



วิทยานิพนธ์

ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของ
แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์
ใช้กับแท่นรองสินค้า

EFFECT OF ADDITIVE ON MECHANICAL PROPERTIES AND
PHOTO-STABILITY OF POLYVINYLCHLORIDE/WOOD POWDER
COMPOSITE SHEET FOR PALLET APPLICATION

นายบัณฑิต ศรีนวล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2555

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญ

เทคโนโลยีการบรรจุ

สาขา

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

ภาควิชา

เรื่อง ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า

Effect of Additives on Mechanical Properties and Photo-stability of

Polyvinylchloride/wood Powder Composite Sheet for Pallet Application

نامผู้วิจัย นายบัณฑิต ศรีนวล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชिरาวดี เพชรเย็น, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ดวงเดือน อาจงค์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิณกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของ
แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า

Effect of Additives on Mechanical Properties and Photo-stability of
Polyvinylchloride/wood Powder Composite Sheet for Pallet Application

โดย

นายบัณฑิต ศรีนวล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2555

บัณฑิต ศรีนวล 2555: ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของ
แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ
ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์ชีราวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด. 106 หน้า

ประเด็นทางด้านสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีความต้องการ
ใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทุกด้าน จึงนำไปสู่การใช้สารเติมแต่งจากธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ
ในวัสดุเชิงประกอบ วัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้แสดงถึงความก้าวหน้าของ
เทคโนโลยีที่ต้องการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นการใชพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก
และผงไม้เป็นส่วนเสริมแรง ในงานวิจัยทำการศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง 4 ประเภท (ผงไม้
สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต สารดัดแปรความทนแรงกระแทก และผงสี) ต่อสมบัติเชิงกลและ
เสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่น
รองสินค้าปริมาณสารเติมแต่งอยู่ในช่วง 0.0 ถึง 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความแตกต่าง 5
ระดับปริมาณ การออกแบบแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม central composite (CCD) ได้สูตร
ผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ 30 สูตร จากการสูตรการผสมทั้งหมด 625
สูตร (แฟคเตอร์เรียลเต็มรูปแบบที่ 4 ปัจจัยและ 5 ระดับปริมาณ) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิล
คลอไรด์/ผงไม้เตรียมจากกระบวนการอัดรีด การเสื่อมสลายของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิล
คลอไรด์/ผงไม้ทำการทดลองภายในตู้เร่งภาวะ หลังจากครบเวลาภายใต้ภาวะเร่งทำการทดสอบ
สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และลักษณะปรากฏ ผลการทดสอบพบว่า สูตรที่ 15
ประกอบด้วยผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 0.5 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพดีกว่าสูตรอื่น ภายใต้ภาวะเร่ง ถ้าเพิ่มเวลา
ภายใต้ภาวะเร่ง สีจะมีความคล้ำและความเหลืองเพิ่มมากขึ้น การลดลงของความหนาแน่นและ
ความเงาเกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายทางพื้นผิวของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผง
ไม้จากรังสีอัลตราไวโอเลตภายในตู้เร่งภาวะ สามารถทำการยืนยันการเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นบน
พื้นผิวได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

Bandit Sreenual 2012: Effect of Additives on Mechanical Properties and Photo-stability of Polyvinylchloride/wood Powder Composite Sheet for Pallet Application. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Mr. Chiravoot Pechyen, Ph.D. 106 pages.

The rising concern towards environmental issues and need for more versatile polymer based materials had led to increase interest about polymer composites filled with natural fillers. The PVC/wood powder composites are an environmentally progress way of combining PVC and wood powder. This research studied the effects of 4 types of additives (wood powder, UV absorber, impact modifier and pigment) on mechanical properties and photo-stability of the PVC/wood powder composites sheet for pallet application. The amount of each additive was varied from 0.0-30.0 %w/w at 5 different levels. The central composite design was employed to experimentally design the formulation of the PVC/wood powder composites sheet, in order to practically reduce the total number of experiments from 625 formular (full factorial design for 4 factor and 5 levels) to 30 formular without losing the credibility of the results achieved. The PVC/wood powder composite sheets were prepared by extrusion process. The photodegradation of the PVC/wood powder composites sheet was performed by simulated condition in Q-UV weathering tester. The progress of photodegradation was followed by determining the change in mechanical properties physical properties and appearance as a function of exposure time. The results showed that the formula No.15 containing 30.0 %w/w, 0.5 %w/w, 3.0 %w/w and 0.7 %w/w of wood powder, UV-absorber, impact modifier and pigment, respectively had better properties compared to the others. Under the accelerated condition, it was found that upon increasing the Q-UV exposure time. Color changes increased level of black and yellow. The decrease in density and gloss values were attributed to the surface degradation induced by UV irradiations evidenced by SEM micrographs.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชिरาวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียนการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณบริษัทพีเพิล (ประเทศไทย) จำกัด ในการสนับสนุนการทำวิจัย ทนสนับสนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2554 ระดับปริญญาโท ด้านการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร จากสถาบันวิจัยแห่งชาติ และทุนพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ สุดท้ายขอขอบคุณทุกปัญหาและความเสียใจที่ทำให้ได้เรียนรู้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอด

บัณฑิต ศรึนวล

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	78
สรุป	78
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดสอบแผ่นวัสดุเชิงประกอบ	
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	87
ภาคผนวก ข ภาพการทดสอบแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	103
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก	9
2	ประเภทของสารเติมแต่งสำหรับพอลิเมอร์	15
3	ความยาวคลื่นในการสลายพันธะ	25
4	ความยาวคลื่นในการแตกสลายของพอลิเมอร์แต่ละประเภท	25
5	ปัจจัยและระดับปริมาณที่สนใจ	37
6	จำนวนการทดลองที่ออกแบบโดยโปรแกรม CCD สำหรับ 4 ปัจจัย	39
7	ร้อยละของสารเติมแต่งที่ใช้ในการศึกษาโดย CCD สำหรับ 4 ปัจจัย	43
8	ค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	45
9	สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	47
10	สมการถดถอยทำนายสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	61
11	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	69
12	สมบัติการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงภายใต้ภาวะเร่งสูตรที่ 2	73
13	สมบัติการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงภายใต้ภาวะเร่งสูตรที่ 15	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	88
ก2	ค่าความต้านทานต่อการกระแทกแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	90
ก3	ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	92
ก4	ค่ามอดูลัสการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	94
ก5	ค่าน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	96
ก6	ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	98
ก7	ความหนาแน่นเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	100
ก8	ค่า L^* เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	100
ก9	ค่า a^* เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	100
ก10	ค่า b^* เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	101
ก11	ค่าความเงาเฉลี่ยเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	101
ก12	ค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	101
ก13	ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	102
ก14	ค่ามอดูลัสการดัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

ก15	ค่าน้ำหนักสูงสุดในการตัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง	102
-----	---	-----

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนผังการผลิตพลาสติกจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ	6
2	ชนิดต่างๆ ของพอลิเมอร์	8
3	อนุภาคของภูมิภาคที่กระจายในองค์ประกอบหลักในรูปทรงและการวางตัวที่แตกต่างกัน (ก) ปริมาณ (ข) ขนาด (ค) รูปร่าง (ง) การกระจาย (จ) ทิศทางการวางตัวซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ	10
4	วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ (ก) ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (ข) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (ค) ไม่ต่อเนื่องและวางตัวแบบอิสระ	11
5	พอลิเมอร์ไฮบริดแบบเติมของพอลิไวนิลคลอไรด์	13
6	โครงสร้างฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2-ไฮโดรเจน-เบนโซไตรอะซีน-2-อิล)-4-(1,1,3,3 เททระเมทิลปีวทิล)	20
7	แผนผังกระบวนการทดลอง	40
8	ปัจจัยสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	52
9	อันตรกิริยาของปัจจัยต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	53
10	อันตรกิริยาของปัจจัยต่อความเค้นดัดโค้งสูงสุดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	54
11	อันตรกิริยาของปัจจัยต่อความเครียดดัดโค้งสูงสุดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	55
12	อันตรกิริยาของปัจจัยต่อมอดูลัสการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	55
13	อันตรกิริยาของปัจจัยต่อน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	56
14	อันตรกิริยาของปัจจัยต่อความแข็งแรงการกระแทกของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ภายใต้ภาวะเร่ง	65
16	จำลองกลไกการเคลื่อนย้ายของสารเติมแต่งจากเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์ สู่บริเวณพื้นผิว (ก) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มี เสถียรภาพ (ข) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่อยู่ภายใต้ ภาวะเร่ง (ค) ช่องว่างบนแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น (ง) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ เกิดการเปลี่ยนสี	66
17	ค่า L^* ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ ภาวะเร่ง	67
18	ค่า a^* ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ ภาวะเร่ง	67
19	ค่า b^* ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะ เร่ง	68
20	กลไกการสลายตัวของไม้ที่เกิดจากแสง	69
21	ค่าความเงาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ ภาวะเร่ง	71
22	ภาพถ่ายดิจิทัลพื้นผิวของสูตรที่ 2 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี	76
23	ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดของสูตรที่ 2 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี	76
24	ภาพถ่ายดิจิทัลพื้นผิวของสูตรที่ 15 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี	77
25	ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดของสูตรที่ 15 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข1	การหาค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ ผงไม้ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง	104
ข2	การทดสอบความทนแรงการดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ instron รุ่น 5965	104
ข3	การทำรอยบากก่อนการทดสอบความทนแรงกระแทก	105
ข4	การทดสอบความทนแรงกระแทก	105

ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่น วัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า

Effect of Additives on Mechanical Properties and Photo-stability of Polyvinylchloride/wood Powder Composite Sheet for Pallet Application

คำนำ

ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจะมีการผลิตผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีลำดับขั้นต้น (upstream petrochemical industry) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต่อไป ได้แก่ เอทิลีน (ethylene) พรอพิลีน (propylene) สามารถนำเอทิลีนมาผลิตเป็นเม็ดพลาสติกได้ เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene : LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene : LLDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene : HDPE) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride : PVC) (Matar, 2000)

พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือ พีวีซี จัดเป็นพลาสติกประเภทหนึ่งที่สามารถผ่านความร้อนได้หลายครั้ง โดยนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายครั้งโดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิม หรือที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และมีองค์ประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และคลอรีนเท่านั้น

ขั้นตอนแรกในกระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลคลอไรด์ เริ่มจากการนำน้ำเกลือมาผ่านกระบวนการแยกโครงสร้างของเกลือด้วยกระแสไฟฟ้าจะได้คลอรีน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ส่วนน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ จะนำมากลั่นแยกจนกระทั่งได้ก๊าซเอทิลีน จากนั้นนำเอทิลีนมาผสมกับคลอรีนด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อให้ได้สารโมเลกุลเดี่ยวของไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride, VCM) อยู่ในสภาพของก๊าซ และเมื่อนำหลายๆ โมเลกุลมาต่อเชื่อมกันด้วยกระบวนการทางเคมีอีกจะทำให้ได้สารโมเลกุลรวมของไวนิลคลอไรด์ เรียกว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือ พีวีซี อยู่ในสภาพผงละเอียดสีขาว (ภัทรารุณ, 2552)

การผลิตและการตลาดของพอลิไวนิลคลอไรด์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2493 (ค.ศ.1950) ที่ประเทศไทยมีการนำเข้าท่อพีวีซี มาใช้ในระบบชลประทาน นับตั้งแต่เวลานั้นเป็นต้นมาอุตสาหกรรมพอลิไวนิลคลอไรด์ก็ได้เติบโตและมั่นคงถึงปัจจุบัน โดยมีการผลิตพีวีซีมากกว่า 30 ล้านตันต่อปีทั่วโลก และในประเทศไทยมีการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์มากกว่า 7 แสนตันต่อปี ประเทศไทยจึงเป็น 1 ใน 5 ของผู้ส่งออกพอลิไวนิลคลอไรด์มากที่สุด

ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่วัสดุก่อสร้าง ชิ้นส่วนอุปกรณ์รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์การแพทย์ สินค้าอุปโภค รวมไปถึงบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ตัวอย่างเช่น ท่อน้ำ รางระบายน้ำ กรอบประตู หน้าต่าง วอลล์เปเปอร์ สายไฟ เบาะรถยนต์ ผ้ายางปูพื้น ของเล่นเด็ก เสื้อผ้า รองเท้า อุปกรณ์กีฬา บัตรเครดิต เพอร์นิเจอร์ชุดรับแขก ม่านในห้องน้ำ ถุงมือผ่าตัด ถุงบรรจุเลือด ท่อสายยาง ตลอดจนบรรจุภัณฑ์อาหารจำพวกขวดน้ำ กล่องใส่อาหารและแผ่นฟิล์มห่อหุ้มอาหาร

ปัจจุบันการใช้งานพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์นั้นได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานในภาวะที่อยู่กลางแจ้ง และตากแดดเป็นเวลานานๆ เหตุนี้เองจึงทำให้ความแข็งแรง ลักษณะพื้นผิว และอายุการใช้งานของพลาสติกดังกล่าวต่ำลง ซึ่งโดยทั่วไปในปฏิกิริยาที่พอลิเมอร์ได้รับแสงอัลตราไวโอเลตส่งผลทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเกิดสี (discoloration) และความเงาผิวน้อยลงเป็นต้น หรือสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก ลดลงจากเดิม (Ito and Nagai, 2007) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติของพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยทำผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาวิจัยถึงชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่งต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อเสริมความทนทานต่อการแตกสลายจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะจากแสงอัลตราไวโอเลต ตลอดจนสามารถทำนายอายุการใช้งานและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป

สารเติมแต่ง (additives) ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติพลาสติกต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ให้มีสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ นอกจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และยังช่วยปรับปรุงให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีความคงทนต่อแสง ความร้อนและสภาพภูมิอากาศได้มากขึ้นด้วย โดยการเติมสารเติมแต่งลงไปในช่วงกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก หรือระหว่างการผสมก่อนทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการเติมสารเติมแต่งกับ

เม็ดพลาสติกพีวีซีให้เข้ากัน เรียกว่า การผลิตพีวีซีชนิดสารประกอบ (compounding) สารเติมแต่งที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางแสงให้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ ประกอบด้วย (Grossman, 2008)

สารตัวเติม (filler) เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และบางครั้งอาจใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต สารตัวเติมจะมีสถานะเป็นของแข็ง มีทั้งสารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate), เขม่าดำ (carbon black), ทัลค์ (talc) และ เคาลิน (kaolin) สารตัวเติมอินทรีย์ (organic filler) เช่น แป้ง (starch), และผงไม้ (wood powder) เป็นต้น สารตัวเติมที่เป็นผงไม้ ได้จากนำขี้เลื่อย เศษไม้หรือไม้แผ่นบางๆ มาบดให้เป็นผง ซึ่งโดยทั่วไป ผงไม้ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์จะมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 40, 60, 80 หรือ 140 เมช การใช้ผงไม้เป็นสารตัวเติมจะช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ลดต้นทุนการผลิต และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงดังเพิ่มขึ้น แต่จะต้องคำนึงถึงจุดอ่อนของการใช้ผงไม้เป็นสารตัวเติม ได้แก่ แรงยึดที่ต่ำระหว่างพอลิเมอร์กับผงไม้ การขึ้นรูปทำได้ยาก และไม่สามารถใช้ได้ทีอุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีเสถียรภาพทางความร้อนและความทนทานต่อสภาพอากาศลดลง รวมทั้งมีความทนต่อแรงกระแทกลดลง (อรอุษา, 2546)

สารป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV protectors) (Zweifel, 2001; สมศักดิ์, 2548; มาลินี, 2550) เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ผสมพอลิเมอร์ เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์อันเนื่องมาจากแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) โดยแสงยูวี ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 290-400 นาโนเมตร จะมีพลังงาน 71-95 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งเพียงพอในการสลายพันธะ C-C, C-Cl และ C-H ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีหมู่ที่สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้ดี เรียกว่า หมู่โครโมฟอร์ (chromophores) เช่น หมู่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หมู่คาร์บอนิล หรือหมู่ที่มีพันธะคู่ เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์

สารดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifiers) เป็นสารเติมแต่งที่เติมเพื่อให้พอลิเมอร์มีความเปราะที่ลดลงและมีความทนทานแรงกระแทกหรือความเหนียวเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป สารดัดแปรความทนแรงกระแทกทำจากยาง หรือพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง สารดัดแปรความทนแรงกระแทกจะกระจายอยู่ในพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระแทกได้สูงเพิ่มมากยิ่งขึ้น

ผงสี (pigment) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนั้นการเติมผงสีในพอลิเมอร์ นอกจากช่วยเสริมแรงแล้วยังช่วยเพิ่มผลให้พอลิเมอร์สมบัติการต้านทานไฟฟ้า นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ดังที่ได้กล่าวในเบื้องต้นแล้วว่าผงสีต่างๆจัดอยู่ในกลุ่มของตัวกรองแสงซึ่งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดหนึ่ง ดังนั้น จึงสามารถช่วยป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์จากแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ด้วย

ผู้วิจัยทำการปรับปรุงแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ พร้อมทั้งศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสภาพของชิ้นทดสอบทดสอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบภายใต้ภาวะเร่ง

วัตถุประสงค์

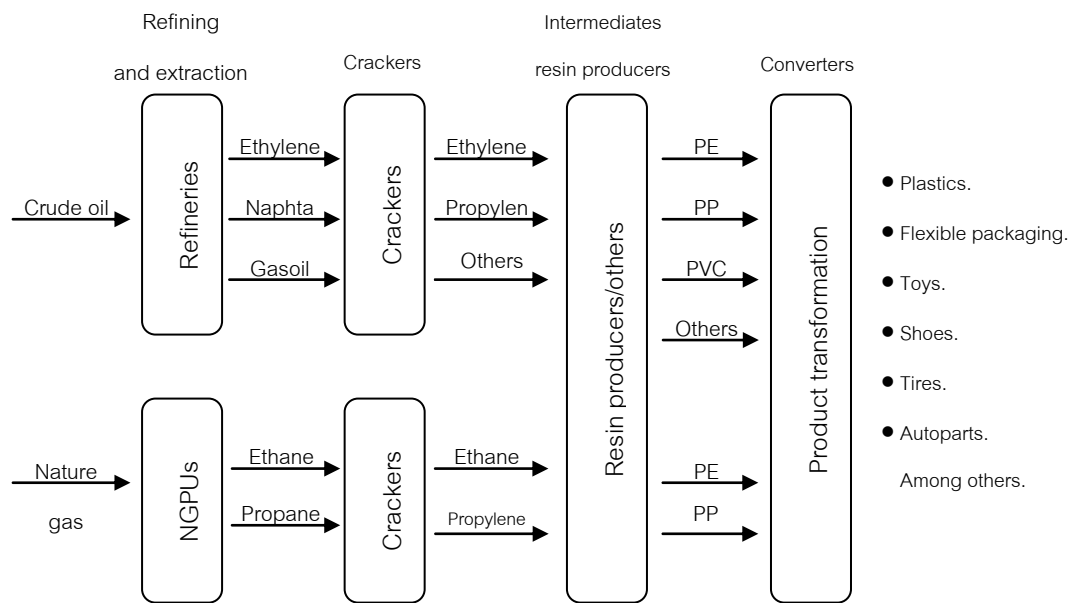
1. ศึกษาชนิดและปริมาณของผงไม้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต สารดัดแปรความทนแรงกระแทกและผงสี ซึ่งออกแบบแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม Central Composite Designs (CCD) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

2. ศึกษาสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า

การตรวจเอกสาร

อุตสาหกรรมปิโตรเคมี

อุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Matar, 2000) จะนำวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมผ่านกระบวนการผลิตจนเป็นเม็ดพลาสติก โยสังเคราะห์ สารเคลือบผิว และกาวต่างๆ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถือเป็นวัตถุดิบพื้นฐานสำคัญในการผลิตสิ่งอุปโภคบริโภคพื้นฐานของมนุษย์ ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีนี้จะนำไปใช้เป็นอุตสาหกรรมขั้นต้นในอุตสาหกรรมพลาสติก เพื่อผลิตสินค้าสำเร็จรูปและสำเร็จรูป เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น



ภาพที่ 1 แผนผังการผลิตพลาสติกจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ

จากแผนผังเมื่อทำการขุดปิโตรเลียมขึ้นมาได้ ทั้งน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติจะถูกส่งเข้าโรงกลั่นน้ำมันดิบและโรงแยกก๊าซ กระบวนการนี้สามารถสกัดไฮโดรคาร์บอนออกมาได้เป็นส่วนต่างๆ รวมไปถึงน้ำมันที่ใช้กับรถยนต์ด้วย ก๊าซอีเทนและก๊าซพรอพเพนเป็นสองวัตถุดิบเริ่มต้นหลักในการผลิตพลาสติก จากนั้นจะถูกส่งต่อไปเข้าเครื่องแครกเกอร์ (cracker) ที่ใช้ความร้อนสูงเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของก๊าซเอทิลีนและก๊าซพรอพิลีน ก๊าซทั้งสองนี้จะถูกส่งต่อไปยังถังปฏิกิริยาทาง

เคมีเพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ในรูปแป้งต้น เช่น แป้งผง (powder) หรือเม็ด (pellet) พอลิเมอร์ที่ได้จากขั้นตอนนี้สามารถนำไปใส่ตัวเติมต่างๆ เช่น สี สารป้องกันรังสียูวี และนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการโดยกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสม

พอลิเมอร์

คำว่า พอลิเมอร์ (polymer) มาจากภาษากรีก มีความหมายว่า สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำๆ กันที่เรียกว่า “เมอร์” (mer) หรือ “รีพีคิติงยูนิต” (repeating) จำนวนมากมายเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่เรียกว่า “พอลิเมอไรเซชัน” (polymerization) โดยเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารโมเลกุลเล็กที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” (monomer) พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่สามารถเกิดผลึกได้สมบูรณ์เนื่องจากโมเลกุลที่ใหญ่ ยากที่จะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบที่สมบูรณ์ (เสาวรจน, 2546)

