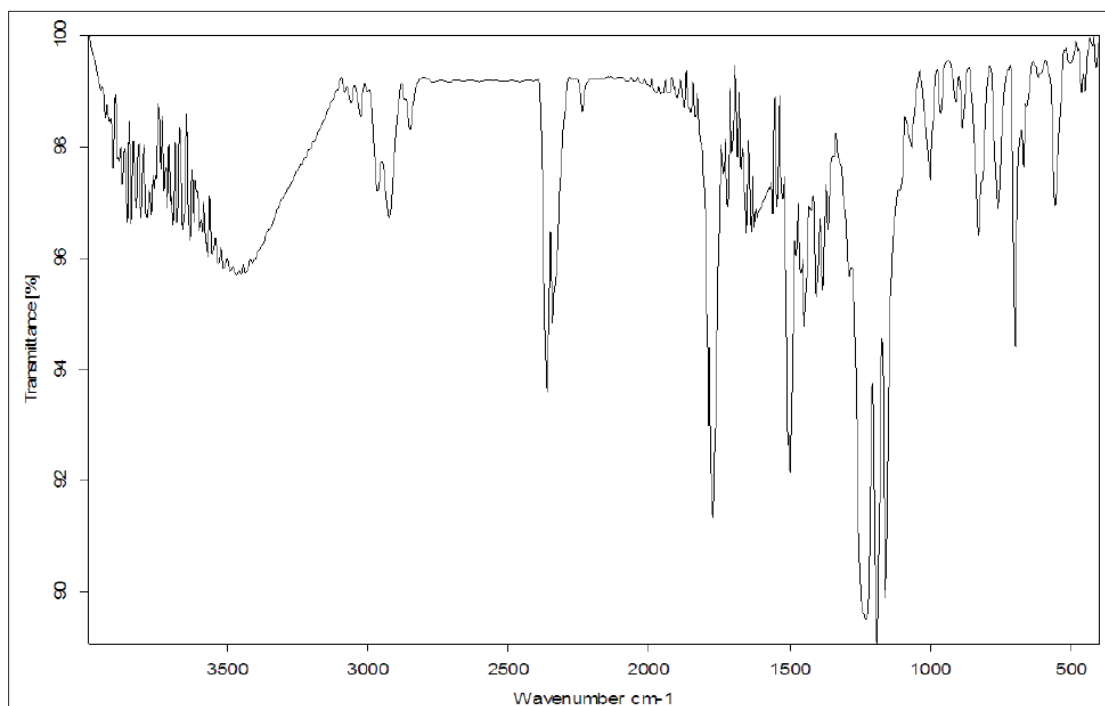
ภาพที่ 91 แสดง FTIR สเปกตรัมของไฮเลนชนิด N-(3-Trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine



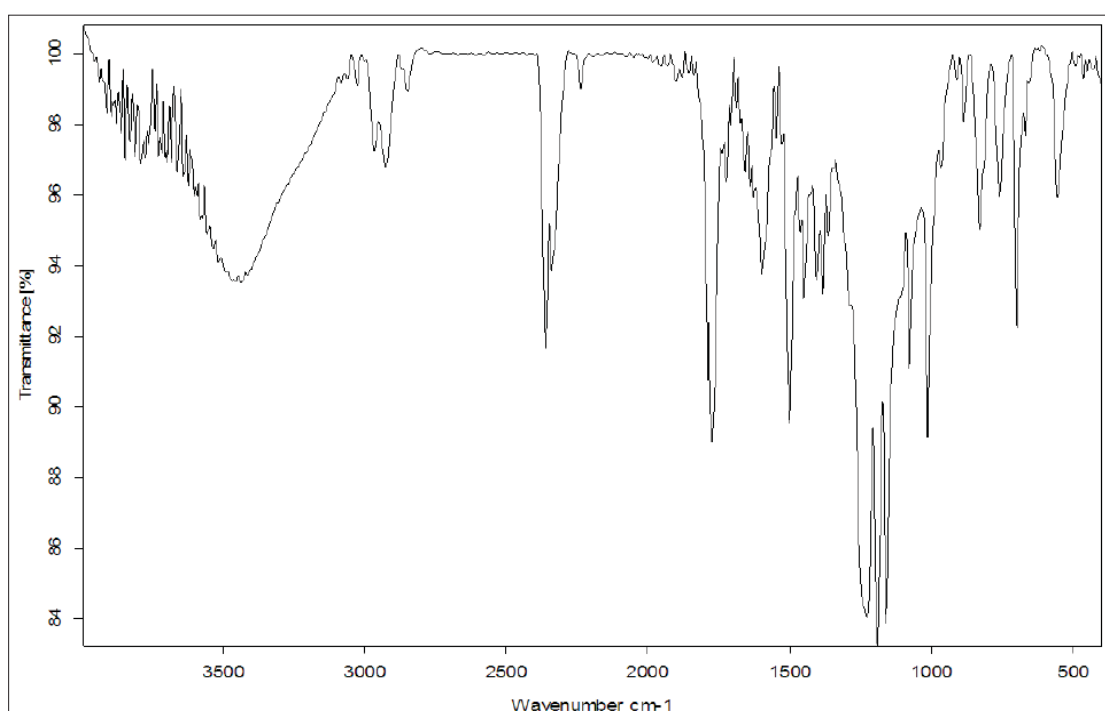
ภาพที่ 92 แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนต