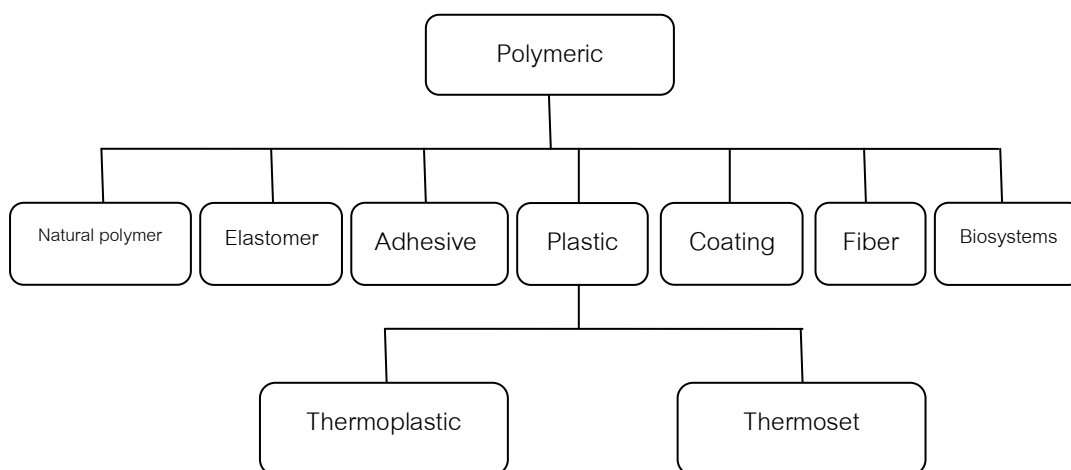
1. ประเภทของพอลิเมอร์

การแบ่งประเภทพอลิเมอร์ตามพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อนจะแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกึ่งสั้นๆ ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวได้ของเหลวหนืด ดังนั้นในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จึงต้องอาศัยความร้อน และเมื่อเย็นตัวจะสามารถรักษารูปร่างให้เป็นไปตามต้องการได้ พลาสติกประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งการหลอมเหลวและการแข็งตัวนี้สามารถทำกลับไปกลับมาได้ พลาสติกประเภทนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานคือ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจทำให้เกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรงได้ เช่น ข้อนพลาสติกที่ทำจากไวนิลพอลิเมอร์ จะเหมาะสำหรับถังไอศกรีม แต่ไม่เหมาะที่จะใช้คนกาแฟร้อน

2. เทอร์โมเซตพลาสติก (thermoset plastics) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างร่างแห ซึ่งไม่อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน แต่ถ้าให้ความร้อนสูงมากๆ จะทำให้พันธะที่ยึดอะตอมภายในโมเลกุลขาดออก พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การทำผลิตภัณฑ์เทอร์โมเซตพลาสติก ในขั้นตอนแรกจะต้องทำให้เกิดพอลิเมอร์เชชันเพียงบางส่วนก่อน โมเลกุลที่ได้จะยังคงมีขนาดเล็ก และมีการเชื่อมโยงโมเลกุลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยใช้ความร้อนและความดันจะสามารถหลอมเหลวและสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ และให้คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์ภายในแม่พิมพ์จนได้โครงสร้างร่างแหที่มีความแข็งแรง นอกจากนี้ ยังนำผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์โดยไม่ต้องรอให้เย็น เพราะผลิตภัณฑ์จะเกิดการแข็งตัวตั้งแต่อยู่ในแม่พิมพ์ ตัวอย่างของเทอร์โมเซตพลาสติก ได้แก่ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์, เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ และอีพอกซี เป็นต้น มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ประเภทนี้อย่างน้อย 1 ชนิดต้องมีหมู่ฟังก์ชันนัลลิตีมากกว่า 2 หมู่ เพื่อให้โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงร่างแห พลาสติกประเภทนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง เพราะจะไม่เกิดการอ่อนตัวหรือบิดเบี้ยวเมื่อได้รับความร้อน เช่น ใช้ทำที่จับหม้อหรือกระทะ ทำจานใส่อาหารร้อนๆ หรือถ้วยใส่กาแฟร้อน เป็นต้น (เสาวรจน์, 2546)



ภาพที่ 2 ชนิดต่างๆ ของพอลิเมอร์

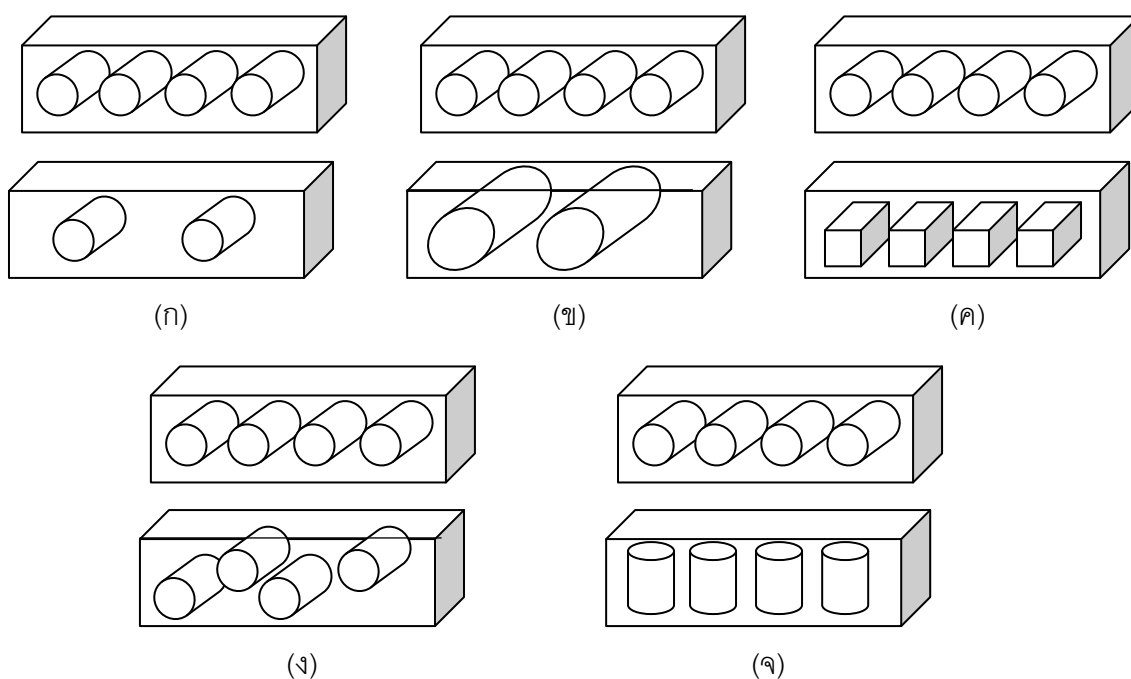
ตารางที่ 1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซตพลาสติก
1. มอนอเมอร์ไม่จำเป็นต้องมีหมู่ฟังก์ชัน มีพันธะคู่ในโมเลกุล	1. มอนอเมอร์อย่างน้อย 1 ชนิดมีฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่
2. เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้นๆ	2. เป็นพอลิเมอร์แบบร่างแห
3. อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน	3. แข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน และสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ
4. ต้องทำให้เย็นก่อนออกจากแม่พิมพ์	4. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนออกจากแม่พิมพ์
5. นำกลับมาทำการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้	5. ไม่สามารถทำการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้

ที่มา: เสาวรณ (2546)

วัสดุเชิงประกอบ (composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปรวมกันเพื่อให้สมบัติของของผสมหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้ดีกว่าสมบัติเดิมของวัสดุตั้งต้น เช่น การเติมซิลิกาหรือคาร์บอนแบล็กเพื่อเสริมความแข็งแรงให้ยางรถยนต์ วัสดุที่ทำการผสมมี 2 วัฏภาค คือ องค์ประกอบหลักหรือวัฏภาคต่อเนื่อง (matrix phase) และวัฏภาคที่กระจายตัว วัสดุเสริมแรงหรือวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (dispersed phase) สมบัติของวัสดุเชิงประกอบขึ้นอยู่กับสมบัติ ปริมาณของวัสดุแต่ละวัฏภาค รูปทรง ขนาดอนุภาค การกระจายตัว (distribution) และการจัดเรียงตัว (orientation) ของวัฏภาคที่กระจาย

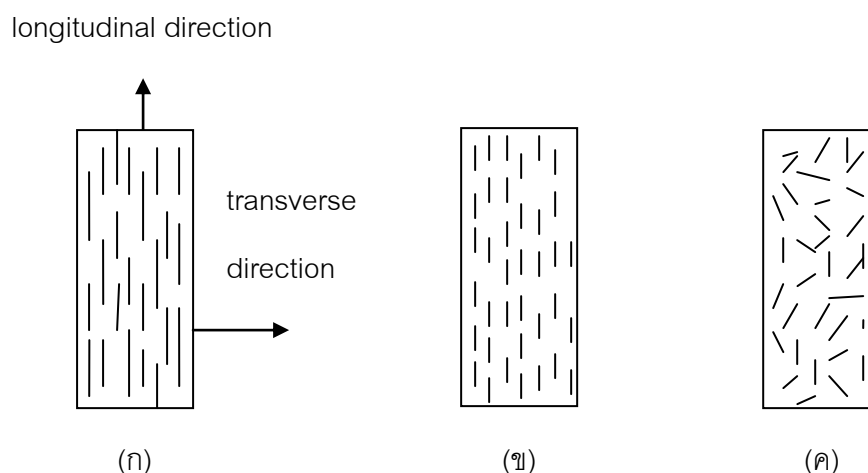


ภาพที่ 3 อนุภาคของวัสดุที่กระจายในองค์ประกอบหลักในรูปทรงและการวางตัวที่แตกต่างกัน
(ก) ปริมาณ (ข) ขนาด (ค) รูปร่าง (ง) การกระจาย (จ) ทิศทางการวางตัวซึ่ง
ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

แบ่งวัสดุเชิงประกอบออกเป็น 3 กลุ่ม (สุวันชัย และคณะ, 2548) คือ

1. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle reinforced composites) วัสดุเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบประเภทนี้ อนุภาคเสริมแรงจะมีขนาดที่เท่ากันทุกทิศทาง แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้ 2 กลุ่ม วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคใหญ่หรือเม็ดผง และวัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคเล็กละเอียด โดยปกติมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.01-0.1 ไมครอน หรือ 10-100 นาโนเมตร

2. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber reinforced composites) วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย ปริมาณและการจัดเรียงตัวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ แนวการเรียงตัวที่น่าสนใจ คือ (1) การเรียงตัวขนานแกนตามยาวของเส้นใยในทิศทางเดียวกัน (parallel alignment) (2) การเรียงตัวแบบอิสระ (random alignment) โดยปกติเส้นใยต่อเนื่องจะมีแนวการเรียงตัวตามรูปที่ 7ก ในขณะที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องอาจจะมีการจัดเรียงตัวแนวเดียวกันดังรูปที่ 7ข หรือเรียงตัวแบบอิสระดังรูป 7ค หรือมีการเรียงตัวแนวเดียวกันบางส่วน



ภาพที่ 4 วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ (ก) ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (ข) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (ค) ไม่ต่อเนื่องและวางตัวแบบอิสระ

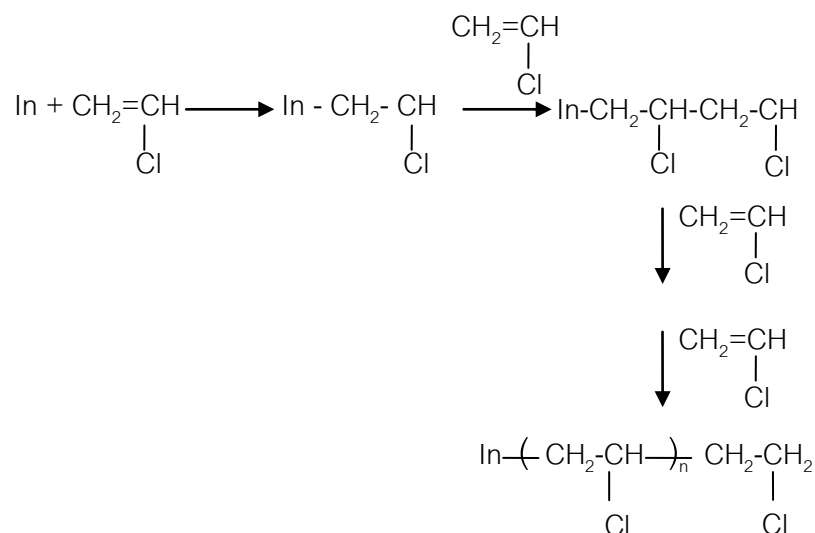
3. วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (structural composites) ประกอบขึ้นจากวัสดุประเภทเดียวกันหรือต่างประเภทกัน สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นไม่เพียงขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลักยังขึ้นอยู่กับการวางแนวของโครงสร้าง วัสดุเชิงประกอบลามิเนต (laminar composites) และแผ่นประกบแบบแซนด์วิช (sandwich composites) จัดเป็นวัสดุโครงสร้างที่พบมากที่สุด

วิวัฒนาการขององค์ประกอบหลักสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่ (1) วัสดุเชิงประกอบองค์ประกอบพอลิเมอร์ (polymer matrix composites : PMCs) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้งานมากที่สุด เพราะมีสมบัติที่อุณหภูมิห้องดี ง่ายต่อการผลิตและราคาถูก (2) วัสดุเชิงประกอบองค์ประกอบหลักโลหะ (metal matrix composites : MMCs) วัสดุเชิงประกอบประเภทนี้ถูกนำไปใช้งานในอุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ และมีความต้านทานต่อการแตกสลายจากสารอินทรีย์ แต่มีราคาที่แพงจึงมีการใช้งานในวงแคบ (3) วัสดุเชิงประกอบองค์ประกอบหลักเซรามิก (ceramic matrix composites : CMCs) เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการแตกสลายที่อุณหภูมิสูง แต่จะมีความเปราะที่สูงทำให้แตกหักง่าย งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยเลือกองค์ประกอบหลักเป็นพอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์

ในปี ค.ศ.1912 เป็นปีที่มีการค้นพบพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยเป็นปีที่นาย Fritz Klatte ทำการรายงานกระบวนการการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ แต่ตามความจริงในปี ค.ศ.1795 นักเคมีชาว ดัตช์ 4 คน ชื่อ Dieman, Trotswyck, Bondt และ Laurverenburg ทำการเตรียมสารที่ต่อมาได้ชื่อว่า “The oil of the Dutch chemistry” ในขณะนั้นประเด็นในการเตรียมสารนี้เกิดจากคลอรีน รวมตัวกับอีเทนหรือเกิดจากสารประกอบที่มีความซับซ้อนมากกว่านี้ เป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจ ปี ค.ศ.1835 Henri Regnault สามารถทำการเตรียมสารที่เชื่อได้ว่าเป็นไวนิลคลอไรด์ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ ต่อมาปี ค.ศ.1872 ทำการค้นพบพอลิเมอร์ชนิดใหม่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวในหลอดทดลองที่ทำการส่องแสงแดดโดยตรงพร้อมกับก๊าซไวนิลคลอไรด์ที่ระเหยออกมา จากประวัติของพอลิไวนิลคลอไรด์สามารถยืนยันได้ว่าการค้นพบพอลิไวนิลคลอไรด์ก่อนปี ค.ศ.1912 (Mulder and Knot, 2001)

ขั้นตอนแรกในกระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลคลอไรด์ เริ่มจากการนำน้ำเกลือมาผ่านกระบวนการแยกโครงสร้างของเกลือด้วยกระแสไฟฟ้าจะได้คลอรีน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ก๊าซไฮโดรเจน ส่วนน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ จะนำมากลั่นแยกจนกระทั่งได้ก๊าซเอทิลีน จากนั้นนำเอทิลีนมาผสมกับคลอรีนด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อให้ได้สารโมเลกุลเดี่ยวของไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride, VCM) อยู่ในสภาพของก๊าซ เมื่อได้ไวนิลคลอไรด์ จะนำมาผ่านการพอลิเมอไรเซชันแบบเติม โดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมนั้น เป็นการต่อมอนอเมอร์เข้าไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ครั้งละหนึ่งหน่วยตามลำดับจนได้สายโซ่ยาวของพอลิเมอร์ ปฏิกริยาเริ่มจากการใช้สารเริ่มปฏิกริยา (initiator) มาสร้างพันธะกับมอนอเมอร์ 1 หน่วยก่อน จากนั้นจึงสร้างพันธะเชื่อมกับหน่วยมอนอเมอร์อื่นทีละหน่วยๆ จนได้สายโซ่ยาวในที่สุด มอนอเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกริยาประเภทนี้จะต้องมีพันธะคู่ (double bond) ในหน่วยโมเลกุล ซึ่งโดยทั่วไปใช้หมู่ไวนิล ($\text{CH}_2=\text{CH}-$) ซึ่งพันธะไพ (pi bond) ในพันธะคู่นี้จะแตกตัวเพื่อสร้างพันธะใหม่เพื่อเชื่อมต่อกับมอนอเมอร์หน่วยต่อไป ดังที่เกิดขึ้นกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (ภัทรารุณ, 2552)



ภาพที่ 5 พอลิเมอร์โซ่แบบเดิมของพอลิไวนิลคลอไรด์

ในด้านการค้า พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่ามากในอุตสาหกรรมเคมี มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผลิตได้ทั่วโลกถูกใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นส่วนหนึ่งของตัวอาคาร ทั้งนี้เพราะพอลิไวนิลคลอไรด์มีราคาถูกราคาถูก คงทน ง่ายต่อการขึ้นรูป และสามารถผสมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรุงแต่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่แข็งและคงตัวจนถึงอ่อนนิ่มและยืดหยุ่นมากๆ ได้

การใช้งานพอลิไวนิลคลอไรด์ประสบปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานในภาวะที่อยู๋กลางแจ้ง และตากแดดเป็นเวลานาน ๆ เหตุนี้เองจึงทำให้ความแข็งแรง ลักษณะพื้นผิวและอายุการใช้งานของพลาสติกดังกล่าวต่ำลง ซึ่งโดยทั่วไปในปฏิกิริยาที่พอลิเมอร์ได้รับแสงอัลตราไวโอเลตส่งผลทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเกิดสี (discoloration) และความเงามันลดน้อยลงเป็นต้น หรือสมบัติเชิงกลเช่นความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทกลดลงจากเดิม (Ito and Nagai, 2007) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยทำการเติมสารเติมแต่ง (additive) ต่างๆ

สารเติมแต่ง

โดยปกติก่อนทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ จะต้องนำพอลิเมอร์ผสมกับสารอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเสริมให้พอลิเมอร์มีสมบัติดีขึ้นและคงทนต่อการใช้งานมากขึ้น หรือช่วยให้กระบวนการผลิตทำได้ง่ายขึ้น สารอื่นที่ทำการเติมลงไปเรียกว่า สารเติมแต่ง (additives) นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งบางชนิดทำการเติมเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการใช้สารเติมแต่งอีกชนิด การผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงในพอลิเมอร์เรียกว่า พอลิเมอร์คอมพาวด์ดิ้ง (polymer compounding) สารเติมแต่งที่ทำการผสมลงไป จะต้องกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่ดี สม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ (อรอุษา, 2546)

สารเติมแต่ง มีทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ สามารถจำแนกตามหน้าที่การทำงาน จะแบ่งได้ ดังนี้

- 1) สารดัดแปรสมบัติเชิงกล (mechanical property modifiers)
- 2) สารดัดแปรสมบัติทางเคมี (chemical property modifiers)
- 3) สารดัดแปรเพื่อความสวยงาม (aesthetic property modifiers)
- 4) สารดัดแปรสมบัติที่พื้นผิว (surface property modifiers)
- 5) สารดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต (processing modifiers)

สารเติมแต่งแต่ละประเภทยังสามารถแยกออกได้อีก ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประเภทของสารเติมแต่งสำหรับพอลิเมอร์

สารเติมแต่ง	หน้าที่
สารดัดแปรสมบัติเชิงกล (mechanical property modifiers)	
สารตัวเติม (fillers)	ลดต้นทุน เพิ่มความแข็งแรง
เส้นใยเสริมแรง (reinforcing fibers)	เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งดิ่ง
สารดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifiers)	เพิ่มความทนแรงกระแทก
สารก่อผลึก (nucleating agents)	เพิ่มปริมาณผลึก
พลาสติกไซเซอร์ (plasticizers)	เพิ่มความอ่อนตัวไม่เปราะ
สารดัดแปรสมบัติทางเคมี (chemical property modifiers)	
สารกันออกซิเดชัน (antioxidants)	ป้องกันการสลายตัวจากการออกซิเดชัน
สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี (UV stabilizers)	ป้องกันการสลายตัวจากแสงยูวี
สารหน่วงไฟ (flame retardants)	เพิ่มความทนไฟ
สารกันจุลินทรีย์ (biocides)	ป้องกันการทำลายจากจุลินทรีย์และเห็ดรา
สารดัดแปรเพื่อความสวยงาม (aesthetic property modifiers)	
สารสี (colorants)	ช่วยให้มีสีสันสวยงาม
สารให้กลิ่น (odorants)	เพิ่มกลิ่นหอมหรือดับกลิ่นเหม็น
สารก่อผลึก (nucleating agents)	ช่วยให้แสงผ่านพอลิเมอร์ได้มากขึ้น
สารกันจุลินทรีย์ (biocides)	ป้องกันการเกิดกลิ่นจากเห็ดรา
สารดัดแปรสมบัติที่พื้นผิว (surface property modifiers)	
สารกันการยึดติด (antiblocking agents)	ป้องกันไม่ให้แผ่นฟิล์มหรือซีทติดกัน
สารกันไฟฟ้าสถิต (antistatic agents)	ลดหรือทำลายประจุไฟฟ้าสถิตที่พื้นผิว
สารประสาน (coupling agents)	เพิ่มแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุเสริมแรง
สารทำให้ลื่น (release agents)	ลดสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่พื้นผิว

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สารเติมแต่ง	หน้าที่
สารดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต (processing modifiers)	
สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents)	ทำให้เกิดก๊าซเพื่อใช้ในการผลิตโฟม
สารเชื่อมโยง (crosslinking agents)	ทำให้เกิดการเชื่อมโยง
สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizers)	ป้องกันการสลายตัวทางความร้อน
พลาสติกไซเซอร์ (plasticizers)	ลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว
สารทำให้ลื่น (release agents)	ป้องกันการติดกับเครื่องมือในการขึ้นรูป
สารหล่อลื่น (lubricants)	ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลว กับเครื่องจักรและแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูป
สารช่วยขึ้นรูป (processing aids)	ช่วยให้การขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

ที่มา: อรอุษา (2546)

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ อันได้แก่ สารตัวเติม สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต สารกันออกซิเดชัน และผงสี

1. สารตัวเติม (fillers)

สารตัวเติม (อรอุษา, 2546) ได้แก่ สารเติมแต่งที่เป็นของแข็งทำการผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ สารตัวเติมที่ใช้มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สามารถแยกสารตัวเติมออกได้เป็น 2 ประเภท

1. เอกเทนเดอร์ (extenders) หรือ อินเอทฟิลเลอร์ (inert fillers) คือ สารตัวเติมที่ทำการผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตเป็นหลัก การเติมสารตัวเติมประเภทนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย

2. ฟังก์ชันนอลฟิลเลอร์ (functional fillers) หรือ แอคทีฟฟิลเลอร์ คือ สารตัวเติมที่ทำการผสมกับพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ เป็นหลัก จะเรียกสารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ว่า สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers or reinforcement)

สมบัติของสารตัวเติม สารตัวเติมที่ดีควรมีสมบัติ ดังต่อไปนี้คือ

- 1) สะอาด ปราศจากสารเจือปนและความชื้น ไม่เป็นพิษ
- 2) ฉ่ำเยิ้ม ไม่ละลาย และมีเสถียรภาพทางความร้อน
- 3) ดูดความชื้นและสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ ต่ำ
- 4) สามารถทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
- 5) ทั้งโครงสร้างและสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการขึ้นรูป
- 6) มีการกระจายของขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ
- 7) ไม่ขัดสีเครื่องมือเครื่องจักรในการขึ้นรูป
- 8) ไม่ทำให้สีและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เสียไป

สารตัวเติมแต่ละชนิด จะมีหลายเกรดขึ้นอยู่กับการใช้สมบัติดังต่อไปนี้

1. ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย และการกระจายของขนาดอนุภาค

ขนาดของสารตัวเติมที่แตกต่างกัน จะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา สารตัวเติมที่ใช้งานควรมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 40 ไมโครเมตร โดยเฉพาะสารตัวเติมที่ต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ควรมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด เล็กกว่า 5 ไมโครเมตร สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคละเอียด จะยังทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงที่สูงมากขึ้น ส่วนสารตัวเติมที่มีอนุภาคหยาบมักทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลงกว่ากรณีไม่เติมสารตัวเติม

นอกจากนี้การกระจายของขนาดอนุภาคสารตัวเติมยังส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิเมอร์ กล่าวคือ การผสมสารตัวเติมที่มีการกระจายของอนุภาคที่แคบ จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติดีกว่า สารตัวเติมที่มีการกระจายขนาดของอนุภาคกว้าง ซึ่งพบว่า สารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติแม้มีราคาที่ถูกกว่า แต่จะมีการกระจายขนาดของอนุภาคกว้างกว่าสารตัวเติมที่ได้จากการสังเคราะห์

2. รูปร่างของอนุภาคและความพรุน

อนุภาคของสารตัวเติมมีรูปร่างต่างๆ ได้แก่ กลม (sphere or spherical) สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cube or cubic) บล็อก (block or tabular) แผ่นหรือเกล็ด (flake or platy) และ แท่งหรือเส้นใย (needle or acicular or fiber or fibrous) รูปร่างของอนุภาคของสารตัวเติมมีผลอย่างมากต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติพื้นผิว เช่น ความเงา และสภาพให้ซึมผ่านได้ โดยทั่วไป สารตัวเติมที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา (aspect ratio) สูง เช่น สารตัวเติมที่มีรูปร่างขาดอนุภาคเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น จะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ และทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) ในทางตรงกันข้าม สารตัวเติมที่มีลักษณะกลม จะทำให้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีสมบัติไอโซโทรปิก (isotropic) สำหรับสารตัวเติมที่อนุภาคมีรูพรุน อาจดูดซับสารเติมแต่งอื่นๆ ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น พลาสติกไซเซอร์ สารหล่อลื่น หรือสารเติมแต่งอื่นๆ ทำให้สารเติมแต่งที่ถูกดูดไว้ไม่มีประสิทธิภาพและเป็นปัญหาสำคัญในการปรับสูตรคอมพาวด์

3. ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิว

ความเป็นขั้วของสารตัวเติมจะมีผลต่อการกระจายตัวในพอลิเมอร์ การใช้สารตัวเติมจึงมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อให้สารตัวเติมสามารถกระจายตัวและยึดเกาะพอลิเมอร์ได้ดี เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อาจถูกปรับปรุงด้วยการเคลือบพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (stearic acid) ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับพอลิเมอร์ หมู่กรดจะยึดเกาะกับอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่สายโซ่อะลิฟาติกจะเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ส่งผลให้แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดี

นอกจากการมีขั้วที่พื้นผิวจะมีผลต่อการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ หมู่ที่มีขั้วเหล่านี้ อาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารกันออกซิเดชัน สารเชื่อมโยง ทำให้สารเติมแต่งเหล่านี้ไม่มีประสิทธิภาพ การปรับปรุงพื้นผิวจะช่วยลดปัญหา การปรับปรุงการยึดเกาะสามารถทำการเติมสารประสาน จะช่วยเพิ่มแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม โดยการสร้างพันธะกับทั้งสองเฟส

4. สารเจือปน

การผสมสารตัวเติมที่มีการเจือปนกับพอลิเมอร์จะส่งผลโดยตรงกับพอลิเมอร์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับประเภทของสารเจือปน เช่น เจือปนทองแดง แมงกานีส และเหล็ก แม้จะมีปริมาณที่น้อยมาก แต่จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

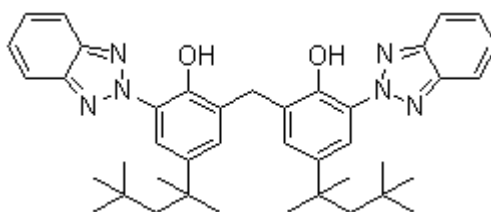
2. สารป้องกันแสงอัลตราไวโอเลต (UV protectors)

ความเสถียรของพันธะโควาเลนต์ในพอลิเมอร์เป็นสิ่งสำคัญ แสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้พันธะโควาเลนต์ในพอลิเมอร์เกิดการเสียเสถียรภาพ แสงอาทิตย์จะเข้ามาสู่ชั้นบรรยากาศของโลกโดยผ่านชั้นโอโซนซึ่งจะจำกัดความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 290 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่มากกว่า 290 นาโนเมตร ถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรังสีอัลตราไวโอเลต จะแผ่มาในโลก เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์ สารป้องกันแสงอัลตราไวโอเลตมีหลายประเภท (Zweifel, 2001; สมศักดิ์, 2548; มาลินี, 2550) ดังนี้

1. ตัวกรองแสง (screening agent, light screens) มีความสามารถในการดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตได้ดี ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถกระเจิงหรือสะท้อนแสงได้ ตัวอย่างตัวกรองแสง ผงสี (pigment) เช่น เขม่าดำ (carbon black) ที่มีขนาดอนุภาค 15-25 มิลลิเมตร ในปริมาณ 2-3 ฟीเซซาร์ จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สามารถดูดพลังงานในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตทั้งหมด

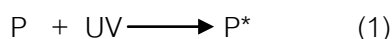
2. สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต (UV absorber) เป็นสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่ป้องกันการสลายตัวด้วยแสงอัลตราไวโอเลต โดยจะทำการดูดซับรังสีในช่วงคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตหรือสารยูวี แล้วปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าหรือมีพลังงานที่ต่ำกว่าออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้แสงอัลตราไวโอเลตไม่สามารถทำอันตรายต่อเนื้อพลาสติกได้ ตัวอย่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต ออร์โทไฮดรอกซีเบนโซฟีโนน (o-hydroxy benzophenones) ออร์โทไฮดรอกซีเฟนิล เบนโซไทโรอาโซล (o-hydroxyphenyl benzotriazoles) และ ฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2-ไฮโดรเจน-เบนโซไทโรอะโซน-2-อิล)-4-(1,1,3,3-เททระเมทิลบิวทิล) ในบางกรณีสารเติมแต่งประเภทนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวรับโมเลกุลของสารที่หลุดออกมาจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เช่นกรดไฮโดรคลอริกที่หลุดออกมาจากพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งก็จะทำหน้าที่ป้องกันการสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งก็จะ

ทำหน้าที่ป้องกันการสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ในระหว่างขั้นตอนการดำเนินไปของปฏิกิริยา (propagation) ได้ดังนั้นในกรณีนี้จะสามารถเรียกสารเติมแต่งประเภทนี้ว่า สารเพิ่มเสถียรภาพ ต่อแสงอัลตราไวโอเลต (UV stabilizer)



ภาพที่ 6 โครงสร้างฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2ไฮโดรเจน-เบนโซไตรอะซีน-2-อิล)-4-(1,1,3,3-เทตระเมทิลปีวทิล)

3. สารลดอุณหภูมิ (quencher) พอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเลต และสามารถกำจัดพลังงานออกได้โดยไม่เกิดการแตกสลายกับพอลิเมอร์ โดยการผสมสารลดอุณหภูมิ จะทำให้พอลิเมอร์สามารถกลับมาสู่สภาวะพื้นี่เสถียรได้ กลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ คือ การถ่ายโอนพลังงานระหว่างโมเลกุล (intermolecular energy) สารลดอุณหภูมิจะเป็นตัวรับพลังงานที่มากเกินไป ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



เมื่อ	P	คือ พอลิเมอร์ที่สภาวะเสถียร
	UV	คือ พลังงานแสงอัลตราไวโอเลต
	P*	คือ พอลิเมอร์ที่สภาวะเร้า
	Q	คือ สารลดอุณหภูมิที่สภาวะเสถียร
	Q*	คือ สารลดอุณหภูมิที่สภาวะเร้า

จากนั้น สารลดอุณหภูมิจะปลดปล่อยพลังงานที่มากเกินไปออกมาโดยไม่ทำให้เกิดการแตกสลายแก่พอลิเมอร์ ตัวอย่างสารลดอุณหภูมิ สารประกอบบอร์แกโนนิเกิล ซึ่งก็ได้เอทิลไดไทโอคาร์บาเมท

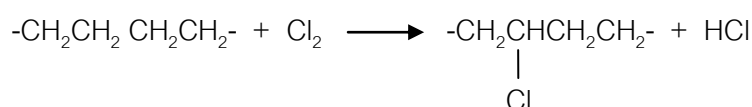
4. สารสะท้อนแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV reflector) เป็นวัสดุต้านทานแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยเกิดการสะท้อนแสง ทำให้สามารถป้องกันพลังงานของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่จะมาถึงพอลิเมอร์ได้ และสามารถป้องกัน ยืดอายุการใช้งานกลางแจ้งได้อย่างมาก การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide: TiO_2) และแผ่นอลูมิเนียมในการเคลือบพอลิเมอร์จะช่วยป้องกันไม่ให้แสงอัลตราไวโอเล็ตเข้ามาถึงพอลิเมอร์ การเคลือบด้วยโลหะแข็งจะทำให้เกิดการสะท้อนได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ตได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกัน

3. สารดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifier)

สารดัดแปรความทนแรงกระแทก (อรอุษา, 2546) ทำจากยาง หรือพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง โดยทำการผสมกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นภายหลังนี้จะถูกเรียกว่า พอลิเมอร์เบลนด์ (polymerblends) เมื่อขึ้นทดสอบได้รับแรงกระแทก ในขั้นแรกพลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนโดยพอลิเมอร์ก่อน ซึ่งถ้าพลังงานนี้ถูกถ่ายโอนไปให้สารเพิ่มแรงกระแทกได้ พอลิเมอร์จะไม่เกิดการแตกหัก ในทางตรงข้าม ถ้าพลังงานเชิงกลไม่สามารถถ่ายโอนไปยังสารดัดแปรความทนแรงกระแทกได้ จะทำให้หลังเกิดการตกค้างอยู่ในพอลิเมอร์ เป็นผลให้เกิดความเค้นขึ้นในพอลิเมอร์ซึ่งนำไปสู่การแตกหัก ซึ่งการที่พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระแทกได้นั้น บริเวณรอยต่อของวัฏภาคพอลิเมอร์กับสารดัดแปรความทนแรงกระแทกจะต้องยึดติดกันได้ดี

สารดัดแปรความทนแรงกระแทกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ ได้แก่

1. คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน (chlorinated polyethylene: CPE) เตรียมได้จากกรรมวิธีคลอรีเนชันโดยการเติมคลอรีนเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนในสายโซ่พอลิเอทิลีน และได้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลพลอยได้ ดังนี้



คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน ที่ผลิตทางการค้ามีหลายเกรดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณคลอรีนอยู่ในช่วง 23-48 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน เกรดที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทกให้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ จะมีปริมาณคลอรีน

ประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ จะใช้ปริมาณ 2-15 ฟीเอชอาร์ ข้อดีของคลอรีเนตดพอลิเอทิลีน คือ มีราคาที่ถูก และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อแสงและสภาวะอากาศได้ดี แต่จะไวต่อสังกะสี ดังนั้นสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้จะต้องมีสังกะสีปริมาณที่ต่ำ

2. อะคริโลไนไตรล์บิวตะไดอินส์ไตรีนเทอร์พอลิเมอร์ (ABS terpolymer) สังเคราะห์ได้จากการนำอะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอินส์ไตรีนโคพอลิเมอร์ มาต่อกับบิวตะไดอินส์เลเท็กซ์ โดยวิธีอิมัลชัน ซึ่งการสังเคราะห์วิธีนี้ช่วยให้อะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอินส์ไตรีนเทอร์พอลิเมอร์ ยึดกับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ดี ข้อดีของสารดัดแปรความทนแรงกระแทกประเภทนี้คือ สไตรีนช่วยให้การขึ้นรูปสามารถทำได้ง่ายขึ้นโดยปรับปรุงสมบัติการไหล ในขณะที่อะคริโลไนไตรล์ช่วยเพิ่มความทนทานต่อความร้อน ความทนทานต่อสารเคมี ส่วนบิวตะไดอินส์จะเพิ่มความทนแรงกระแทก อะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอินส์ สไตรีนเทอร์พอลิเมอร์ สามารถใช้งานกับผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใสและทึบแสง แต่ไม่เหมาะกับงานที่ใช้ภายนอก

3. เมทิลเมทาคริเลตบิวตะไดอินส์ไตรีนเทอร์พอลิเมอร์ (MBS terpolymer) สังเคราะห์ได้จากกระบวนการพอลิเมไรเซชัน โดยการนำสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตมาต่อกับบิวตะไดอินส์บิวตะไดอินส์ เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยพอลิบิวตะไดอินส์ จึงไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้งานภายนอก

4. พอลิอะคริเลต (polyacrylates: PAE) ที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิไวนิล-คลอไรด์ ได้แก่ พอลิ 2 เอทิลเฮกซิลอะคริเลต มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ -70 องศาเซลเซียส และพอลิบิวทิลอะคริเลต มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ -56 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากมีสมบัติคล้ายยาง ทำให้เข้ากับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ลำบาก จึงต้องทำการต่อกับพอลิไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ สามารถใช้งานภายนอกได้

4. ผงสี (pigment)

ผงสี (อรอุษา, 2544) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ การใช้ผงสีจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงสมบัติดังต่อไปนี้ของผงสี ได้แก่

1. กำลังการผสมหรือความแรง (tinting strength) องค์ประกอบส่วนใหญ่ของสี ได้แก่ ผงสีสีขาว การที่จะให้ได้เฉดสีตามเฉดที่ต้องการจึงต้องนำผงสีที่มีสีมาแต่ง ถ้าปรากฏว่า ในการแต่งสีนั้นต้องใช้ผงสีปริมาณเพื่อให้ได้เฉดสีตามที่ต้องการ แสดงว่าผงสีชนิดนั้นมีกำลังการผสมที่ต่ำ

2. ความคงทนต่อแสง (lightfastness or fading resistance) คือ ความสามารถในการคงสีเดิมไว้เมื่อถูกแสง การเกิดเปลี่ยนแปลงของสี เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตในแสงอาทิตย์มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถทำลายพันธะเคมีของผงสี ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของผงสีเปลี่ยนแปลง ถ้าผงสีสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตได้โดยไม่เกิดการเสียหายแก่โครงสร้าง ผงสีนั้นจะสามารถช่วยป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้

3. การคายสี (bleeding) ผงสีจะไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่ผงสีบางประเภทจะละลายในตัวทำละลายบางชนิดได้ เช่น ทาสีขาวทับลงบนสีแดงจะเกิดเป็นสีชมพู เพราะตัวทำละลายของสีขาวจะละลายผงสีแดงบางส่วน แสดงว่า ผงสีแดงเกิดการคายสี

4. ขนาดและรูปร่างของอนุภาค (particle size and particle shape) ปัจจัยทั้งสองปัจจัยจะเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาหรืออันตรกิริยากับสารผสม ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นผงสีที่ขาวที่สุดและทึบแสงที่สุดได้จากแร่อิเลเมนต์ ซึ่งมีอยู่มากในนอร์เวย์ รัสเซีย และรัฐแคลิฟอร์เนีย ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีน้ำอยู่ด้วยจะมีโครงสร้างแบบออสตรูเนียน เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างแบบออสตรูเนียนเป็นผลึกออกไซด์ สามารถเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ได้จาก กรรรมวิธีคลอไรด์ ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นผงสีที่เสถียรมาก ไม่ว่องไวต่อสารเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่เหลืองคล้ำ และมีความคงทนต่อแสง

การเติมผงสีในพอลิเมอร์ ช่วยเสริมแรงและช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานไฟฟ้า นอกจากนั้น ยังมีความสามารถในการดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ผงสีจึงจัดอยู่ในกลุ่มของตัวกรองแสงซึ่งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดหนึ่ง ดังนั้น จึงสามารถช่วยป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์จากแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ด้วย

การแตกสลายของพลาสติก

วัสดุทุกชนิดไม่สามารถรักษาสสมบัติให้คงที่ได้ตลอดย่อมต้องเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การสึกกร่อนของหิน โลหะ หรือไม้ พลาสติกที่ถูกพัฒนาโดยมนุษย์ก็มีการแตกสลายเช่นเดียวกัน การแตกสลายของพลาสติกสามารถสังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนแปลง ความเปราะที่เพิ่มมากขึ้น ความมันเงาที่ลดลง เกิดรอยร้าวหรือคลิ่นบนพื้นผิว มีการปลดปล่อยก๊าซ การแตกสลายของพลาสติกที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้สมบัติของพลาสติกด้อยลง แต่การแตกสลายของพลาสติกที่เกิดขึ้นในแง่ดีคือสามารถที่จะควบคุมอายุการใช้งานได้

ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ การแตกสลายของพลาสติก (Allen and Edge, 1992; มาลินี, 2551)

1. ความร้อน พอลิเมอร์เกือบทุกชนิดจะเกิดการแตกสลายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแตกสลายนี้ จะแตกต่างกันไปในพอลิเมอร์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์นั้นๆ ความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกสลาย อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปหรือการใช้งาน

2. แสง รังสียูวีในแสงแดดเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับวัสดุพอลิเมอร์มากที่สุด รังสียูวีมีความยาวช่วงคลื่น 290-400 นาโนเมตร แม้จะมีช่วงสั้นแต่มีความสำคัญกับวัสดุพอลิเมอร์ เพราะเป็นพลังงานสูงสุดที่สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดการแตกสลายได้ รังสียูวีมีอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ในแสงที่ส่องมาถึงโลก โมเลกุลของพอลิเมอร์เมื่อได้รับพลังงานจากรังสียูวีจะทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะเคมีซึ่งพันธะเคมีมีการตอบสนองกับความยาวคลื่นของรังสียูวีแตกต่างกันตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความยาวคลื่นในการสลายพันธะ

พอลิเมอร์	พันธะ	การดูดกลืนสูงสุด (นาโนเมตร)
พอลิโอสีฟีน	C-C, C-H	140.00
พอลิไวนิลคลอไรด์	C-halogen, C-C, C-H	190.00
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	C-C, C-H, C-O, O-H	200.00
พอลิบิวตะไดอีน	C-C, C-H, C=C	220.00
พอลิสไตรีน	C-C, C-H, C=C	230.00-280.00
อลิฟาติก พอลิเอไมด์	C-C, C-H, N-H, C=O, C-N	220.00

ที่มา: Allen and Edge (1992)

ตารางที่ 4 ความยาวคลื่นในการแตกสลายของพอลิเมอร์แต่ละประเภท

พอลิเมอร์	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
พอลิคาร์บอเนต	290.00, 345.00
พอลิเอทิลีน	300.00
พอลิพรอพิลีน	310.00
พอลิสไตรีน	318.00
พอลิเอสเตอร์เรซิน	325.00
พีวีซี/พอลิไวนิลอะซีเตด	327.00, 364.00

ที่มา: Allen and Edge (1992)

3. บรรยากาศ พอลิเมอร์อาจเสื่อมสภาพเนื่องจากก๊าซในธรรมชาติ ในบรรยากาศมีออกซิเจนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิจะส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีนำไปสู่การแตกสลายของพอลิเมอร์ 2 ลักษณะ คือช่วยเร่งการแตกหักเมื่อพลาสติกได้รับรังสียูวีและช่วยเร่งการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้สิ่งปนเปื้อนในอากาศ เช่น ฝุ่นจะลดความแรงของแสงแดดแต่อนุภาคที่มีความแหลมคมที่ถูกพัดพามาโดยลมจะทำให้ผิวหน้าของพลาสติกเสื่อมสภาพ ส่วนมลพิษทางอุตสาหกรรม เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) หรือ โอโซน (O_3) จะส่งผลต่อการแตกสลายของพอลิเมอร์