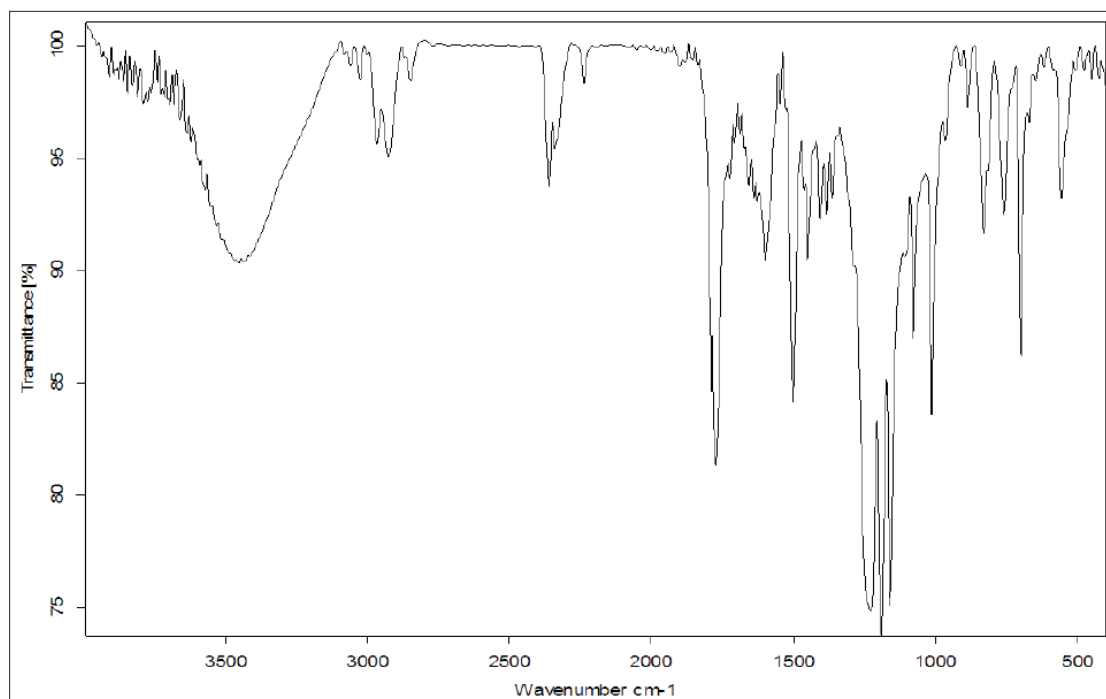
ภาพที่ 93 แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-Untreated



ภาพที่ 94 แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-NaOH



ภาพที่ 95 แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-Z6011

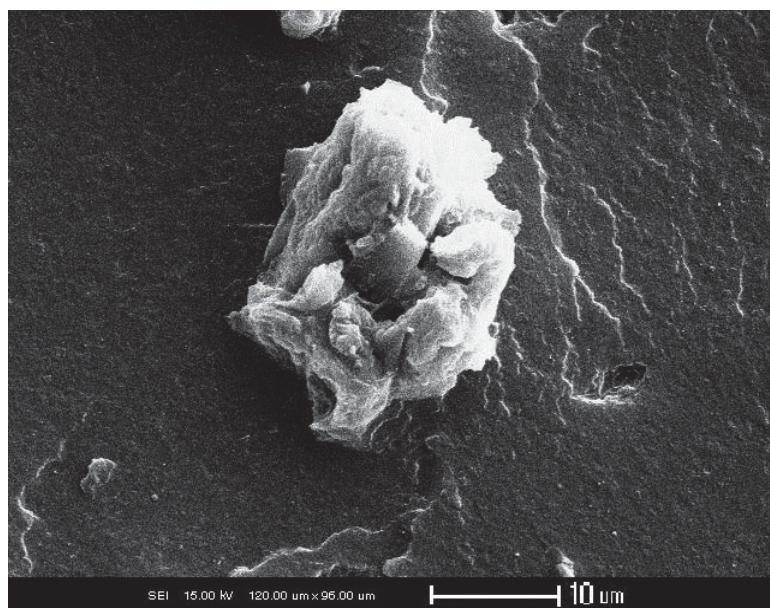


ภาพที่ 96 แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิคาร์บอเนตคอมพอสิต PC/W-TMS

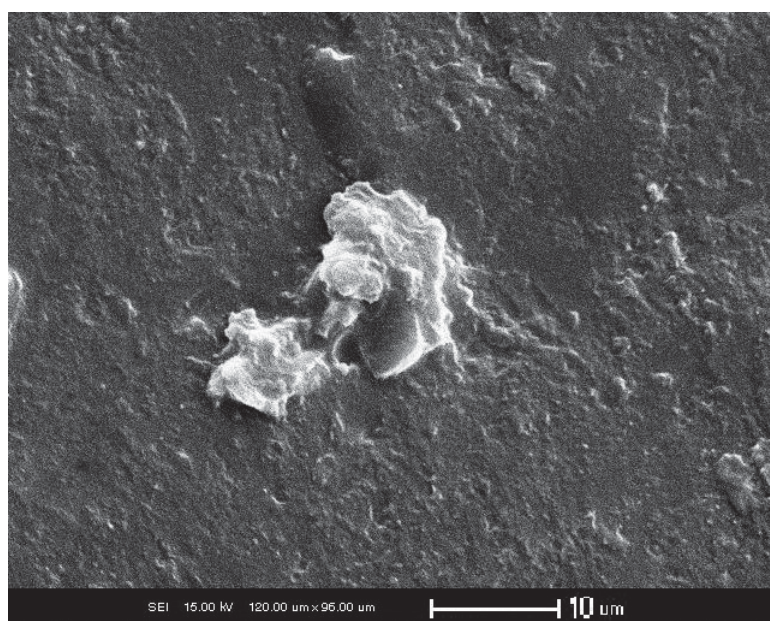
ภาคผนวก ง

ข้อมูลการวิเคราะห์โดยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ของพอลิคาร์บอเนต

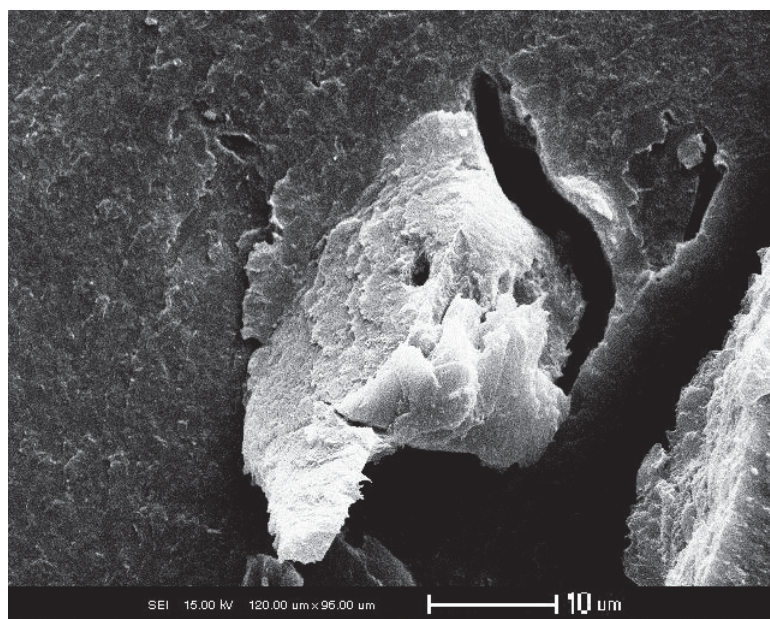
บริสุทธิ์และวัสดุคอมพอสิตของพอลิคาร์บอเนต