4. ความชื้น จากน้ำฝนหรือน้ำค้าง เป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยน้ำค้างเกิดจากการควบแน่นของน้ำในอากาศจึงมีออกซิเจนสูงอยู่มาก เมื่อสัมผัสกับพื้นผิวของพลาสติกจะนำออกซิเจนเข้าสู่พลาสติกเป็นการเร่งการออกซิเดชัน

5. จุลินทรีย์ พอลิเมอร์ธรรมชาติจะมีความไวต่อจุลินทรีย์ทำให้เกิดการแตกสลายได้ดี แต่พอลิเมอร์สังเคราะห์จะไม่สามารถเกิดการแตกสลายเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ ซึ่งการแตกสลายโดยจุลินทรีย์จะทำให้ไม่สามารถนำพอลิเมอร์กลับมาใช้ใหม่ได้ (Eubeler, 2001)

6. แรงเชิงกล โครงสร้างของพอลิเมอร์อาจถูกทำลายเมื่อได้รับความเค้นสูง พลาสติกจะได้รับแรงเค้นสูงระหว่างกระบวนการขึ้นรูปหรือการหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่ในการรีไซเคิล วัสดุถูกบิดและส่งผ่านตัวอัดรีดหรือตัวฉีดหรือส่งเข้าไปในแม่พิมพ์ สิ่งที่เกิดขึ้นเป็นการผสมปนกันของการแตกสลายพันธะในสายโซ่ การเกิดออกซิเดชัน การสลายทางเคมีเชิงกล ดังนั้นการบ่งบอกปัจจัยหลักของการแตกสลายจึงเป็นเรื่องยาก หากอุณหภูมิของกระบวนการขึ้นรูปสูงขึ้น การสลายทางเคมีเชิงกลจะเร็วขึ้น ความไวของการสลายตัวขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ ชนิดของเครื่องมือเชิงกลและความเค้นอาจมีผลต่อปริมาณการสลายตัวของสายโซ่ เช่น ผิวพลาสติกอาจสึกหรอโดยการ เช็ด ถู ขีดข่วน สารเติมแต่งอาจใช้เพื่อลดแรงเสียดทาน หรืออาจใช้การเคลือบผิวป้องกันการแตกสลาย

7. สารเคมี เมื่อมีการนำพลาสติกสัมผัสกับสารเคมีเป็นเวลานาน จะส่งผลให้เกิดการแตกสลายได้ตัวอย่าง นำพลาสติกบรรจุของเหลวเช่น กรด ต่าง น้ำ ไขมัน สารซักล้าง ของเหลวเหล่านี้จะเกิดจะเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆ ที่ผิวด้านในที่สัมผัสกับของเหลว และค่อยๆซึมเข้าไปในพลาสติก สารละลายกรด-ด่าง จะมีผลต่อพลาสติกที่สังเคราะห์โดยกลไกการควบแน่น เช่น

พอลิคาร์บอเนต ในบางครั้งของเหลวจะเชื่อมต่อกับพอลิเมอร์แต่จะมีผลต่อสารเติมแต่งในพลาสติก ได้แก่ สารช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน สารดูดกลืนแสงยูวี สารต้านออกซิเดชัน โดยสกัดสารเหล่านี้ออกจากภาชนะพลาสติกกระบวนการเหล่านี้ทำให้ความต้านทานพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อมลดลง

การแตกสลายของพลาสติกอาจเกิดจากปัจจัยเดียวหรือหลายปัจจัย ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์หรือเงื่อนไขการใช้งาน ผลรวมของหลายปัจจัยจะทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าเพียงปัจจัยอย่างใดอย่างหนึ่ง

บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yang *et al.* (1999) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเกิดรอยชำรุดของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ สารตัวเติมที่ใช้ในการศึกษามีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ Si, SiC, SiO₂, Al₂O₃, CaCO₃, B₄C, wollastonite fiber และ fly ash สารอินทรีย์ ได้แก่ carbon black, graphite, ABS และ PTFE จากการทดสอบการเกิดรอยชำรุดพบว่า การใช้ SiC และ Al₂O₃ เป็นสารตัวเติมจะทำให้วัสดุมีความสามารถต้านทานการเกิดรอยชำรุดได้มากที่สุด Si และ wollastonite fiber สามารถเพิ่มค่าการต้านทานการเกิดรอยขีดชำรุดได้ fly ash และ B₄C สามารถช่วยลดการเกิดรอยชำรุดได้ การใช้ CaCO₃ และ SiO₂ ทำให้ค่าการต้านทานการเกิดรอยชำรุดลดลง ส่วน carbon black, graphite และ PTFE ไม่สามารถทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ การเติม ABS เป็นการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุ การใช้ Titanium butoxide เป็นสารประสานจะทำให้การยึดเกาะของพอลิเมอร์กับสารตัวเติมดีขึ้น

เนื่องจากพอลิไวนิลคลอไรด์มีสมบัติที่แข็ง เปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทกจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภท จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์ โดยการเติมพลาสติกไซเซอ์ (plasticizer) Pita *et al.* (2002) ทำการวิจัยพลาสติกไซเซอ์ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลและสภาวะในกระบวนการผลิต พลาสติกไซเซอ์ที่เลือกทำการวิจัยคือ di-isodecyl phthalate (DIDP) กับ di-2-ethylhexyl phthalate (DOP) ทำการเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิยูรีเทน เครื่องมือที่ใช้ในการผสมคือเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) โดยการเลือกใช้ความเร็วสกรูแตกต่างกัน (screw speed) ได้แก่ 30, 60 และ 100 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทำการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการ

ใช้ DIDP หรือ DOP จะให้สมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน การใช้ความริ้วสกรูที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อความเข้ากันได้ของวัสดุเชิงประกอบเป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลมีความแตกต่างกัน วัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิยูรีเทนจะมีสมบัติทางโครงสร้าง (structural properties) ดีกว่าการใช้พลาสติกไฮเซอร์

Real *et al.* (2003) ทำการศึกษาภาวะเร่งของพอลิไวนิลคลอไรด์สำหรับประยุกต์ใช้งานกลางแจ้ง ทดสอบสมบัติเชิงกลและน้ำหนักโมเลกุล แหล่งแสงที่ใช้ภายใต้ภาวะเร่งใช้หลอดขึ้นอนและแสงแดดธรรมชาติที่ลึบอน ตามมาตรฐาน ASTM D1437 ตัวอย่างทำมุมเอียง 45 องศา กับพื้นราบ ในแต่ละสูตรผสมพอลิไวนิลคลอไรด์มีผงสีไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และประเภทสารเติมแต่งแตกต่างกัน เมื่อพอลิไวนิลคลอไรด์สัมผัสกับแสงเวลาเพิ่มมากขึ้น ทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีระดับความเหลืองเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระแทกมีค่าต่ำลง การเปลี่ยนแปลงสีสรุปได้ว่า สูตรการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตและซิงค์เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ต่ำทั้งภายใต้ภาวะเร่งและแสงแดดธรรมชาติ สอดคล้องกับผลของอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

Karayildirim *et al.* (2006) วิจัยสารตัวเติม 3 ชนิดได้แก่ Red Mud (RM), CaCO_3 และ dolomite ที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง thermogravimetry/mass spectrometry (TG/MS) จากการทดสอบพบว่า การใช้ CaCO_3 และ dolomite เป็นสารตัวเติม จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การใช้ Red Mud จะมี iron oxide (FeCl_3) จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาการขจัดกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination) แต่จะช่วยยับยั้งการสลายตัวที่เกี่ยวข้องกับการควบแน่น และปฏิกิริยา dehydrogenation การเลือกใช้ Red Mud จะทำให้เกิดเบนซีน และการแทนที่ด้วยอะโรมาติก ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้น

Muasher *et al.* (2006) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเพิ่มเสถียรภาพทางแสงฮินเดอร์ เอมีน (hindered amine) และสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตสำหรับวัสดุเชิงประกอบพลาสติก/ผงไม้ ใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นองค์ประกอบหลัก ทดสอบโดยใช้สภาวะกลางแจ้งเป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ติดตามการเปลี่ยนแปลงโดยการวัดสีและฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transfor infrared) ทำให้เกิดความเข้าใจในกลไกการเสื่อมสลายทางแสงของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก/ผงไม้ ช่วงเริ่มต้นการเสื่อมสลายทางแสงเริ่มจากการ

ซีดลงของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก/ผงไม้ หลังจากนั้นระดับความเหลืองเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณอินเดอร์ เอมีนที่เพิ่มมากขึ้นจะสามารถควบคุมการเปลี่ยนสีได้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตจะสามารถควบคุมการเปลี่ยนสีได้ดีต้องเติมอินเดอร์ เอมีน

Ito *et al.* (2007) ทำการวิเคราะห์กลไกการแตกสลายของพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีการเติมพลาสติกไซเซออร์ ภายใต้สภาวะการบ่ม สูตรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย di-sec-octylphthalate (DOP) เป็นพลาสติกไซเซออร์ แคลเซียมคาร์บอเนต ,เขม่าดำ (carbon black) เป็นสารตัวเติม (filler) lead sulphate เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทำการผสมด้วยคาเลนเดอร์โรล ผลการวิจัยพบว่า การบ่มด้วยสภาพแวดล้อมจะเกิดการแตกสลายจากการเคลื่อนที่ออกของสารอนินทรีย์และพลาสติกไซเซออร์ ทำให้ผิวของตัวอย่างเกิดเป็นช่องว่าง ส่งผลทำให้เกิดการแตกสลาย สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง การบ่มด้วยความร้อนการแตกสลายเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrangement) และ aggregation ของสายโซ่ซึ่งเป็นผลมาจากการอบอ่อน (annealing) การแตกสลายที่เกิดจากการบ่มทั้ง 2 วิธี จะส่งผลต่อสมบัติของวัสดุคล้ายกัน กล่าวคือ สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) และ สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties) มีค่าที่ลดลง

Real *et al.* (2007) ทดสอบสูตรผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ 4 สูตรผสม เพื่อประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ใช้งานกลางแจ้ง ภายใต้ภาวะเร่งใช้แหล่งแสงเป็นหลอดซีนอน มีการพ่นไอน้ำและปิดการพ่นไอน้ำ อิทธิพลของน้ำและรังสีภายใต้ภาวะเร่งมีผลต่อพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำการวิเคราะห์โดย XPS, SEM และสี เปรียบเทียบพอลิไวนิลคลอไรด์ภายใต้ภาวะเร่งที่เวลาต่างกัน พบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ที่สัมผัสกับรังสีเป็นเวลานาน (2,000 ชั่วโมง) ก่อนทำการพ่นไอน้ำ รังสีทำการตัดสายโซ่โมเลกุลทำให้สั้นลง อะตอมคลอรีนในโมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์หลุดออก จุดบกพร่องของพอลิไวนิลคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการพ่นไอน้ำ

Beg *et al.* (2008) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิพรอพิลีนเป็นองค์ประกอบหลักหรือเมทริกซ์ มีเส้นใยไม้จากต้นสนเป็นวัสดุเสริมแรง โดยทำการเติมเส้นใยไม้ปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร ได้แก่ 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ maleated polypropylene (MAPP) เป็นสารประสาน (coupling agent) ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) นำตัวอย่างทำการกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ (reprocess) เป็นจำนวน 8 ครั้ง จากการทดสอบตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่ทำการเติมเส้นใยไม้ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ และ

ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) มีค่าลดลง 16 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่า ความทนแรงกระแทก (impact strength), ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และ มอดุลัสดัดโค้ง (flexural modulus) มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบของการกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่เพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการเติมเส้นใยไม้ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่น้อยกว่า การที่วัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีน/เส้นใยไม้ มีค่าสมบัติเชิงกลที่ลดลงเมื่อผ่านการกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่เกี่ยวข้องกับ การแตกสลายของเส้นใยไม้ที่เกิดขึ้นระหว่างการกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ จากที่มีความยาวเฉลี่ย 2.36 นาโนเมตร กลายเป็น 0.37 นาโนเมตร ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีปริมาณเส้นใยไม้ที่ลดลง มีช่องว่างเพิ่มมากขึ้นทำให้สายโซ่เกิดการจัดเรียงตัวที่ชิดกันมากขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นและความเป็นผลึกของพอลิพรอพิลีนเพิ่มมากขึ้น จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น

Habibi *et al.* (2008) ทำการวิจัยเส้นใยที่มีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยการทำการสกัดเส้นใย lignocellulosic จากลำต้นของฝ้าย, ฟางข้าว, ชานอ้อยและของเสียที่ออกจากอุตสาหกรรมแปรรูปกล้วย วัสดุเชิงประกอบนี้มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene :LDPE) มีการใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยให้เข้ากันได้ดีขึ้น (compatibilizer) หรือ maleated low density polyethylene (MLDPE) การศึกษาสมบัติทางความร้อนจะใช้ scanning electronic calorimetry (DSC) การทดสอบสมบัติเชิงกลทำการวัดความสามารถในการทนแรงดึง (tensile strength) ฐานฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electronic microscopy : SEM) ในการศึกษาจากผลการวิจัยพบว่าเส้นใย lignocellulosic ที่ได้จากลำต้นฝ้ายและของเสียที่ออกจากอุตสาหกรรมแปรรูปกล้วยจะมีปริมาณลิกนิน (lignin) สูง แต่มีปริมาณเซลลูโลส (cellulose) ต่ำ เส้นใย lignocellulosic ที่ได้จากชานอ้อยและฟางข้าวมีปริมาณลิกนิน ต่ำ แต่มีปริมาณเซลลูโลสสูง นำเส้นใยที่ได้จากตัวอย่างต่างๆ มาทำการบดให้มีขนาดความยาวประมาณ 300-500 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ไมโครเมตร ทำการผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ maleated low density polyethylene ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) องค์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/เส้นใยไม้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยที่ใช้มีปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจะสูงขึ้นเมื่อมีการใช้องค์ประกอบหลักเป็น maleated low density polyethylene เพราะทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดีกว่า สามารถยืนยันได้จากผลกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Xu *et al.* (2008) เตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์กับเส้นใยทางธรรมชาติ ทำการศึกษาค่าสมบัติของประเภทเส้นใยทางธรรมชาติ 4 ประเภท ได้แก่ ชานอ้อย ฟางข้าว แกลบข้าว และเส้นใยจากต้นสน ศึกษาปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่สนใจ ได้แก่ styrene-ethylene-butylene- styrene จากการทดสอบพบว่าการใช้แกลบข้าวเป็นส่วนเสริมแรงจะทำให้สมบัติเชิงกลดีกว่าเส้นใยธรรมชาติประเภทอื่น ๆ สารดัดแปรความทนแรงกระแทกมีผลต่อความทนทานต่อแรงดึงในระดับปานกลาง การเติมเส้นใยทางธรรมชาติจะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมเส้นใยทางธรรมชาติ สารดัดแปรความทนแรงกระแทกมีผลไม่มากต่อเสถียรภาพทางความร้อน วัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมแกลบข้าวจะมีอัตราการดูดซับน้ำที่ต่ำและมีเสถียรภาพทางรูปร่างที่ดีกว่าการเติมเส้นใยจากชานอ้อย ฟางข้าว และเส้นใยจากต้นสน การเติมสารดัดแปรความทนแรงกระแทกจะเพิ่มอัตราการดูดซับน้ำ

Garcia *et al.* (2009) วิจัยสารหน่วงไฟและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/เส้นใยไม้ นำตัวอย่างที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ทำการเร่งสภาวะโดยมีแหล่งแสงเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ยูวี (fluorescent UV lamp) นำตัวอย่างทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนการเร่งสภาวะพบว่า ความสามารถในการทนแรงดึง (tensile properties), ความสามารถในการดัดโค้ง (flexural property) และความสามารถในการกดอัด (compression property) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น การเติมสารหน่วงไฟ (flam retardancy) จะทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดสีหลังจากการผ่านการเร่งสภาวะ เพราะสารหน่วงไฟไม่สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ ทำให้เกิดรูพรุน น้ำจึงสามารถผ่านเข้าออกเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย ส่งผลทำให้เกิดสี การเลือกใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสง (light stabilizer) ที่เกิดจากการผสมระหว่าง hindered amine light stabilizers (HALS), ยูวี-ฟิลเลอร์ และสารกันออกซิเดชัน (antioxidant) จะทำให้เกิดสีลดลง สรุปจากงานวิจัยได้ว่า ประสิทธิภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/เส้นใยไม้สูงจะดีขึ้น เมื่อมีการใช้ aluminium hydroxide เป็นสารหน่วงไฟ และใช้สารเพิ่มเสถียรภาพที่เกิดจากการผสมระหว่าง hindered amine light stabilizers, ยูวี-ฟิลเลอร์ และสารกันออกซิเดชันอีกวิธีหนึ่งที่สามารถป้องกันการเกิดสีได้ คือ การเคลือบพื้นผิว จะช่วยชะลอการเกิดสี

Sterky *et al.* (2009) ทำการวิจัยวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ มีการเติม montmorillonite clay ที่ทำการปรับปรุงด้วยเคมี ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง การปรับปรุงจะทำการปรับปรุง 2 วิธี คือ การปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์แคทไอออน (cationic) และสารอินทรีย์ non-ionic ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ความแตกต่างของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการปรับปรุงจะส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน การปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์ non-ionic จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน การปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์แคทไอออน (cationic) จะไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาการขจัดกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination)

Karmalm (2009) ทำการวิจัยศึกษา epoxidised soybean oil (ESBO) เพื่อใช้เป็นพลาสติกไฮเซอรปฐมภูมิในพอลิไวนิลคลอไรด์แขวนลอย ทำการเปรียบเทียบพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ทำการเติม ESBO กับพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ทำการเติม ESBO และสารเพิ่มเสถียรภาพ ได้แก่ Ca/Zn stearate, tin stearate, phosphate co-stearate, metal free stabilizer และ hydrotalcites ทำการทดสอบการเกิดสีด้วยการวิเคราะห์ yellowness index และ UV-Vis spectroscopy จากการทดสอบพบว่า การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำให้การเกิดสีหลังการบ่มเพิ่มมากขึ้น การเติมอลูมิเนียมสเตียเรตจะช่วยทำให้เกิดสีหลังการบ่มลดน้อยลง เนื่องจาก ESBO มีกลไกเสถียรภาพด้วยตัวเองโดยปราศจากการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ จากการวิเคราะห์ด้วย ion chromatography ทำการสกัด ESBO ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำให้ทราบว่า มีปริมาณคลอรีนมากขึ้นหลังการบ่ม การวิเคราะห์ด้วย MALDI จะพบกรดไฮโดรคลอริกอยู่กับ ESBO จากข้อมูลทั้ง 2 เทคนิคสามารถยืนยันได้ว่า ESBO มีการกักเก็บกรดไฮโดรคลอริกไว้

Zhao *et al* (2009). ทำการวิจัยการแตกสลายพื้นผิวของเรซินพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว โดยมีการสร้างสภาพแวดล้อมในการทดสอบ มีการใช้หลอดซีนอน (xenon lamp) เป็นแหล่งแสง กำหนดระยะเวลาในการทดสอบ 12, 24, 36, 60 และ 90 วัน เมื่อครบระยะเวลาตามที่กำหนดนำตัวอย่างมาทำการทดสอบการเกิดสี โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) จากการตรวจวัดพบว่า เมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มมากขึ้นทำให้ตัวอย่างมีความคล้ำและความเหลือง ความเงาของตัวอย่างทำการวัดด้วยกลอสมิเตอร์ (gloss meter) ค่าความเงาจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการอยู่ในช่วงการทดสอบทำให้พื้นผิวของตัวอย่างเกิดความขรุขระ ทำให้ความเงาจะลดลง ผลของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transfor infrared) พบว่าค่าการสั่นของพันธะเอสเทอร์ในโครงสร้างมีค่าลดลง เพราะการอยู่ในสภาพแวดล้อมในการทดสอบทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเอสเทอร์ จาก

งานวิจัยทำให้ทราบว่า แสงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นผิว ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีค่าลดลง ดังนั้นการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์กลางแจ้ง ต้องมีการปรับปรุงด้วยการเติมสารเติมแต่ง เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์

ต่อมา Ferrer (2010) วิจัยการใช้ ESBO เป็นพลาสติกไฮดรอกซีในบรรจุภัณฑ์อาหารพอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจาก phthalates ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีความเป็นพิษและสามารถเกิดการเคลื่อนย้ายมาปนเปื้อนในอาหารได้ ในการศึกษาจะทำการเตรียมตัวอย่างที่มีที่เติม ESBO ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (fourier transfor infrared) พบว่า พอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีการเติม ESBO จะไม่พบการสั่นของ oxirane ring ที่ 823 และ 1,200 cm^{-1} เป็นการยืนยันได้ว่า oxirane ring มีการเปิดออก เนื่องจากทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดจากการแตกสลายทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์ ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพอื่น การศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวพบว่า การสลายตัวที่ 95 เปอร์เซ็นต์จะมีอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น

Pechyen *et al.* (2011) อธิบายผลของสารเติมแต่งประเภทต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของท่ออียอกซีเสริมแรงด้วยใยแก้ว โดยใช้โปรแกรมเซ็นทรัลคอมโพสิตดีไซน์ จัดออกแบบการทดลอง ปัจจัยในการทดลองได้แก่ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต สารกันออกซิเดชัน เขม่าดำ และสารหน่วงไฟ ปริมาณของสารเติมแต่งทำการศึกษาในช่วง 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การแตกสลายหรือกลไกการสลายตัวด้วยแสงของท่ออียอกซีเสริมแรงด้วยใยแก้วทำการศึกษาโดยการทดสอบที่สภาวะกลางแจ้งและตู้เร่งสภาวะ หลังจากนั้นทำการติดตามสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และลักษณะปรากฏที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเติมสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารกันออกซิเดชัน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เขม่าดำ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารหน่วงไฟ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสูตรอื่นเมื่อเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ค่าที่ได้มีความคล้ายคลึงกันทั้งการทดสอบที่สภาวะกลางแจ้งและตู้เร่งสภาวะ ภายใต้ภาวะเร่งสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น สี และความเงาจะมีค่าที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากยิ่งขึ้น การเปลี่ยนแปลงสีจะเริ่มจากมีสีเหลืองจางหลังจากนั้นจะเริ่มเพิ่มระดับความเหลืองเพิ่มมากยิ่งขึ้น ค่าความหนาแน่นและค่าความเงาที่ลดลงเป็นผลมาจากการสลายตัวบริเวณพื้นผิวที่เกิดจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต

Leu *et al.* (2012) วัสดุเชิงประกอบพลาสติก/ผงไม้ เทคโนโลยีใหม่ที่เป็นมิตรทางสิ่งแวดล้อม คือการนำพลาสติกกรีซไคเลผสมกับผงไม้ มีองค์ประกอบหลัก 4 องค์ประกอบ คือ ผงไม้ พลาสติกเทอร์โมพลาสติก สารประสาน และสารหล่อลื่น สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพลาสติก/ผงไม้มีค่าสูงขึ้น ขึ้นอยู่กับสูตรในการผสม ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการผสม ทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติก/ผงไม้โดยการอัดรีด พารามิเตอร์ 4 ตัวที่ทำการศึกษา 1 ขนาดของผงไม้ 2 ปริมาณของสารประสาน 3 ปริมาณสารหล่อลื่น และ 4 สัดส่วนของผงไม้ต่อพอลิไธไคเล ผงไม้ที่มีขนาดเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร สามารถปรับปรุงความแข็งแรงการดึงและความทนแรงดัดโค้ง ลดการบวมเนื่องมาจากการดูดซับน้ำ ปริมาณที่เหมาะสมของสารประสานและสารหล่อลื่น คือ 3.0 เปอร์เซ็นต์ การเติมสารประสานช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลดการบวม แต่ปริมาณสารหล่อลื่นที่สูงขึ้นทำให้บวมมากขึ้น สมบัติเชิงกลต่ำลง ปริมาณผงไม้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่าจะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสม

จากรายงานที่ผ่านมาจะพบว่ามีการศึกษาการใช้วัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใยไม้และพยายามทำการปรับปรุงวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์สังเคราะห์/เส้นใยไม้ให้มีความสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น ซึ่งการที่วัสดุเชิงประกอบมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมจะส่งผลให้อายุการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 พอลิไวนิลคลอไรด์

1.2 ผงไม้

1.3 สารเติมแต่ง

1.3.1 สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต ได้แก่ ฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2-ไฮโดรเจน-เบนโซไทโรอะซีน-2-อิล)-4-(1,1,3,3-เททระเมทิลบิวทิล)

1.3.2 สารดัดแปรความทนแรงกระแทก ได้แก่ คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน

1.3.3 ผงสี ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง (high speed mixer)

2.2 เครื่องอัดรีดชนิดตัวหนอนคู่ (twin screw extruder)

2.3 เครื่องยูนีเวอร์ซอลเทสติงแมชชีน (Instron Universal testing machine, รุ่น 5965, สหรัฐอเมริกา)

2.4 เครื่องทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (izod impact tester)

2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM)

2.6 มิโนลตา สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น CM-310, Konica Minolta Holdings, Inc., ญี่ปุ่น)

2.7 เครื่องวัดความเงา (glossmeter)

2.8 ตู้เร่งภาวะ (Q-UV weathering tester)

วิธีการ

วิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นๆดังต่อไปนี้

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารเติมแต่ง และ การแตกสลายหรือกลไกการสลายตัวด้วยแสงของพอลิเมอร์ตลอดจนวิธีการป้องกัน ตรวจสอบ และติดตามผล จากตำรา เอกสารทางวิชาการ และแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น สหวิทยบัตร และ อินเทอร์เน็ต

2. ศึกษาชนิดของสารเติมแต่ง จัดเตรียมวัตถุดิบและสารเคมี ตลอดจนอุปกรณ์ที่สำคัญที่จะใช้ในการทดลอง ได้แก่

2.1 เมทริกซ์ พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride)

2.2 วัสดุเสริมแรง ประเภท ผงไม้ (wood powder)

2.3 สารเติมแต่ง

2.3.1 สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต

2.3.2 สารดัดแปรความทนแรงกระแทก

2.3.3 ผงสี

3. ศึกษาวิธี ภาวะ และขั้นตอนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้โดยใช้กระบวนการอัดรีด (extrusion)

4. การเตรียมและการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

4.1 ออกแบบแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม Central Composite Design (CCD) โดยกำหนดปัจจัย 4 ประเภทได้แก่ ผงไม้ สารดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลต สารดัดแปรความทนแรงกระแทก และผงสี ระดับปริมาณที่สนใจ 5 ความเข้มข้น การประมวลผลการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับปริมาณที่สนใจ

ปัจจัย	ระดับปริมาณที่สนใจ				
	-2	-1	0	1	2
ปริมาณผงไม้	15.0%	20.0%	25.0%	30.0%	35.0%
ปริมาณสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต	0.0%	0.5%	1.0%	5.0%	10.0%
ปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทก	1.0%	3.0%	5.0%	7.0%	10.0%
ปริมาณผงสี	0.1%	0.3%	0.5%	0.7%	1.0%

4.2 เมื่อทำการเลือกอัตราส่วนที่มีความเชื่อมั่นมากกว่า 95 เปอร์เซนต์ จะได้สูตรผสม 30 สูตรตามตารางที่ 6 ทำการผสมสารเติมแต่งต่างๆ ในอัตราส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 6 ในพอลิไวนิลคลอไรด์และทำการตีให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวโดยเครื่องผสมชนิดความเร็วสูง

4.3 เตรียมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่เตรียมได้จากข้อ 4.2 โดยใช้ กระบวนการอัดรีด (extrusion) อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 170 องศาเซลเซียส

4.4 นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ผ่านการคงตัวแล้วมาตั้งทิ้งไว้ก่อนจะนำไปตัดเป็นชิ้นตัวอย่าง เพื่อใช้ในการหาความหนาแน่นและตรวจสอบสมบัติเชิงกล ตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อเข้าการทดสอบเสถียรภาพทางแสงภายใต้ภาวะเร่ง

5. ตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการสลายตัวด้วยแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ที่เตรียมได้โดยวิธีการเข้าตู้เร่งภาวะที่ระยะเวลาต่างๆ

6. ติดตามผลการต้านทานการสลายตัวของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่เตรียม ได้โดยตรวจสอบลักษณะปรากฏ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ที่ภาวะเร่งด้วยเวลาต่างกัน ดังนี้

6.1 ตรวจสอบลักษณะปรากฏ ได้แก่

6.1.2 สภาพพื้นผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

6.2 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

6.2.1 การเปลี่ยนแปลงของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

6.2.2 ความเงาด้วยกลอสมิเตอร์

6.2.3 ความหนาแน่น

6.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ

6.3.1 ความต้านทานแรงดัดโค้ง (flexural property : 3-point bending) ตามมาตรฐาน ASTM D 790-07

7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

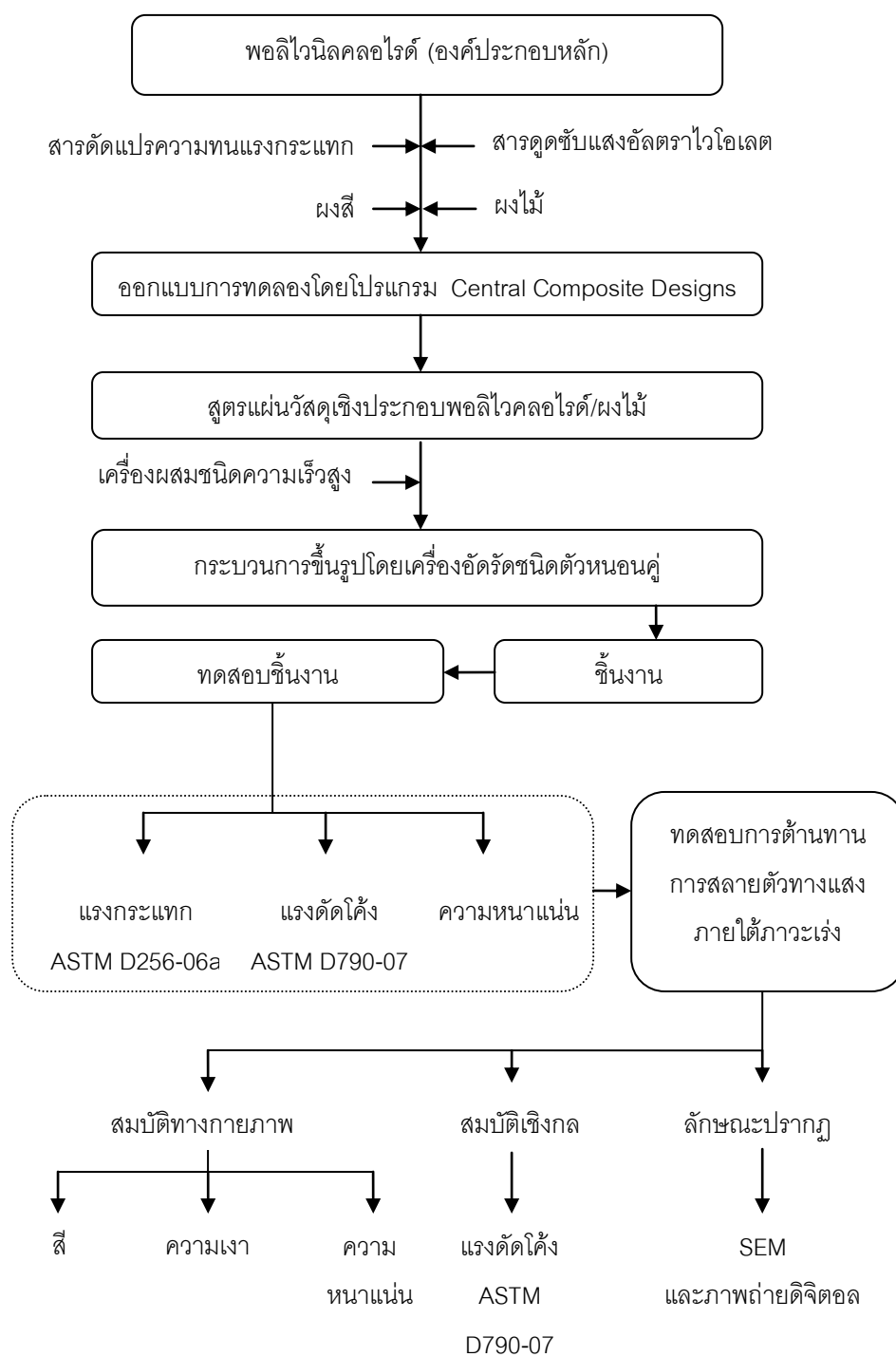
7.1 วิเคราะห์แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ได้แก่ ความทนแรงกระแทก ความต้านทานแรงดัดโค้ง ตลอดจนความหนาแน่น

7.2 วิเคราะห์การต้านทานการสลายตัวทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภาวะเร่ง

8. สรุปผลการทดลองและจัดทำรายงาน

ตารางที่ 6 จำนวนการทดลองที่ออกแบบโดยโปรแกรม CCD สำหรับ 4 ปัจจัย

สูตร	ระดับปริมาณที่สนใจ			
	ผงไม้	สารดูดซับแสงยูวี	สารดัดแปรความทนแรงกระแทก	ผงสี
1	-1	1	-1	-1
2	0	0	0	0
3	1	1	-1	1
4	-1	-1	-1	1
5	1	-1	1	1
6	1	1	1	-1
7	0	0	0	0
8	-1	1	1	1
9	1	-1	-1	-1
10	-1	-1	1	-1
11	0	0	0	0
12	-1	1	1	-1
13	-1	-1	-1	-1
14	1	1	-1	-1
15	1	-1	-1	1
16	0	0	0	0
17	1	1	1	1
18	-1	1	-1	1
19	-1	-1	1	1
20	1	-1	1	-1
21	0	2	0	0
22	0	0	2	0
23	2	0	0	0
24	0	0	0	2
25	0	0	0	-2
26	-2	0	0	0
27	0	-2	0	0
28	0	0	-2	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0



ภาพที่ 7 แผนผังแสดงกระบวนการทดลอง

ผลและวิจารณ์

1. การออกแบบแผนการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่องโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้าในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ปัจจัยที่ควบคุมได้ และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ปัจจัยที่รบกวนระบบ การออกแบบแผนการทดลองมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการทำการทดลองแต่ละครั้ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์ หรือหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ เช่น การผลิตแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ การกำหนดปริมาณขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีน้ำหนักที่เบา สมบัติเชิงกลที่ยอมรับได้ และมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น เป็นต้น ในทางวิศวกรรมจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบกระบวนการ (design process) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ คือ การศึกษาเพื่อกำหนดหรือระบุค่าที่ดีที่สุดภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการใช้กับกระบวนการ การออกแบบแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม Central Composite Design (CCD) มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี 2 (second order or quadratic model) จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า CCD มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นที่ใช้ในการศึกษาตัวแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 แบบแผนการทดลอง CCD มีข้อดีหลายประการ ดังนี้ มีความเหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 กรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k (full factorial) และแผนการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน ในการออกแบบแผนการทดลองนี้ กำหนดให้มีปัจจัยที่ควบคุมได้ 4 ปัจจัย ได้แก่ ผงไม้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต สารดัดแปรความทนแรงกระแทก และผงสี ตามตารางที่ 5 แสดงปัจจัยและระดับปริมาณที่สนใจ ตารางที่ 7 ร้อยละองค์ประกอบของสารเติมแต่งที่ใช้ในการศึกษาโดยโปรแกรม CCD สำหรับ 4 จำนวนการทดลอง 30 การทดลองจากจำนวนการทดลองทั้งหมด 625 การทดลอง โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ผงไม้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต สารดัดแปรความทนแรงกระแทก และผงสี

ผงไม้ จัดเป็นฟังก์ชันนอลฟิลเลอร์ (functional fillers) หรือ แอคทีฟฟิลเลอร์ คือ สารตัวเติมที่ทำการผสมกับพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ เป็นหลัก จะเรียกสารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ว่า สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers or reinforcement) ผงไม้ เป็นสารตัวเติมที่ได้จากการนำขี้เลื่อย เศษไม้หรือไม้แผ่นบางๆ มาทำการบดให้เป็นผงมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 40 ถึง 140 เมช การนำผงไม้มาเติมเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์จะทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ลดต้นทุนในการผลิต (Mantia and Morreale, 2011) สามารถใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ได้หลากหลาย เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน อะคริไลไนไตรล์ บิวตะไดอิน สไตรีนเทอร์พอลิเมอร์ และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Leu et al, 2012)

ฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2-ไฮโดรเจน-เบนโซไทโรอะซีน-2-อิล)-4-(1,1,3,3-เททระเมทิลบิวทิล) เป็นสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่ป้องกันการสลายตัวด้วยแสงอัลตราไวโอเลต โดยจะทำการดูดซับรังสีในช่วงคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตหรือสสารยูวี แล้วปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าหรือมีพลังงานที่ต่ำกว่าออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้แสงอัลตราไวโอเลตไม่สามารถทำอันตรายต่อเนื้อพลาสติกได้

คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน เป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทก เตรียมได้จากกรรมวิธีคลอรีเนชันโดยการเติมคลอรีนเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนในสายโซ่พอลิเอทิลีน และได้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลพลอยได้ เกรดที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทกให้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ จะมีปริมาณคลอรีนประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ การใช้คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีนเป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทกจะช่วยดูดซับพลังงานในการกระแทก เพิ่มความเหนียว นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้กับ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Zhang et al, 2010)

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นผงสีขาวที่สุดและทึบแสงที่สุดได้จากแร่ซิลิเกต ซึ่งมีอยู่มากในนอร์เวย์ รัสเซีย และรัฐแคลิฟอร์เนีย ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีน้ำอยู่ด้วยจะมีโครงสร้างแบบออสถึฐาน เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างแบบออสถึฐานเป็นผลึกออกไซด์ สามารถเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ได้จาก กรรมวิธีคลอไรด์ ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นผงสีที่เสถียรมาก ไม่ว่องไวต่อสารเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่เหลืองคล้ำ และมีความคงทนต่อแสง

ตารางที่ 7 ร้อยละองค์ประกอบของสารเติมแต่งที่ใช้ในการศึกษาโดย CCD สำหรับ 4 ปัจจัย

สูตร	ระดับปริมาณที่สนใจ			
	ผงไม้	สารดูดซับแสงยูวี	สารดัดแปรความทนแรงกระแทก	ผงสี
1	20.0%	5.0%	3.0%	0.3%
2	25.0%	1.0%	5.0%	0.5%
3	30.0%	5.0%	3.0%	0.7%
4	20.0%	0.5%	3.0%	0.7%
5	30.0%	0.5%	7.0%	0.7%
6	30.0%	5.0%	7.0%	0.3%
7	25.0%	1.0%	5.0%	0.5%
8	20.0%	5.0%	7.0%	0.7%
9	30.0%	0.5%	3.0%	0.3%
10	20.0%	0.5%	7.0%	0.3%
11	25.0%	1.0%	5.0%	0.5%
12	20.0%	5.0%	7.0%	0.3%
13	20.0%	0.5%	3.0%	0.3%
14	30.0%	5.0%	3.0%	0.3%
15	30.0%	0.5%	3.0%	0.7%
16	25.0%	1.0%	5.0%	0.5%
17	30.0%	5.0%	7.0%	0.7%
18	20.0%	5.0%	3.0%	0.7%
19	20.0%	0.5%	7.0%	0.7%
20	30.0%	0.5%	7.0%	0.3%
21	25.0%	10.0%	5.0%	0.5%
22	25.0%	1.0%	10.0%	0.5%
23	35.0%	1.0%	5.0%	0.5%
24	25.0%	1.0%	5.0%	1.0%
25	25.0%	1.0%	5.0%	0.1%
26	15.0%	1.0%	5.0%	0.5%
27	25.0%	0.0%	5.0%	0.5%
28	25.0%	1.0%	1.0%	0.5%
29	25.0%	1.0%	5.0%	0.5%
30	25.0%	1.0%	5.0%	0.5%

2. สมบัติทางกายภาพของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

การประยุกต์ใช้งานแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อเป็นแท่นรองสินค้าสมบัติทางกายภาพหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ ความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปเป็นแท่นรองสินค้า ซึ่งความหนาแน่น หมายถึง ค่ามวลต่อปริมาตรของวัสดุ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยถ้าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าต่ำ ส่งผลให้มีน้ำหนักเบา และเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปเป็นแท่นรองสินค้า เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบาจะทำให้สะดวกต่อการขนส่งและเคลื่อนย้าย ตารางที่ 8 แสดงค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ทำการเติมสารเติมแต่งที่สนใจในการศึกษาโดยมีปริมาณที่แตกต่างกันตามการออกแบบแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม CCD ค่าที่รายงานได้แก่ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่น โดยสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดคือ 1.0789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเติมผงไม้ลงในสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าความหนาแน่นที่ลดต่ำลง เพราะผงไม้ ที่ใช้มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.9881 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของพอลิไวนิลคลอไรด์ (ความหนาแน่นของพอลิไวนิลคลอไรด์เท่ากับ 1.3500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตารางที่ 8 ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สูตร	ค่าความหนาแน่น	สูตร	ค่าความหนาแน่น
1	1.2720±0.0212	16	1.3455±0.0615
2	1.3200±0.1237	17	1.2106±0.0709
3	1.3547±0.0349	18	1.4546±0.0533
4	1.2286±0.0272	19	-
5	1.3608±0.0388	20	1.3595±0.0138
6	1.2264±0.0588	21	1.1998±0.0265
7	1.3652±0.1135	22	1.1425±0.0078
8	1.0974±0.0390	23	1.2633±0.0118
9	1.2212±0.0386	24	1.2274±0.0078
10	1.3760±0.0409	25	1.2152±0.0273
11	1.3235±0.1038	26	1.5278±0.0493
12	1.1503±0.0310	27	1.4225±0.0203
13	-	28	1.3581±0.0122
14	1.3163±0.0250	29	1.3304±0.0854
15	1.0789±0.0397	30	1.3036±0.1408

หมายเหตุ สูตรผสมที่ 13 และ 19 ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้

3. สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบมีความสำคัญต่อการใช้งาน เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในรูปแบบใด ผลิตรถยนต์ยี่ห้อที่จะต้องมีการรับแรงกระทำไม่มากนักน้อย ซึ่งการที่ผู้ออกแบบทราบถึงสมบัติเชิงกล จะช่วยให้สามารถออกแบบวัสดุเชิงประกอบได้อย่างถูกต้องและเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม ปลอดภัย การทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การตรวจวัดสมบัติของวัสดุในการรับภาระหรือแรงกระทำในลักษณะต่างๆ เชิงปริมาณ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้เพื่อประโยชน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตรถยนต์นั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบคุณภาพ การเปรียบเทียบ หรือการจัดลำดับ จุดประสงค์ของการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ 1) เพื่อพิสูจน์แนวความคิดในการออกแบบและเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบผลิตรถยนต์ 2) เพื่อยืนยันถึงความปลอดภัยในการใช้งาน 3) เพื่อความคุ้มค่าคุณภาพ 4) เพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของ

กระบวนการผลิต 5) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบและเลือกวัสดุ 6) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำนายประสิทธิภาพในการใช้งาน 7) เพื่อเป็นข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาวัสดุใหม่

การศึกษาความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถทำได้โดยการให้แรงกระทำแก่วัสดุ จากนั้นจะทำการวัดการตอบสนองของวัสดุในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากการอยู่ภายใต้ขนาดของแรงกระทำ ลักษณะการให้แรงกระทำต่อแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ในการทดสอบนี้ จะเป็นลักษณะการดัดโค้ง ซึ่งเรียกการทดสอบนี้ว่า การทดสอบการดัดโค้ง (flexural or bending test) การทดสอบการดัดโค้งเป็นการศึกษาความเค้นและความเครียดที่มีอัตราเร็วในการให้แรงคงที่ จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790-07 ตัดแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ผ่านการอัดรีดให้มีขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 127 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการกด 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกดที่ให้แรงกระทำมีน้ำหนัก 5 กิโลนิวตัน ระบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ 3 จุด มีการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากัน หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมนเพื่อเป็นการลดความเข้มของความเค้นที่อาจเกิดขึ้นได้บริเวณจุดสัมผัส ส่งผลให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักในบริเวณนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบชื่อเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Instron 5965 ค่าที่รายงานได้แก่ ค่าความเค้นสูงสุดของการดัดโค้ง หน่วยเมกะปาสคาล ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้ง หน่วยเปอร์เซ็นต์ ค่ามอดุลัสการดัดโค้ง หน่วยเมกะปาสคาล และค่าน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้ง หน่วยนิวตัน

การทดสอบความทนแรงกระแทกเป็นการทดสอบวัสดุภายใต้ความเค้นหรือแรงที่ส่งผ่านมายังชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วที่สูงมาก วิธีการทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบไอซอด (izod) ชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดให้อยู่ในแนวตั้งลักษณะของคานยื่น (cantilever) การทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 ตัดขนาดชิ้นทดสอบให้มีขนาดกว้าง 12.5 มิลลิเมตร ยาว 65 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร พลังงานที่ใช้ในการกระแทก 5.5 จูลส์ อัตราเร็วในการกระแทก 3.46 เมตรต่อวินาที รอยบากจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ขนาดของมุมของรอยบากจะทำมุม 45 องศา การทำรอยบากเพื่อใช้ในการกำหนดให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักในบริเวณรอยบาก ไม่เกิดการแตกหักบริเวณจับยึด นอกจากนั้นรอยบากเป็นการจำลองสภาพการใช้งานจริง เพราะผลิตภัณฑ์ในสภาพการใช้งานจริงจะมีจุดที่มีความเค้นสูงจนเป็นจุดบกพร่อง ทำให้ค่าความทนแรงกระแทกที่

ได้มีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริง การรายงานจะเป็นค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หลังของ รอยบากตามสมการ

$$\text{ความต้านทานต่อแรงกระทำ (จูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร)} = \frac{\text{พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูลส์)}}{\text{พื้นที่บริเวณหลังรอยบาก (มม²)}}$$

สมบัติการดัดโค้งและสมบัติการกระแทกของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ ผงไม้ทั้ง 30 สูตรเป็นไปตามตารางที่ 9

พิจารณาสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ทั้ง 30 สูตร เพื่อนำไป ประยุกต์ใช้เป็นแท่นรองสินค้า พบว่าสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 ที่มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระทำ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าสมบัติเชิงกลที่สามารถยอมรับได้ มีค่าสมบัติการดัดโค้งและความทน แรงกระทำ มีค่าอยู่ในระดับที่สูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Leu *et al.* (2012) ซึ่งพบว่าการเติม ปริมาณผงไม้ 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมลงในองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้ค่าความทน แรงดัดโค้งมีค่าที่สูงขึ้น การเติมปริมาณผงไม้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความทนแรง ดัดโค้งมีค่าที่ลดลง ปริมาณผงไม้ 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมลงในองค์ประกอบหลัก ช่วยให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ปริมาณผงไม้ที่ มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลต่อความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของผงไม้กับองค์ประกอบ หลักทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าที่ลดลง นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2010) คลอริเนเตดพอลิเอทิลีน เป็นสารดัดแปรความทนแรงกระทำ ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความ เหนียวเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีค่าความทนแรงกระทำเพิ่มสูงขึ้น ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าที่ลดลง

ตารางที่ 9 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สูตร	สมบัติการดัดโค้ง			สมบัติการกระแทก	
	ความเค้น (เมกะ ปาสคาล)	ความเครียด (เปอร์เซ็นต์)	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	น้ำหนักการ ดัดโค้ง (นิว ตัน)	ความทนแรงกระทำ (จูลส์/ตาราง มิลลิเมตร)
1	61.61±4.90	3.84±0.58	2100.49±113.40	938.86±74.62	2020.00±192.35
2	27.88±4.16	3.90±0.51	1300.18±101.73	424.27±62.56	1760.00±54.77
3	46.03±5.84	4.85±0.54	2063.20±230.41	701.48±88.93	1620.00±164.32

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สูตร	สมบัติการตัดโค้ง				สมบัติการกระแทก
	ความเค้น (เมกะ ปาสคาล)	ความเครียด (เปอร์เซ็นต์)	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	น้ำหนักการ ตัดโค้ง (นิวตัน)	ความทนแรง กระแทก (จูลส์/ตาราง มิลลิเมตร)
4	61.20±10.22	4.67±0.56	2575.78±329.02	932.55±155.69	1940.00±492.95
5	43.27±1.15	5.55±0.23	1812.47±17.82	668.04±26.05	2080.00±109.54
6	45.83±3.34	4.99±0.14	1980.91±81.03	680.06±33.86	1560.00±54.77
7	29.28±2.88	3.80±0.39	1287.36±165.80	411.56±53.31	1740.00±89.44
8	51.72±0.75	3.59±0.05	2374.90±31.20	806.46±18.84	1940.00±219.09
9	47.33±2.34	6.78±0.16	1806.83±78.18	700.17±38.79	1800.00±244.95
10	37.13±2.66	3.81±0.46	1450.84±138.07	565.79±40.54	2300.00±100.00
11	28.19±2.01	3.87±0.38	1297.71±96.73	427.71±43.20	1660.00±207.36
12	25.43±0.71	5.40±0.29	971.73±36.83	390.12±12.83	1180.00±109.54
13	-	-	-	-	-
14	53.46±4.99	3.96±0.24	2364.05±117.32	831.09±43.68	1360.00±54.77
15	59.63±1.37	5.28±0.24	2455.79±108.37	929.05±33.24	2320.00±327.11
16	28.83±1.67	3.81±0.42	1303.00±101.08	438.75±75.04	1700.00±187.08
17	24.27±0.53	4.45±0.05	1046.10±36.71	369.83±7.72	1460.00±54.77
18	59.46±3.79	4.06±0.51	2477.29±169.00	886.05±76.66	1488.00±75.63
19	-	-	-	-	-
20	46.34±3.18	5.15±0.60	1916.35±60.63	714.76±31.72	2060.00±151.66
21	29.17±1.87	6.22±0.31	1268.15±54.68	444.52±28.55	1500.00±70.71
22	38.33±1.54	5.53±0.22	1350.84±21.36	583.66±24.12	2220.00±277.49
23	37.24±1.63	3.68±0.13	1674.20±80.59	553.01±17.48	2040.00±134.16
24	42.71±2.05	5.20±0.19	1661.68±66.87	661.02±8.50	2080.00±130.38
25	41.62±1.90	5.66±0.39	1567.84±22.16	634.19±28.96	1920.00±249.00
26	34.19±2.19	6.62±0.58	1236.70±41.09	542.93±28.31	2280.00±178.89
27	42.23±1.69	3.70±0.18	2067.11±174.07	663.58±39.23	2040.00±219.09
28	49.82±5.92	3.79±0.21	2173.12±78.06	759.21±90.23	1960.00±415.93
29	31.80±0.70	3.84±0.16	1287.04±59.22	431.17±48.75	1630.00±228.04
30	29.67±2.28	3.97±0.17	1309.70±65.93	429.55±25.83	1760.00±89.44

จากผลการทดลองสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ทั้ง 30 สูตร ได้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน เพราะสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีระดับปริมาณของสารเติมต่างแตกต่างกัน สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 เป็นสูตรของโรงงานอุตสาหกรรม มีองค์ประกอบของผงไม้ 25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.3200 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้ง 27.88 เมกะปาสคาล และค่าความทนแรงกระแทก 1,760.00 จูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 กับสูตรผสมอื่นเพื่อทำการหาสูตรผสมที่เหมาะสม มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำ และสมบัติเชิงกลสามารถยอมรับได้ พบว่า สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.0789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้ง 59.63 เมกะปาสคาล และค่าความทนแรงกระแทก 2,322.00 จูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร เป็นสูตรที่มีสมบัติทางกายภาพสมบัติเชิงกลเป็นที่ยอมรับได้ก่อนเข้าภาวะเร่ง

ดังนั้น การทดสอบเสถียรภาพทางแสงทำการเลือกทดสอบ 2 สูตรเพื่อทำการเปรียบเทียบ ได้แก่ สูตรที่ 2 เป็นสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ของโรงงานอุตสาหกรรม สูตรที่ 15 เป็นสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่มีสมบัติทางกายภาพสมบัติเชิงกลเป็นที่ยอมรับได้ก่อนเข้าภาวะเร่ง

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การสรุปข้อมูล และการนำเสนอผลการสรุป หรือการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อนำผลสรุปไปใช้ในการตัดสินใจด้านต่างๆ สถิติ คือ ตัวเลขที่แสดงลักษณะที่สำคัญของชุดข้อมูลหนึ่งๆ (กัลยา, 2554) เช่น ค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ค่าความเค้นสูงสุดในการตัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ หรือปริมาณของสารเติมแต่งทั้งหมดที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการผสมของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ในงานวิจัยผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 ศึกษาปัจจัยของสารเติมแต่ง (ผงไม้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต สารดัดแปรความทนแรงกระแทก และผงสี) แต่ละประเภทที่มีผลต่อความหนาแน่น ค่าความเค้นสูงสุดในการตัดโค้ง ค่าความเครียดสูงสุดในการตัดโค้ง ค่ามอดุลัสการตัดโค้ง ค่าน้ำหนักสูงสุดในการตัดโค้ง และค่าความทนแรงกระแทกของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ปริมาณ สารเติมแต่งแตกต่างกันในแต่ละสูตร ตามภาพที่ 8

ส่วนที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเค้นสูงสุดในการตัดโค้ง ค่าความเครียดสูงสุดในการตัดโค้ง ค่ามอดุลัสการตัดโค้ง ค่าน้ำหนักสูงสุดในการตัดโค้ง ตามภาพที่ 9 ถึง 14

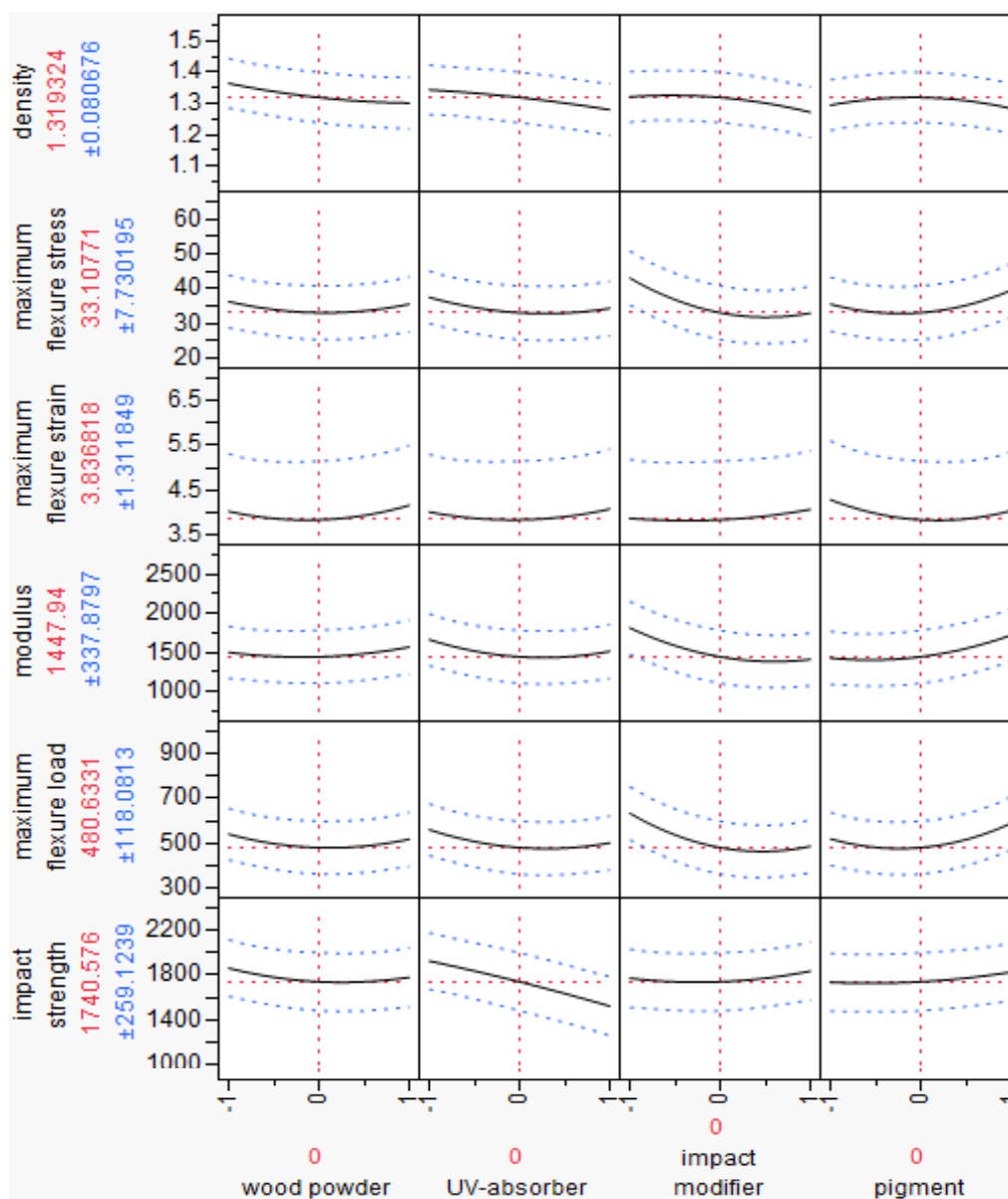
ส่วนที่ 3 สมการประเมินค่า สร้างสมการประเมินค่าจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัว ประกอบด้วย ปริมาณผงไม้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทกเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณผงสีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามตารางที่ 14

4.1 อิทธิพลของสารเติมแต่งหนึ่งปัจจัย

งานวิจัยผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้า ให้ความสนใจกับสารเติมแต่ง 4 ประเภท แบ่งตามหน้าที่หลักได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ผงไม้ และสารดัดแปรความทนแรงกระแทก กลุ่มที่ 2 สารเติมแต่งที่ปรับปรุงสมบัติทางเคมี ได้แก่ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต และกลุ่มที่ 3 สารเติมแต่งเพื่อความสวยงาม ได้แก่ ผงสี สารเติมแต่งบางประเภทสามารถทำหน้าที่รองได้ เช่น การเติมไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีสีขาว ไททาเนียมนอกจากทำหน้าที่หนักเป็นผงสี ยังเป็นสารช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางแสงให้กับแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

ปริมาณของสารเติมแต่งที่เติมในสูตรผสมทั้ง 30 สูตรมีอิทธิพลต่อความหนาแน่น ค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้ง (ค่าความทนแรงดัดโค้ง) ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้ง ค่ามอดุลัสการดัดโค้ง ค่าน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้ง และค่าความทนแรงกระแทกที่แตกต่างกัน ทำการวิเคราะห์ข้อมูลได้ผลการทดสอบตามภาพที่ 8 ปัจจัยสารเติมแต่งต่อสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ผงไม้มีผลต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นในสูตรผสมทำให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าที่ต่ำ เพราะผงไม้ที่เติมมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ สารดัดแปรความทนแรงกระแทกจะมีผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง การเติมสารดัดแปรความทนแรงกระแทกปริมาณที่สูง ทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำอาจเกิดจากการไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับองค์ประกอบหลักและให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีความนิ่มที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งเพิ่มสูงเมื่อปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทกสูง เพราะสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่เติมลงในสูตรผสมจะมีความนิ่ม ส่งผลให้มีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามทิศทางของแรงที่กระทำหรือค่าความเครียดสูงขึ้น ค่ามอดุลัสการดัดโค้งมีค่าที่ต่ำลง เมื่อเติมสารดัดแปรความทนแรงกระแทกปริมาณที่สูง อธิบายได้จากความสัมพันธ์มอดุลัสเท่ากับค่าความเค้นต่อความเครียด เมื่อเติมสารดัดแปรความทนแรงกระแทกทำให้ค่าความเครียดมีค่าที่สูงขึ้น ค่าความเค้นต่ำลง ค่ามอดุลัสที่เกิดขึ้นจึงมีค่าที่ต่ำ (Xu *et al*, 2008)

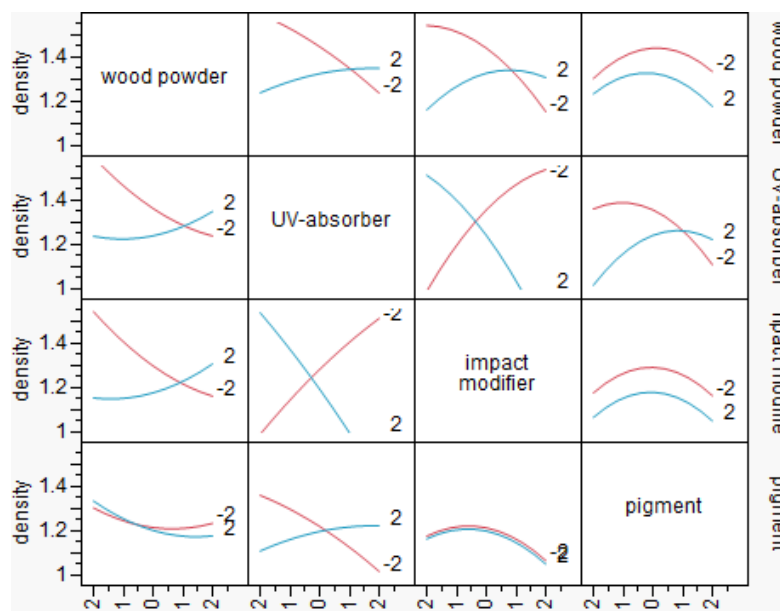
ความทนแรงกระแทกมีค่าที่ต่ำเมื่อเติมสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตปริมาณที่สูง เพราะสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต คือ ฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2-ไฮโดรเจน-เบนโซไทโรอะซีน-2-อิล)-4-(1,1,3,3-เททระเมทิลบิวทิล) มีลักษณะเป็นของแข็ง เมื่อได้รับแรงกระทำที่มีอัตราเร็วที่สูง (การกระแทก) ทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม การเติมสารดัดแปรความทนแรงกระแทกปริมาณที่สูงทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีความนิ่มเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้สูง ส่งผลให้มีค่าความทนแรงกระแทกที่สูง



ภาพที่ 8 ปัจจัยสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

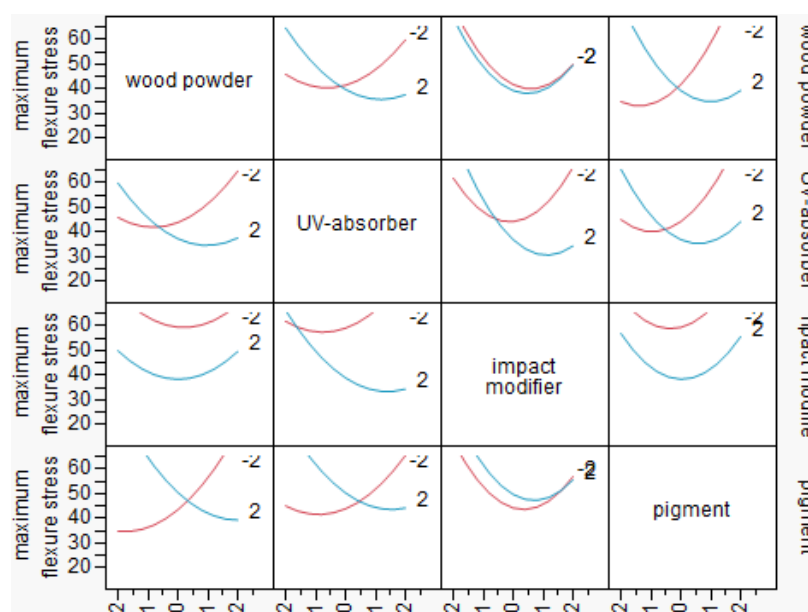
4.2 อิทธิพลของสารเติมแต่งสองปัจจัย

สารเติมแต่งที่เป็นองค์ประกอบในสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ มีปริมาณสารเติมแต่งที่แตกต่างกันในแต่ละประเภท ปริมาณผงไม้อยู่ในช่วง 15.0 ถึง 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตอยู่ในช่วง 0.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทกอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 7.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณผงสีอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระดับปริมาณที่สนใจแบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือ -2, -1, 0, 1 และ 2 ตารางแสดงค่าตามตารางที่ 5 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาอันตรกิริยาระหว่างสารเติมแต่งแต่ละประเภทที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล การเกิดอันตรกิริยาสังเกตจากเส้นกราฟ 2 เส้น (ระดับปริมาณ -2 และ 2) ที่เกิดจุดตัดระหว่างกันบนกราฟ

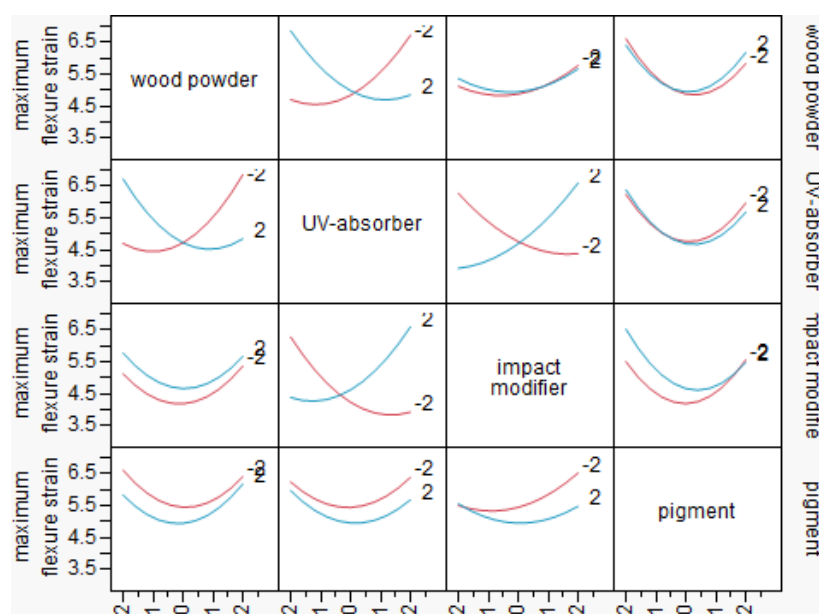


ภาพที่ 9 อันตรกิริยาสองปัจจัยต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