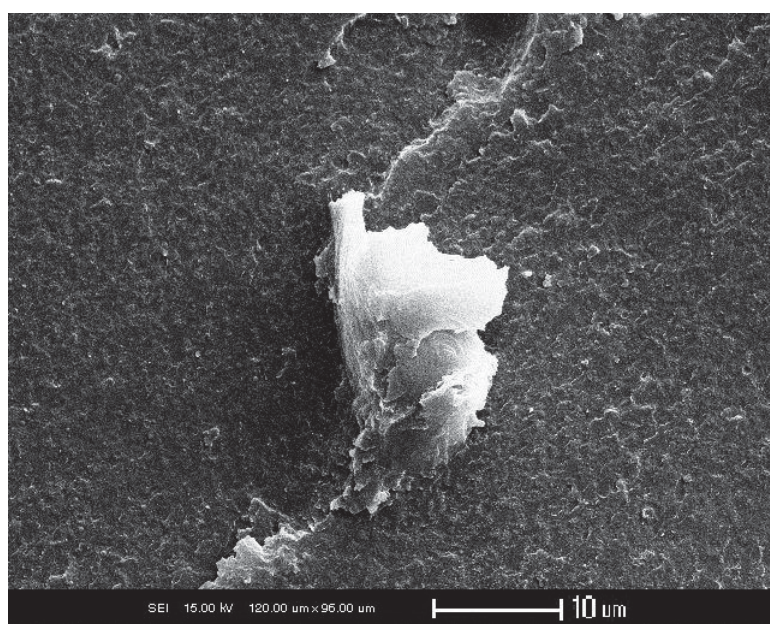
ภาพที่ 97 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Untreated ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



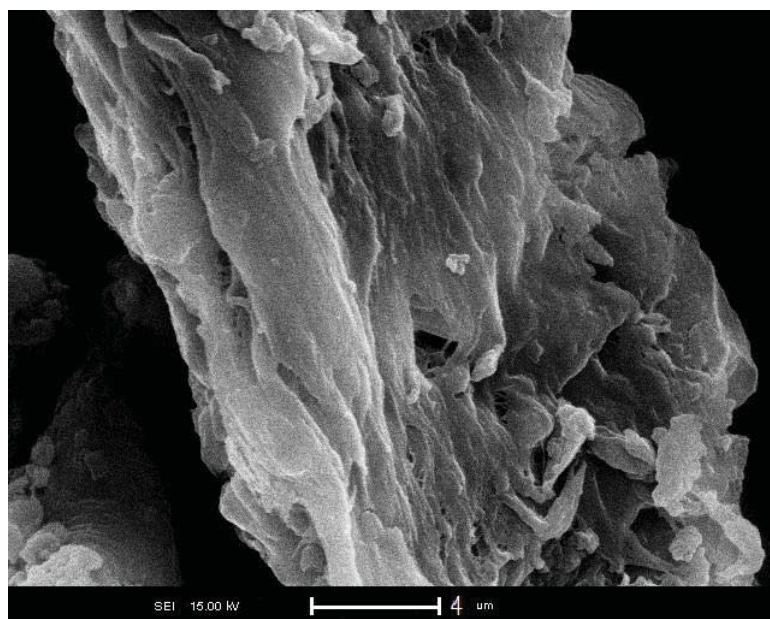
ภาพที่ 98 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-NaOH ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



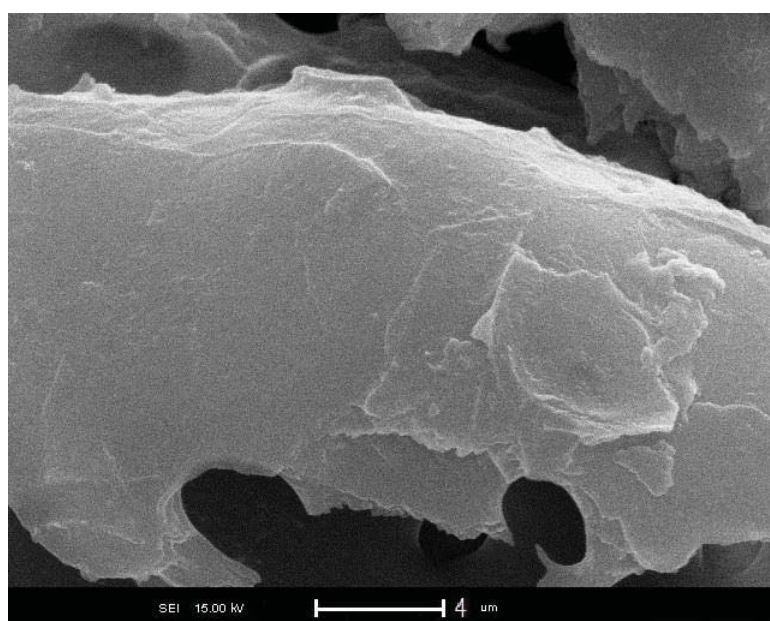
ภาพที่ 99 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-Z6011 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