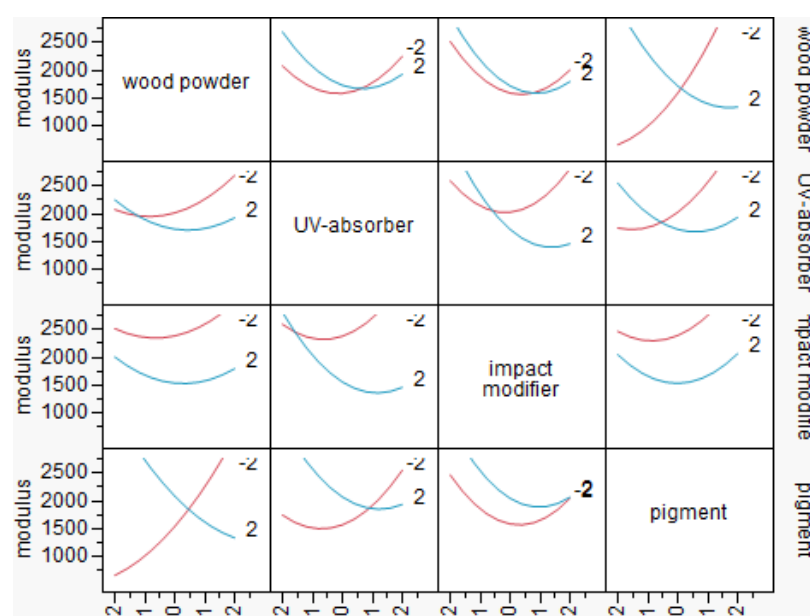
สมบัติทางกายภาพที่ศึกษาอันตรกิริยาของปัจจัย ได้แก่ ความหนาแน่น ภาพที่ 9 อันตรกิริยาของปัจจัยต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ พบว่า อันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต อันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับสารดัดแปร ความทนแรงกระแทก เกิดขึ้นที่ระดับปริมาณที่สูง ส่งผลต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ที่ระดับปริมาณที่ 0 จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสง อัลตราไวโอเล็ตกับผงสีส่งผลต่อความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ อันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับผงสี และอันตรกิริยาระหว่างสารดัดแปรความทนแรงกระแทกกับ ผงสี ไม่เกิดขึ้น



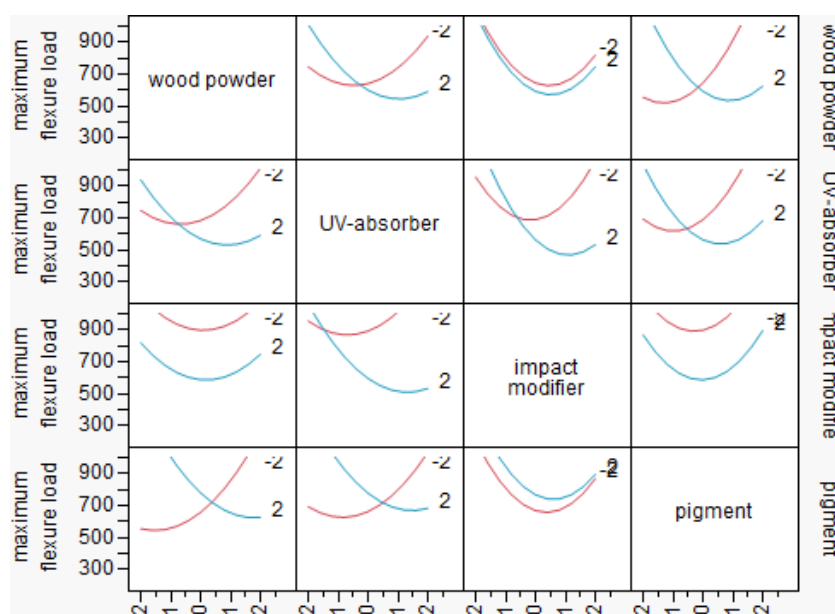
ภาพที่ 10 อันตรกิริยาของปัจจัยต่อความเค้นดัดโค้งสูงสุดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้



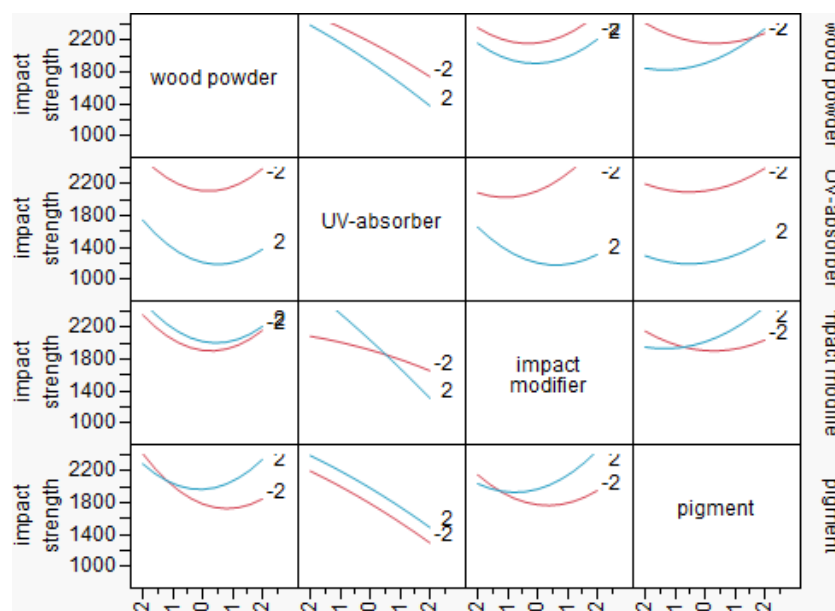
ภาพที่ 11 อันตรกิริยาสองปัจจัยต่อความเครียดดัดโค้งสูงสุดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้



ภาพที่ 12 อันตรกิริยาสองปัจจัยต่อมอดุลัสการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้



ภาพที่ 13 อันตรกิริยาสองปัจจัยต่อน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้



ภาพที่ 14 อันตรกิริยาสองปัจจัยต่อความทนแรงกระแทกของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

อันตรกิริยาของสารเติมแต่งที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้แสดงตามภาพที่ 10 ถึง 14 ตัวอย่างอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น อันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ระดับปริมาณที่ 0 ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับผงสี ที่ระดับปริมาณที่ต่ำเกิดอันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต และอันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก อันตรกิริยาไม่เกิดขึ้นระหว่างผงไม้กับ สารดัดแปรความทนแรงกระแทก และสารดัดแปรความทนแรงกระแทกกับผงสี

ที่ระดับปริมาณที่ 0 เกิดอันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่งผลต่อค่าความเครียดดัดโค้งสูงสุดของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ที่ระดับปริมาณที่ต่ำเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก อันตรกิริยาไม่เกิดขึ้นระหว่างผงไม้กับผงสี

อันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับผงสีที่มีผลต่อค่ามอดุลัสการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เกิดที่ระดับปริมาณที่ 0 ที่ระดับปริมาณที่ต่ำเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก อันตรกิริยาไม่เกิดขึ้นระหว่างสารดัดแปรความทนแรงกระแทกกับผงสี

ที่ระดับปริมาณที่ต่ำเกิดอันตรกิริยาระหว่างผงไม้กับสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่งผลต่อน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ และ อันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก อันตรกิริยาไม่เกิดขึ้นระหว่างผงไม้กับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก และสารดัดแปรความทนแรงกระแทกกับผงสี

อันตรกิริยาระหว่างสารดัดแปรความทนแรงกระแทกกับผงสีที่มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทกของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เกิดขึ้นที่ระดับปริมาณที่ต่ำ

4.3 สมการประเมินค่า

สมการประเมินค่า จะสร้างโดยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวแปร โดยประกอบด้วย

ตัวแปรตาม (dependent Variable) 1 ตัว ต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ซึ่งหมายถึง ตัวแปรสเกลแบบช่วง (interval scale) หรือ สเกลอัตราส่วน (ratio scale) งานวิจัยผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้าตัวแปรตาม ได้แก่ ความหนาแน่นหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเค้นสูงสุดในการดัดโค้งหน่วยเมกะปาสคาลความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งหน่วยเปอร์เซ็นต์ มอดูลัสการดัดโค้งหน่วยเมกะปาสคาลน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้งหน่วยนิวตัน และความทนแรงกระแทกหน่วยจูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร

ตัวแปรอิสระ (independent Variables) หรือตัวแปรต้นเหตุ จำนวน k ตัว ($k \geq 2$) โดยตัวแปรอิสระทั้ง k ตัวหรือมีตัวแปรบางตัวเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ และตัวแปรบางตัวเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มหรือตัวแปรเชิงคุณภาพงานวิจัยผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับแท่นรองสินค้าจะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณทั้งหมด ได้แก่ ปริมาณผงไม้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทกเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณผงสีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โดยทั่วไปกำหนดให้ Y เป็นตัวแปรตามซึ่งเป็นตัวแปรตามเชิงปริมาณ และกำหนดให้ $X_1, X_2, \dots, X_k$ เป็นตัวแปรอิสระ $k \geq 2$ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่ Y และ $X_1, X_2, \dots, X_k$ มีความสัมพันธ์ในรูปเชิงเส้นตามสมการที่ 6

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (6)$$

กำหนดให้ e คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

β_0 คือ ส่วนตัดแกน Y เมื่อ $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$

$\beta_1, \dots, \beta_k$ คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (partial regression coefficient)

การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรจากสมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ k ตัวคือ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e$ การใช้ตัวอย่างขนาด n ในการประมาณค่า $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ด้วย $a, b_1, b_2, \dots, b_k$ ตามลำดับ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จากการประมาณค่า β_i ด้วย b_i และประมาณค่า β_0 ด้วย a ทำให้สมการความถดถอยเชิงพหุเป็น $\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k$ โดยที่ $\hat{Y}$ = ค่าประมาณหรือค่าพยากรณ์ของตัวแปรของ Y ค่า $e = Y - \hat{Y}$ = ค่าคลาดเคลื่อนหรือความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าพยากรณ์การประมาณ β_i ด้วย b_i และประมาณ β_0 ด้วย a จะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least Square Method) ซึ่งเป็นการหาค่า $a, b_1, b_2, \dots, b_k$ ที่ทำให้ $\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ มีค่าต่ำสุด

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุทำให้ทราบว่าปัจจัยหรือตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่ส่งผลหรือมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม และทำนายหรือประมาณค่าของตัวแปรตาม เมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระ ผลการวิเคราะห์เป็นไปตามตารางที่ 10 สมการถดถอยทำนายสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้จากสมการถดถอยทำนายสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ในตารางที่ 10 สูตรที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีเทียบกับรหัสปริมาณของสารเติมแต่งที่กำหนดไว้ สูตรที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้เท่ากับ 1 สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ -1 สารดัดแปรความทนแรงกระแทกเท่ากับ -1 และผงสีเท่ากับ 1 จากการคำนวณจะได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.0789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กำหนดสูตรตัวอย่าง มีองค์ประกอบของผงไม้เท่ากับ 2 สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ -1 สารดัดแปรความทนแรงกระแทกเท่ากับ -1 และผงสีเท่ากับ 1 แทนค่าในสมการสมการถดถอยทำนายค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิล-คลอไรด์/ผงไม้ในตารางที่ 10 ได้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่น} = & 1.33 - 0.03(2) - 0.03(-1) - 0.02(-1) - 0.01(1) + (2^* - 1^* \cdot 0.03) + (2^* - 1^* \cdot 0.03) + (-1^* - 1^* \cdot \\ & 0.08) + (2^* - 0.01) + (-1^* \cdot 1^* \cdot 0.03) + (-1^* - 0.0002) + (2^* \cdot 2^* \cdot 0.01) + (-1^* - 1^* \cdot 0.008) + \\ & (-1^* - 1^* \cdot 0.02) + (1^* \cdot 1^* \cdot 0.03) \end{aligned}$$

ค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ของสูตรตัวอย่างได้ค่าเท่ากับ 1.0582 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบสูตรที่ 15 กับสูตรตัวอย่างพบว่า องค์ประกอบของสารเติมแต่งมีปริมาณที่เท่ากัน ยกเว้นผงไม้ ในสูตรที่ 15 มีการเติมผงไม้รหัสปริมาณการเติมเท่ากับ 1 สูตรตัวอย่างมีการเติมผงไม้ รหัสปริมาณการเติมเท่ากับ 2 สังเกตได้ว่าการเติมปริมาณผงไม้ที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าที่ลดต่ำลงสอดคล้องกับผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นที่ผ่านมา

ตัวอย่างการใช้สมการสมการถดถอยทำนายค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ สามารถอธิบายอิทธิพลของตัวแปร 2 ตัวแปรที่เกิดขึ้นส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ คือ อันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก ในภาพที่ 9 การเกิดอันตรกิริยาของสารทั้งสองมีนัยสำคัญต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มากที่สุดสังเกตจากค่าคงที่ที่เกิดขึ้นในพจน์ของอันตรกิริยาระหว่างสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทก อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในระดับของสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่ปริมาณที่สูง เช่น การเติมสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ปริมาณรหัส 2 กับสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่ปริมาณรหัส 2 จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดต่ำลงเป็นไปในทิศทางเดียวกับ การเติมสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่ปริมาณที่ต่ำ เช่น การเติมสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ปริมาณรหัส -2 กับสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่ปริมาณรหัส -2 จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดต่ำลง การเติมสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตกับสารดัดแปรความทนแรงกระแทกที่ปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ตัวแปรหนึ่งสูง อีกตัวแปรหนึ่งต่ำ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าที่สูง

ตารางที่ 10 สมการถดถอยทำนายสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สมบัติ	สมการทำนาย
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	$1.33 - 0.03(WP) - 0.03(UV) - 0.02(IM) - 0.01(PM) +$ $(WP*UV*0.03) + (WP*IM*0.03) + (UV*IM*-0.08) +$ $(WP*-0.01) + (UV*PM*0.03) + (IM*-0.0002) +$ $(WP*WP*0.01) + (UV*UV*0.008) + (IM*IM*-0.02) +$ $(PM*PM*-0.03)$
ความเค้นสูงสุดในการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)	$29.28 - 0.43(WP) - 1.64(UV) - 5.03(IM) + 1.98(PM)$ $+ (WP*UV*-2.55) + (WP*IM*0.27) + (UV*IM*-3.06)$ $+ (WP*PM*-5.31) + (UV*PM*-3.45) + (IM*PM*-0.84)$ $+ (WP*WP*2.84) + (UV*UV*2.84) + (IM*IM*4.93) + (PM*PM*$ $4.45)$
ความเครียดสูงสุดในการดัดโค้ง (เปอร์เซ็นต์)	$3.87 - 0.04(WP) + 0.00125(UV) + 0.10(IM) - 0.12(PM) +$ $(WP*UV*-0.25) + (WP*IM*-0.02) + (UV*IM*0.28) +$ $(WP*PM*0.03) + (UV*PM*-0.03) + (IM*PM*-0.07)$ $+ (WP*WP*0.26) + (UV*UV*0.22) + (IM*IM*0.14) + (PM*PM*$ $0.33)$
มอดุลัสการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)	$1,297.50 + 36.02(WP) - 72.60(UV) - 201.71(IM) +$ $145.66(PM) + (WP*UV*-58.11) + (WP*IM*-41.98) +$ $(UV*IM*-129.15) + (WP*PM*-293.08) + (UV*PM*-138.72)$ $+ (IM*PM*-55.12) + (WP*WP*90.56) + (UV*UV*143.60)$ $+ (IM*IM*167.19) + (PM*PM*130.38)$

ตารางที่ 10 (ต่อ)

สมบัติ	สมการทำนาย
น้ำหนักสูงสุดในการตัดโค้ง (นิวตัน)	$427.17 - 10.28(WP) - 28.58(UV) - 73.78(IM) + 34.62(PM)$ $+ (WP \cdot UV \cdot -38.20) + (WP \cdot IM \cdot -2.42) + (UV \cdot IM \cdot -50.15) +$ $(WP \cdot PM \cdot 80.79) + (UV \cdot PM \cdot -58.12) + (IM \cdot PM \cdot -8.99)$ $+ (WP \cdot WP \cdot 48.65) + (UV \cdot UV \cdot 50.17) + (IM \cdot IM \cdot 79.52) +$ $(PM \cdot PM \cdot 73.56)$
ความทนแรงกระแทก (จูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร)	$1,708.33 - 62.86(WP) - 223.86(UV) + 31.75(IM) + 45.75(PM)$ $+ (WP \cdot UV \cdot -14.21) + (WP \cdot IM \cdot -7.63) + (UV \cdot IM \cdot -58.63)$ $+ (WP \cdot PM \cdot 38.88) + (UV \cdot PM \cdot -0.13) + (IM \cdot PM \cdot 38.29) +$ $(WP \cdot WP \cdot 0.01) + (UV \cdot UV \cdot 0.008) + (IM \cdot IM \cdot -0.02) +$ $(PM \cdot PM \cdot -0.03)$

กำหนดให้	WP	คือ รหัสปริมาณผงไม้
	UV	คือ รหัสปริมาณสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต
	IM	คือ รหัสปริมาณสารดัดแปรความทนแรงกระแทก
	PM	คือ รหัสปริมาณผงสี

5. เสถียรภาพทางแสงของการสลายตัวทางความร้อนแผ่นวัสดุเชิงประกอบ พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนเสริมแรงในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ได้รับการยอมรับเพิ่มมากขึ้นและมีอัตราการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง ผงไม้เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความสนใจเนื่องจาก มีความหนาแน่นที่ต่ำ ราคาที่ถูก เป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างต่อเนื่อง เสื่อมสลายทางชีวภาพได้ และให้ค่าความแข็งแรงที่สูง (Jakubowicz, 2001) ทางตอนเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกาผลิตภัณฑ์ทางโครงสร้าง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ตกแต่งใช้วัสดุเชิงประกอบที่มีผงไม้เป็นส่วนเสริมแรงสูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของตลาด มีการประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานกลางแจ้งเพิ่มสูงขึ้น แสงอัลตราไวโอเลตเป็นหนึ่งในปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายบริเวณพื้นผิว เรียกว่า การเสื่อมสลายทางแสง (photodegradation) การเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ตลอดจนลักษณะปรากฏ ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อเสถียรภาพทางแสง โดยจะทำการกำหนดระยะเวลาในการทดสอบภายใต้ภาวะเร่ง 4 ระยะเวลา ได้แก่ 0 ปี 1 ปี 2 ปี และ 3 ปี แหล่งแสงภายในตู้ภาวะเร่ง (Q-UV weathering tester) ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ยูวีที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 280 วัตต์ต่อตารางเมตร คำนวณเทียบกับข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา 5 ปีตั้งแต่พุทธศักราช 2548 ถึง 2553

$$\begin{aligned}
 \text{ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลตในประเทศไทย} &= 360 \text{ เมกะจูลส์ต่อตารางเมตร} \\
 (\text{จากเมกะจูลส์} &= 10^6 \text{ วัตต์} \times \text{วินาที}) \\
 \text{ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลตในประเทศไทย} &= 360 \times 10^6 \text{ วัตต์} \times \text{วินาที ต่อ ตารางเมตร} \\
 \text{ความเข้มของหลอดยูวี} &= 280 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร} \\
 \text{1 ปีภายใต้ตู้เร่งภาวะ} &= \frac{360 \times 10^6 \text{ วัตต์} \times \text{วินาที ต่อ ตารางเมตร}}{280 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร}} \\
 &= 1.29 \times 10^6 \text{ วินาที} \\
 &= 358.33 \text{ ชั่วโมง} \\
 &= 14.93 \text{ วัน (ประมาณ 15 วัน)}
 \end{aligned}$$

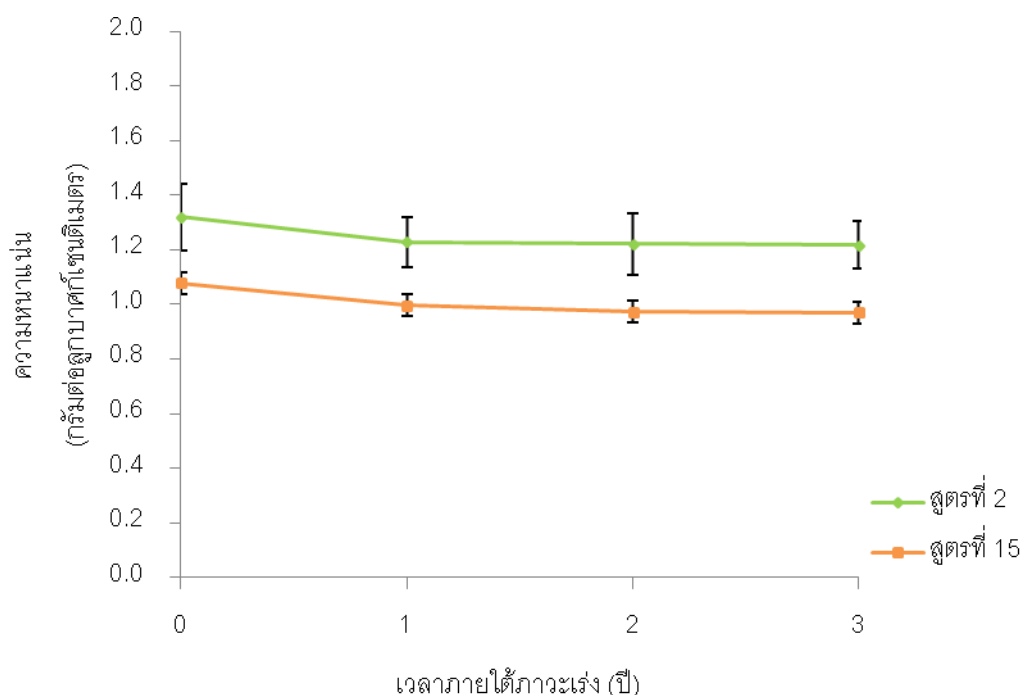
จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สรุปได้ว่า เวลา 15 วันภายใต้ตู้เร่งภาวะ เท่ากับ 1 ปี กลางแจ้ง เวลา 30 วันภายใต้ตู้เร่งภาวะ เท่ากับ 2 ปีกลางแจ้ง และเวลา 45 วันภายใต้ตู้เร่งภาวะ