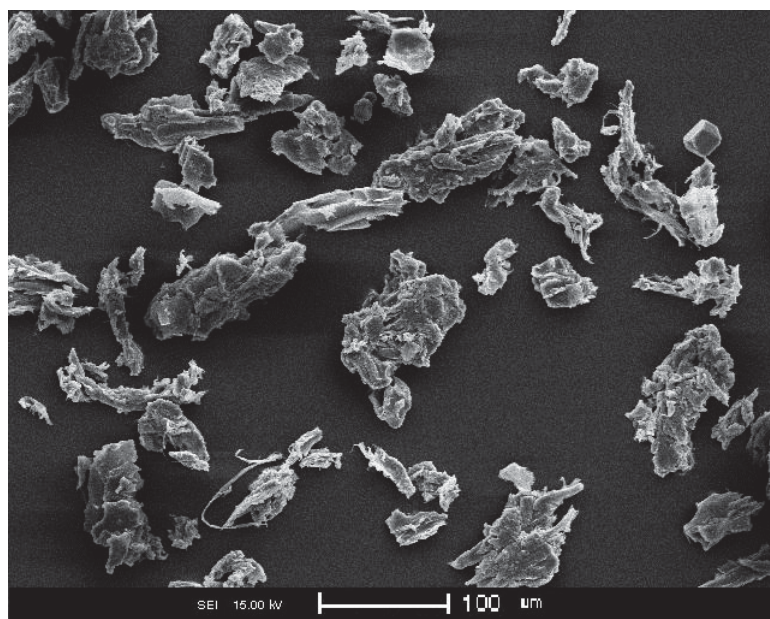
ภาพที่ 100 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิต PC/W-TMS ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



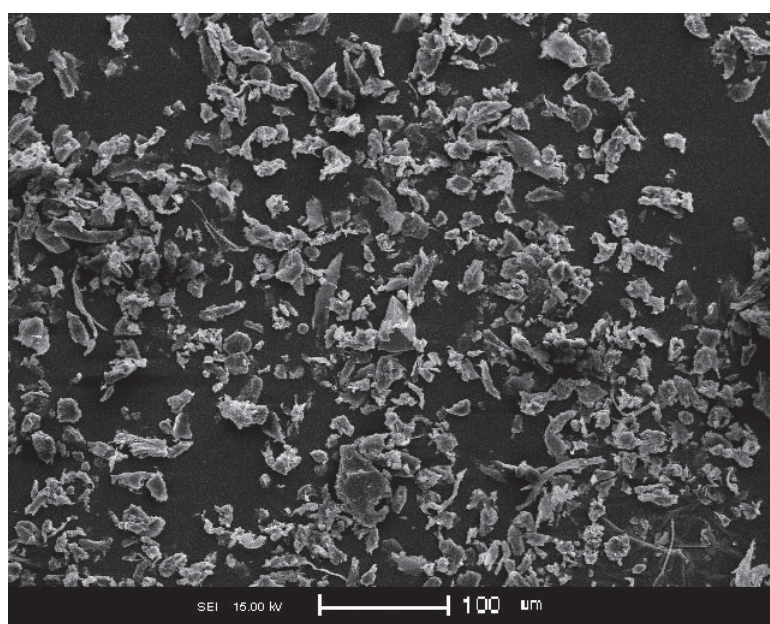
ภาพที่ 101 แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



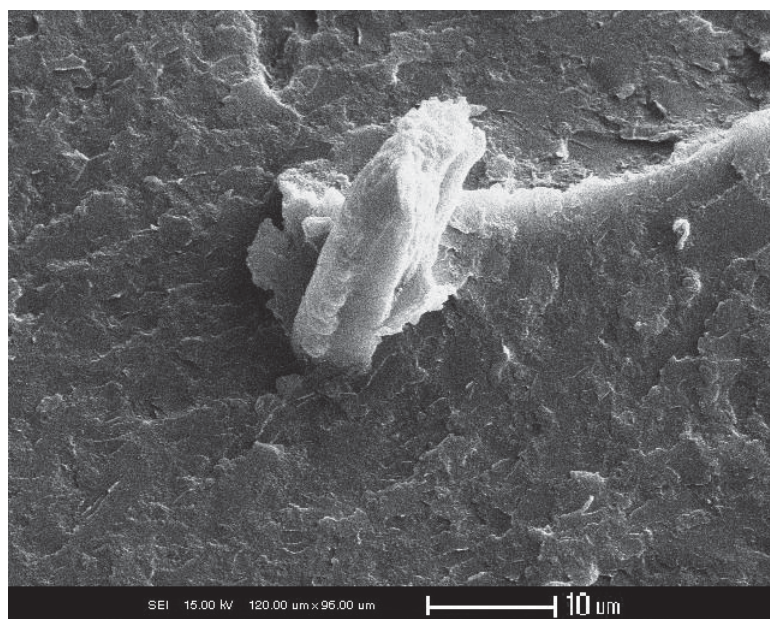
ภาพที่ 102 แสดงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วย NaOH ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



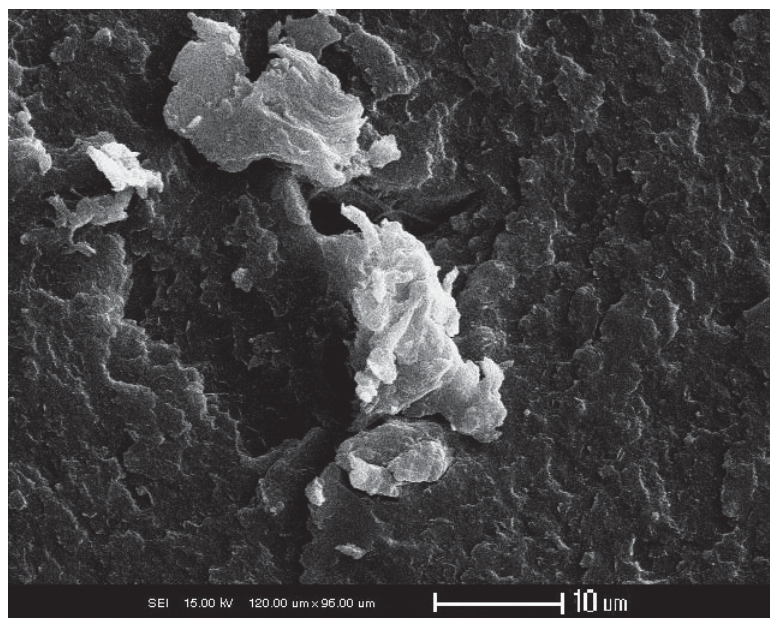
ภาพที่ 103 แสดงพื้นผิวของผงจี๋เลื่อยไม้ซึ่งไม่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว ที่กำลังขยาย 100 เท่า



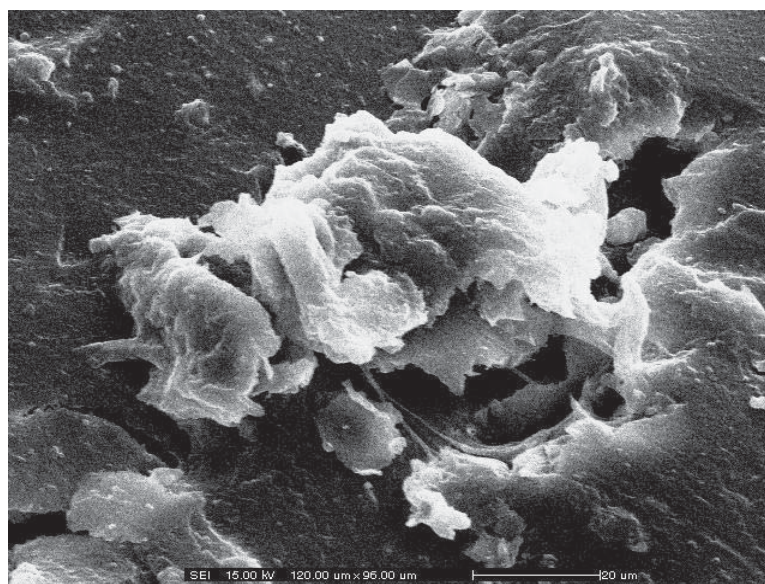
ภาพที่ 104 แสดงพื้นผิวของผงจี๋เลื่อยไม้ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วย NaOH ที่กำลังขยาย 100 เท่า



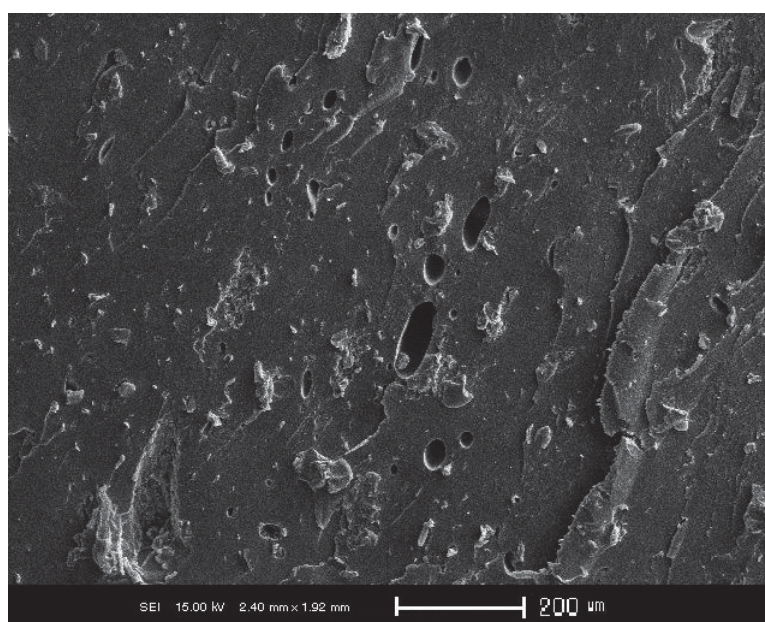
ภาพที่ 105 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ปริมาณการเติมผงไม้ที่แตกต่างกัน 10%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



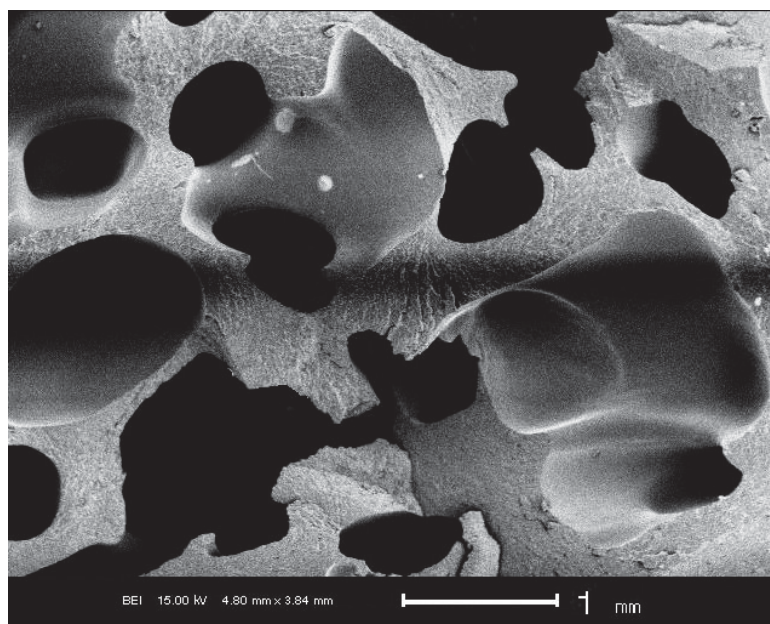
ภาพที่ 106 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ปริมาณการเติมผงไม้ที่แตกต่างกัน 20%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



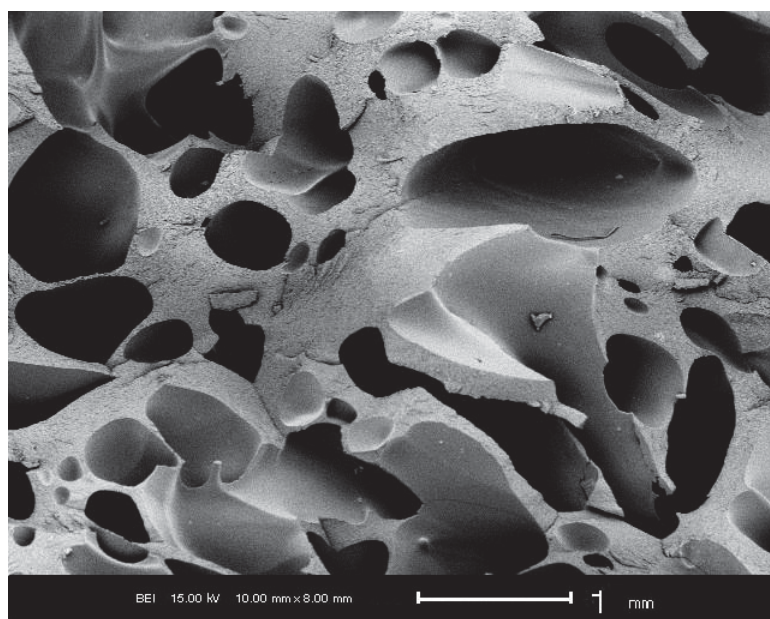
ภาพที่ 107 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W-TMS composites ที่ปริมาณการเติมผงไม้ที่แตกต่างกัน 30%wt ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



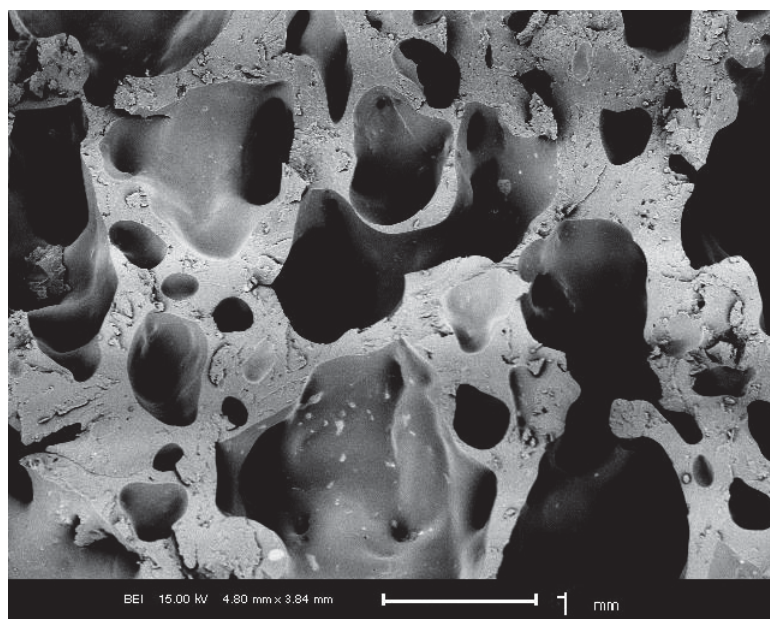
ภาพที่ 108 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W10% - TMS 0.5% ที่กำลังขยาย 50 เท่า



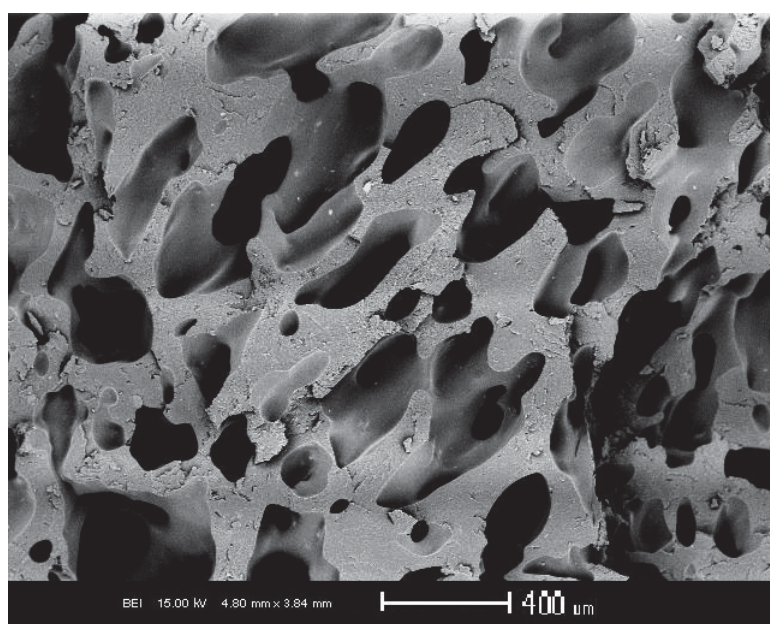
ภาพที่ 109 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/H 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า



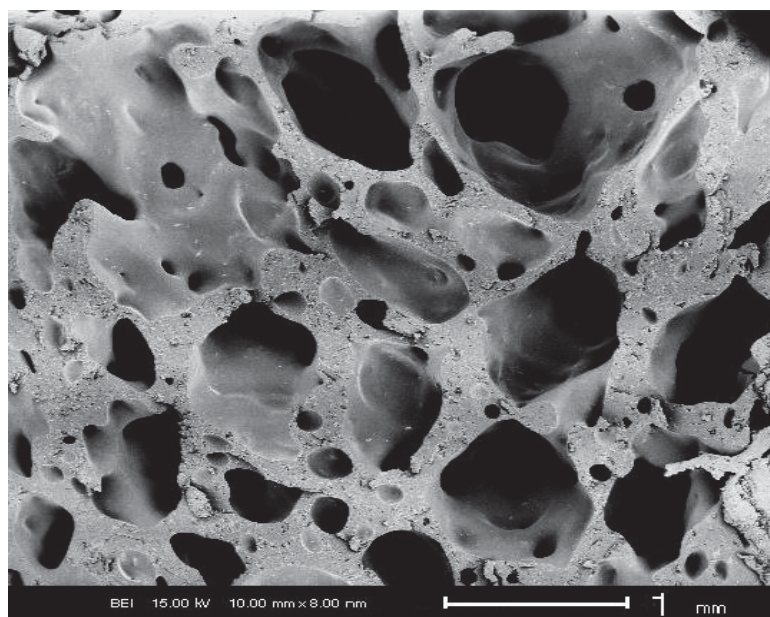
ภาพที่ 110 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/P 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า



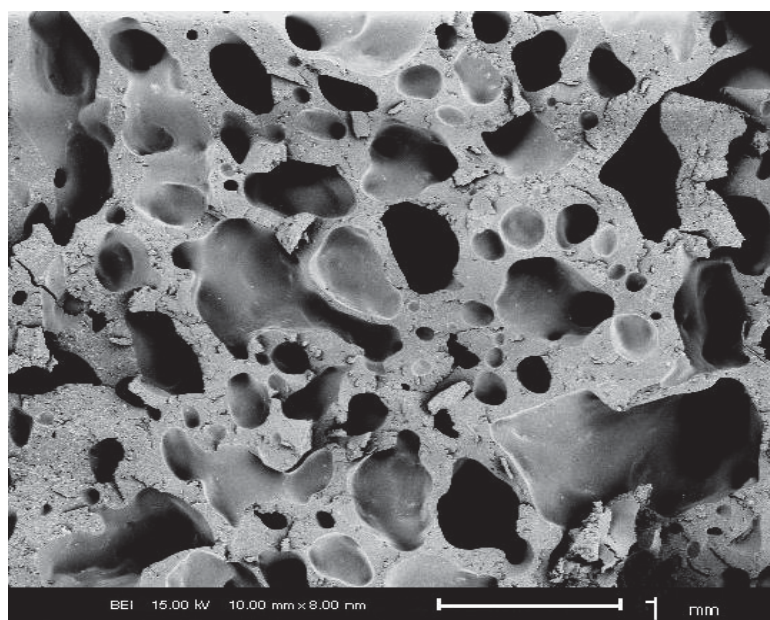
ภาพที่ 111 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W - H 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า



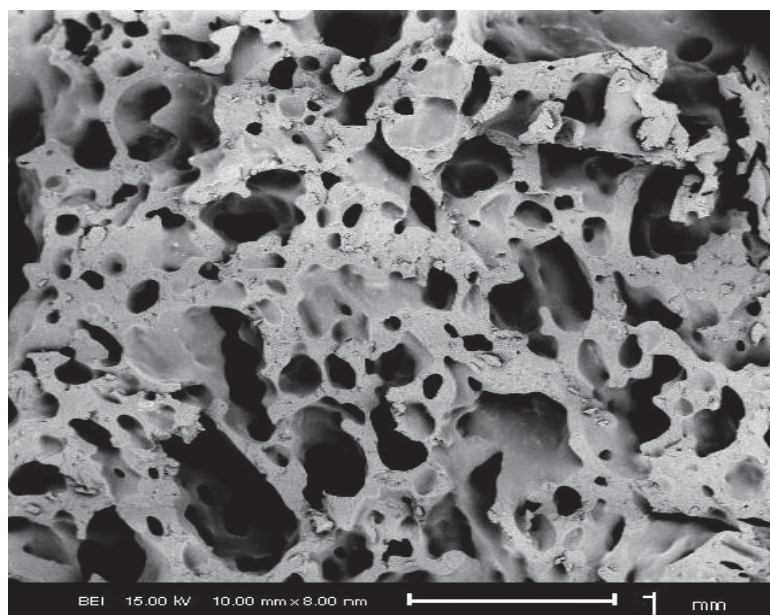
ภาพที่ 112 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุคอมพอสิตของ PC/W - P 0.5 ที่กำลังขยาย 25 เท่า



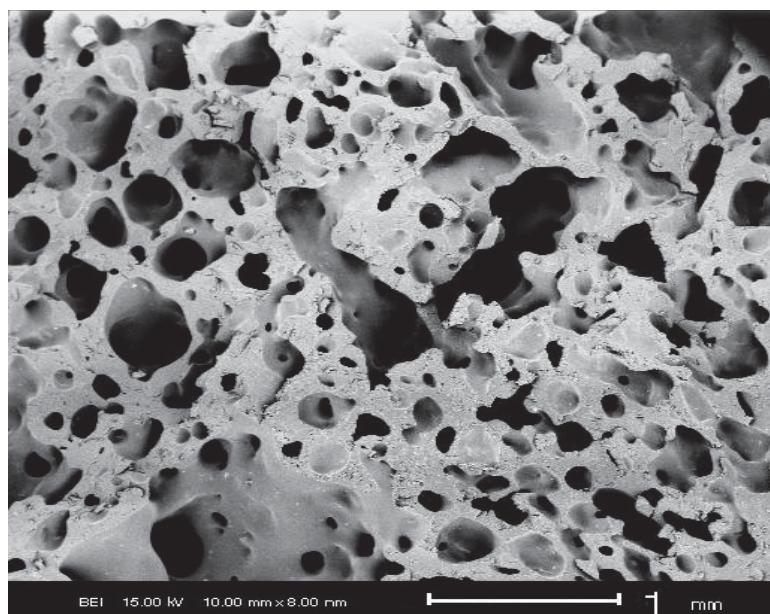
ภาพที่ 113 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 0.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



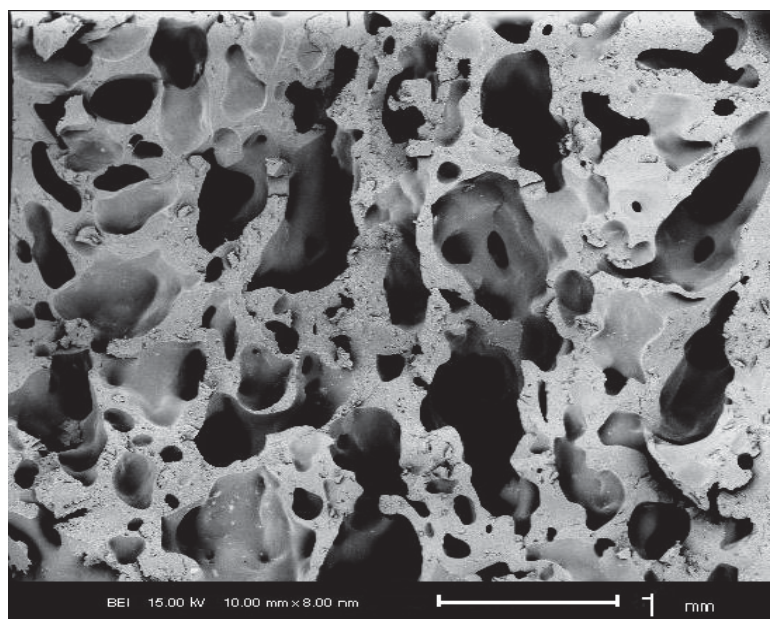
ภาพที่ 114 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 1.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



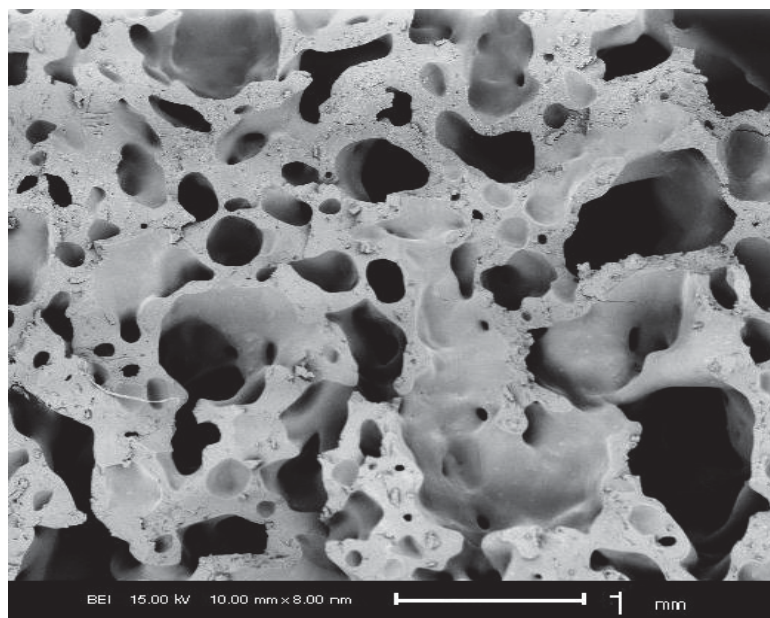
ภาพที่ 115 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 1.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



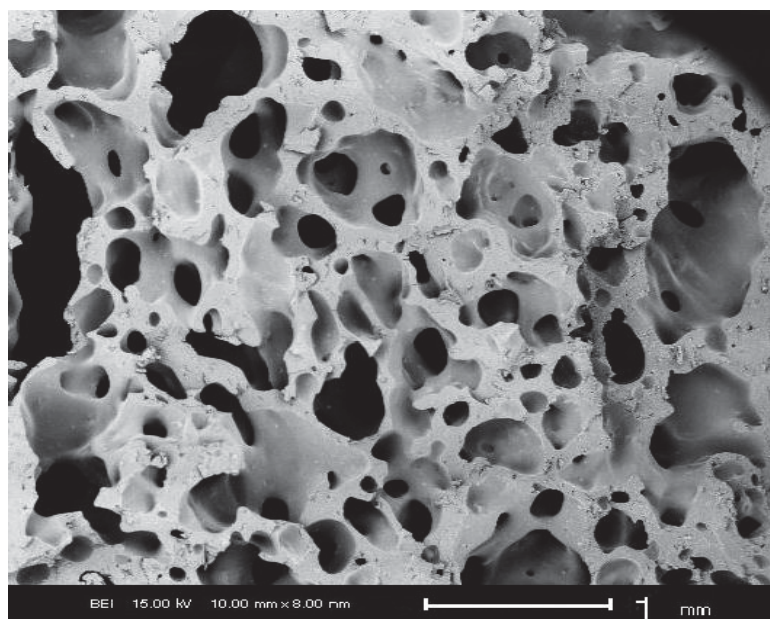
ภาพที่ 116 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในปริมาณ 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



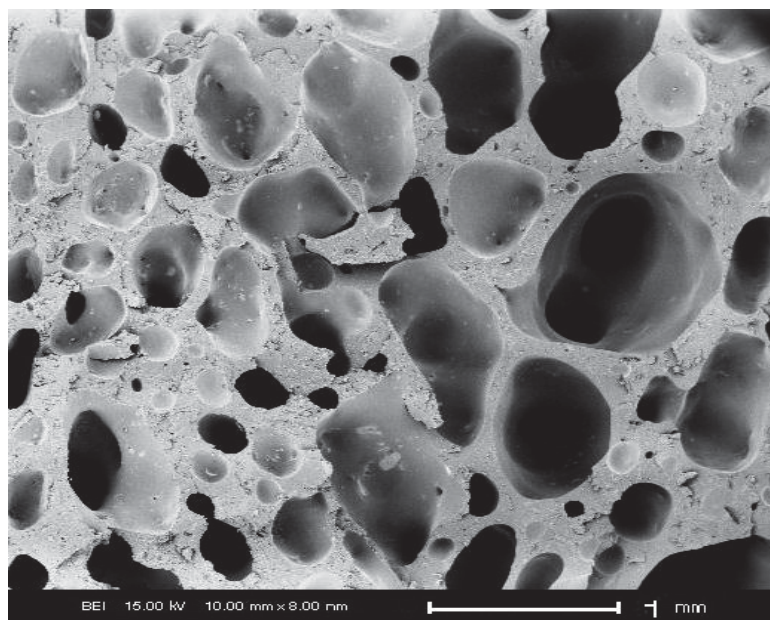
ภาพที่ 117 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 0.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



ภาพที่ 118 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 1.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



ภาพที่ 119 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 1.5 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า



ภาพที่ 120 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักของวัสดุโพลีคอมพอสิตที่มีการใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Hydrocerol HK 40B ในปริมาณ 2.0 phr ที่กำลังขยาย 12 เท่า

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล นายวิทวุธ วิมลทรง
 ที่อยู่ 77/1 ซอยช้างซ้าย 43 หมู่ที่ 7 ตำบลช้างซ้าย อำเภอพระพรหม
 จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000
 โทรศัพท์ (085) 183-0143
 E-mail address wittawut_w@yahoo.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา ตอนปลาย
 โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาภาคใต้
 พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและ
 วัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 พ.ศ. 2552 ศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการ
 และวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลงานทางวิชาการ

1. Wittawut Wimonsong, Poonsub Threepopnatkul and Chanin Kulsetthanchalee, "Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Wood Sawdust/Polycarbonate Composites," Materials Science Forum Vol. 714 (2012). pp 139-146