เท่ากับ 3 ปีกกลางแจ้ง เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดนำแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ คือ ความหนาแน่น สี และความเงา สมบัติเชิงกล คือ ความต้านทานการดัดโค้ง และลักษณะปรากฏทางกายภาพ สูตรที่เลือกทดสอบ ได้แก่ สูตรที่ 2 เป็นสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ของโรงงานอุตสาหกรรม มีองค์ประกอบของผงไม้ 25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สูตรที่ 15 เป็นสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่มีสมบัติทางกายภาพสมบัติเชิงกลเป็นที่ยอมรับได้ก่อนเข้าภาวะเร่ง มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดัดแปรความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

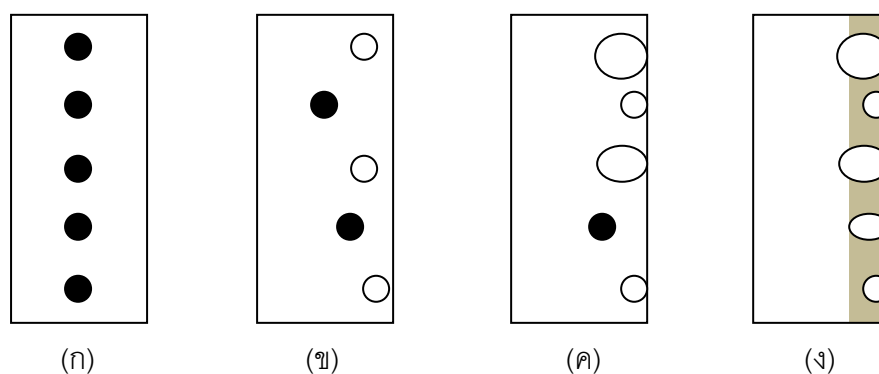
5.1.1 ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

จากภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาภายใต้ภาวะเร่ง พบว่า 1 ปี ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้สูตรที่ 2 และสูตรที่ 15 มีการลดลงอย่างชัดเจน เกิดจากการเสื่อมสลายทางแสง เริ่มต้นจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปในเรื่องพอลิไวนิลคลอไรด์เคลื่อนย้ายจากภายในเนื้อพอลิเมอร์สู่บริเวณพื้นผิวตามงานวิจัยของ Ito และ Nagai (2007) ที่ทำการศึกษากลไกการเสื่อมสลายของสารเติมแต่งภายใต้ภาวะเร่ง อธิบายว่า กลไกการเสื่อมสลายอาจเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสารเติมแต่งออกจากองค์ประกอบหลักเกิดเป็นช่องว่างบนแผ่นวัสดุเชิงประกอบ ต่อมา Garcia *et al.* (2009) อธิบายเพิ่มเติมว่า น้ำและความชื้นสามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้เกิดบริเวณช่องว่างที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี สารเติมแต่งที่หลุดออกไปเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำลงเมื่อเวลาภายใต้ภาวะเร่งเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 15 ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

กลไกการเคลื่อนย้ายสารเติมแต่งภายใต้ภาวะเร่งเป็นไปตามภาพจำลองที่ 16 จุดสีดำคือสารเติมแต่งที่เติมลงไปเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์ เริ่มต้นจาก (ก) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีเสถียรภาพสารเติมแต่งอยู่ในเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์ เมื่อเข้าสู่ภายใต้ภาวะเร่ง (ข) สารเติมแต่งบางส่วนจะเคลื่อนย้ายมาสู่บริเวณพื้นผิว บางส่วนหลุดออกจากบริเวณพื้นผิวกลายเป็นช่องว่าง (ค) ช่องว่างมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จนกลายเป็นจุดบกพร่องของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ (ง) น้ำและความชื้นเข้าไปทำปฏิกิริยาจนทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เกิดการเปลี่ยนสี



ภาพที่ 16 จำลองกลไกการเคลื่อนย้ายของสารเติมแต่งจากเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์สู่บริเวณพื้นผิว
(ก) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีเสถียรภาพ (ข) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้อยู่ภายใต้ภาวะเร่ง (ค) ช่องว่างบนแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น (ง) แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เกิดการเปลี่ยนสี

5.1.2 สีของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่งครบ 1 ปี 2 ปี และ 3 ปี ทำการวัดสีด้วยเครื่อง มิโนลตา สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น CM-310 ระบบ ซีไออี $L^*a^*b^*$ (CIE $L^*a^*b^*$) โดย L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Muasher *et al.*, 2006)

L^* มีค่าเท่ากับ 0 แสดงถึงตัวอย่างมีสีดำอย่างสมบูรณ์

L^* มีค่าเท่ากับ 100 แสดงถึงตัวอย่างมีสีขาวอย่างสมบูรณ์

a^* ใช้กำหนดค่าสีแดง หรือ สีเขียว

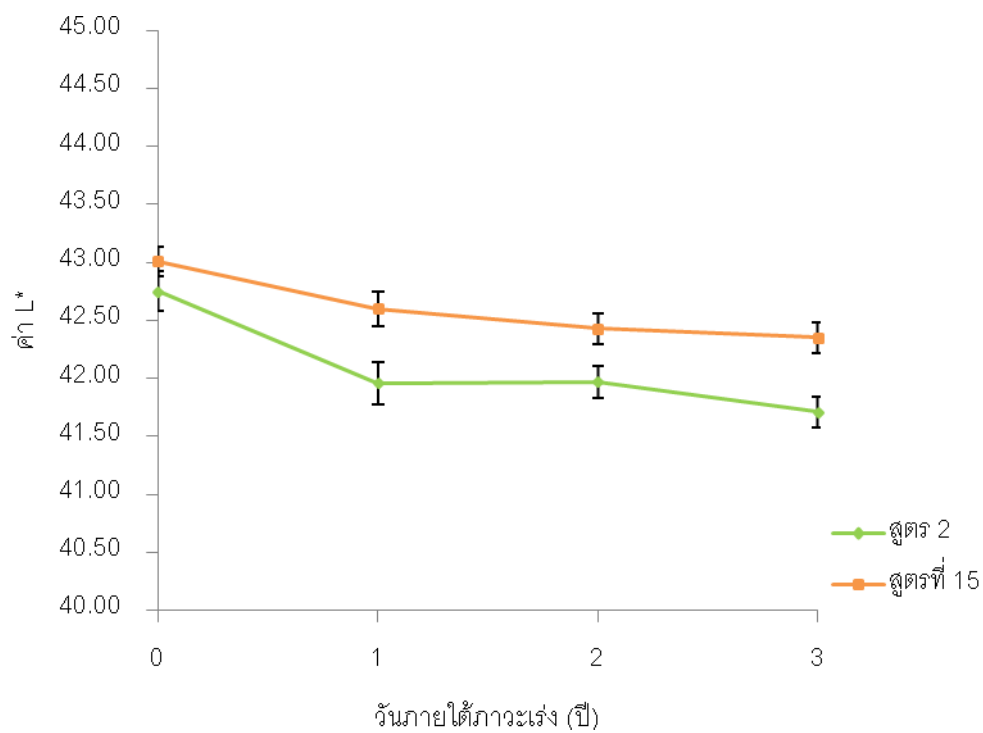
a^* มีค่า เป็นบวก แสดงถึงตัวอย่างสีจะไปทิศทางสีแดง

a^* มีค่า เป็นลบ แสดงถึงตัวอย่างสีจะไปทิศทางสีเขียว

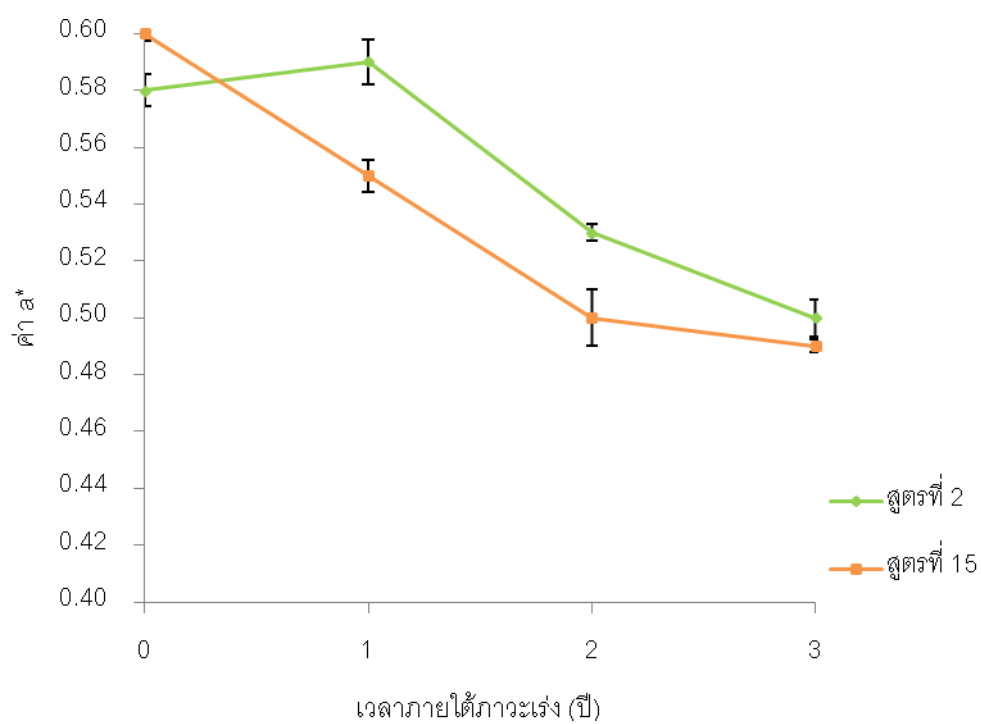
b^* ใช้กำหนดค่าสีเหลือง หรือ สีนํ้าเงิน

b^* มีค่า เป็นบวก แสดงถึงตัวอย่างสีจะไปทิศทางสีเหลือง

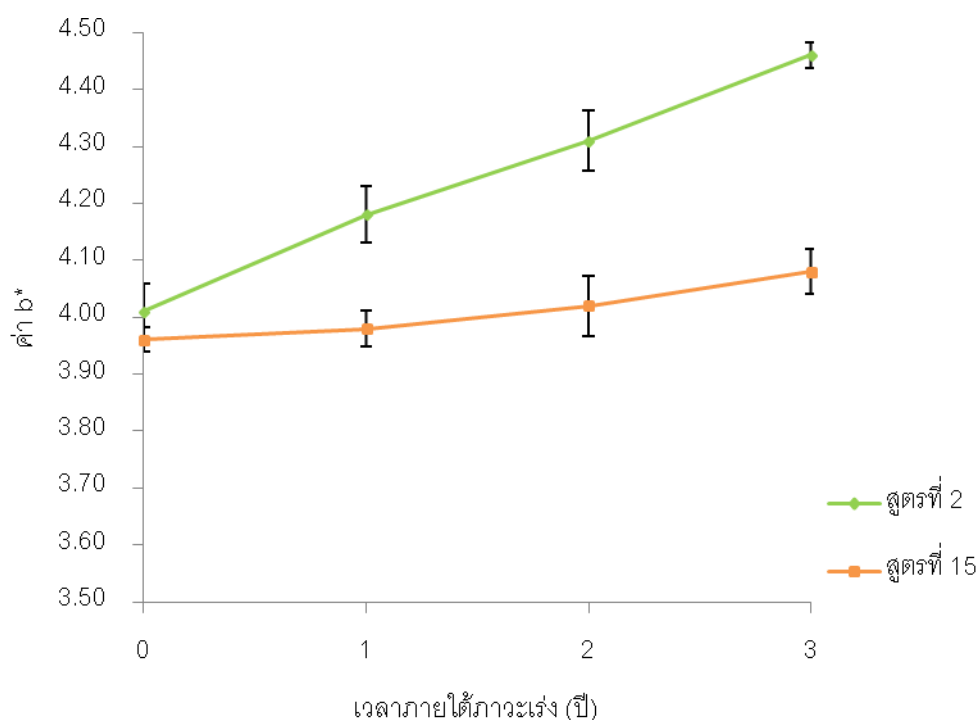
b^* มีค่า เป็นลบ แสดงถึงตัวอย่างสีจะไปทิศทางสีนํ้าเงิน



ภาพที่ 17 ค่า L^* ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง



ภาพที่ 18 ค่า a^* ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง



ภาพที่ 19 ค่า b^* ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

จากภาพที่ 17 ค่า L^* สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 และ 15 มีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับค่า a^* ตามภาพที่ 18 ในทางตรงข้าม ค่า b^* มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นตามภาพที่ 19 จากข้อมูล แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Raghi *et al.* (2000) ที่ทำการศึกษาความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมของพอลิไวนิลคลอไรด์ การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นภายใต้ภาวะเร่ง แสงอัลตราไวโอเลต ออกซิเจน และความชื้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันสายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี

การเปลี่ยนแปลงของสีทั้งหมดคำนวณเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) คำนวณตามสมการที่ 6

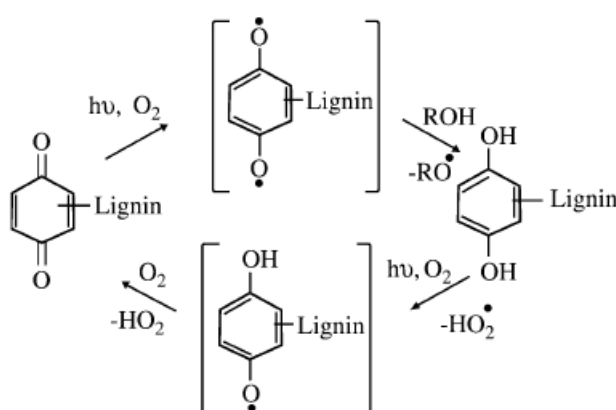
$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (6)$$

ผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีภายใต้ภาวะเร่งเป็นไปตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)		
	1 ปี	2 ปี	3 ปี
2	± 0.81	± 0.84	± 1.14
15	± 0.41	± 0.59	± 0.67

ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ทั้งสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 และ 15 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาภายใต้ภาวะเร่งเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุหนึ่ง อาจเกิดจาก ผงไม้ที่ทำการเติมลงไปในเรื่องพอลิไวนิลคลอไรด์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมสลายทางแสง (Beg and Pickering, 2008) ซึ่งไม่ว่าแต่ละประเภทจะมีองค์ประกอบไม้ที่แตกต่างกัน ตามงานวิจัยของ Yao *et al.* (2008) ไม้เนื้อแข็ง มีเซลลูโลสร้อยละ 40 ถึง 45 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 21 ถึง 36 ลิกนินร้อยละ 22 ถึง 30 การเสื่อมสลายของผงไม้เป็นไปตามภาพที่ 20



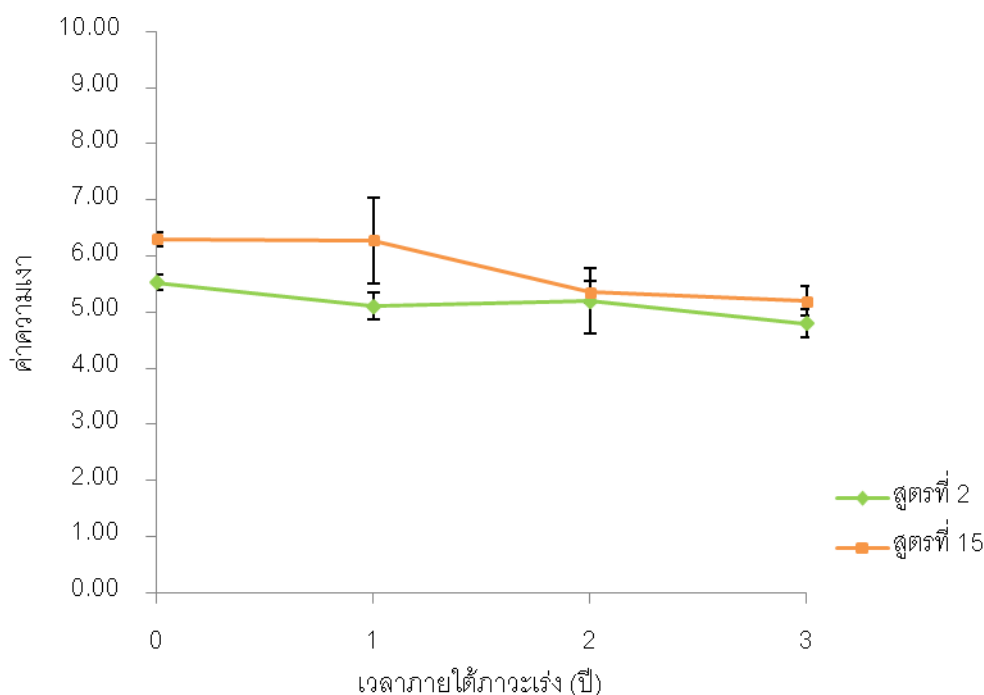
ภาพที่ 20 กลไกการสลายตัวของไม้ที่เกิดจากแสง

ที่มา: Muasher and Sain, 2006

ลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของผงไม้ ทำปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเลต และก๊าซออกซิเจน โดยแสงอัลตราไวโอเลต และก๊าซออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่โครมอฟอร์มิในโครงสร้างของ ลิกนิน เกิดเป็นอนุมูลอิสระ เกิดเป็นกลไกที่เรียกว่า Phenoxy Quinone Redox Cycle เป็นเหตุให้ เกิดการเปลี่ยนสี (Muasher and Sain, 2006)

สูตรที่ 15 มีองค์ประกอบผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลงสีตลอด 3 ปี คิดเป็น 0.41 เปอร์เซ็นต์ สูตรที่ 2 มี องค์ประกอบผงไม้ 25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 1.0 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลงสีตลอด 3 ปี คิดเป็น 0.63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเปรียบเทียบสูตรการ ผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ทั้ง 2 สูตร พบว่า สูตรที่ 15 มีค่าการเปลี่ยนแปลง สีที่ต่ำกว่าสูตรที่ 2 ปริมาณสารเติมแต่งที่เติมลงในสูตรผสมที่ 15 มีความเหมาะสม เข้าเป็นเนื้อ เดียวกัน ส่งผลให้มีเสถียรภาพทางสีที่ดีกว่า และอาจเกิดจาก ผงสีที่ใช้ คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถทำหน้าที่เป็นสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตได้ โดยไททาเนียมไดออกไซด์จะทำการดูดซับ คลื่นแสงอัลตราไวโอเลต แล้วปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าหรือมีพลังงานที่ต่ำกว่า ออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้ แสงอัลตราไวโอเลตไม่สามารถทำอันตรายต่อนื้อพอลิเมอร์ได้ (Aloui *et al.*, 2007)

5.1.3 ความเงาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง



ภาพที่ 21 ค่าความเงาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

ค่าความเงา ทั้งสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 และ 5 มีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อเวลาภายใต้ภาวะเร่งเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเงาที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Matuana *et al.* (2011) เมื่อทำการเปรียบเทียบความเงาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้สูตรที่ 15 มากกว่าสูตรที่ 2 เพราะความสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันขององค์ประกอบหลักกับสารเติมแต่งดีกว่า ทำให้ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบ ส่งผลให้มีค่าความเงามากกว่าสูตรที่ 2 เมื่ออยู่ภายใต้ภาวะเร่งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าความเงาที่ลดลง เนื่องจากแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เกิดการเสื่อมสลายบริเวณพื้นผิว สารเติมแต่งที่เติมลงไปเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์เคลื่อนย้ายจากภายในเนื้อพอลิเมอร์สู่บริเวณพื้นผิว เมื่อเวลาผ่านไปสารเติมแต่งจะหลุดออกจากบริเวณพื้นผิว กลายเป็นช่องว่าง ช่องว่างจะมีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น จนกลายเป็นจุดบกพร่องบนแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ (Ito and Nagai, 2007) เพิ่มความขรุขระบริเวณพื้นผิว ค่าความเงามีค่าที่ลดลง

5.2 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

ระยะเวลาภายใต้ภาวะเร่งเพิ่มสูงขึ้น สมบัติการดัดโค้งมีค่าที่ลด แสงอัลตราไวโอเลต ออกซิเจน และความชื้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดออกของกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination) สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาด ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ลดต่ำลง (Owen, 1984) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcia *et al.* (2009) ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของภาวะเร่งต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/เส้นใยไม้ สมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความแข็งแรงการดัดยัด การกดอัด และความแข็งแรงการดัดโค้ง ลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยไม้จะเป็นส่วนสำคัญทำให้เกิดการเสื่อมสลาย เกิดเป็นช่องว่างบริเวณพื้นผิว น้ำและความชื้นสามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สายโซ่โมเลกุลเกิดปฏิกิริยากับแสงและออกซิเจน อีกสาเหตุหนึ่งตามงานวิจัยของ Ito และ Nagai ทำการวิเคราะห์กลไกการสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์กับสารเติมแต่งภายใต้ภาวะเร่ง สารเติมแต่งที่เติมลงไปในพอลิไวนิลคลอไรด์จะเกิดแรงกายภาพระหว่างกัน เมื่ออยู่ภายใต้ภาวะเร่งสารเติมแต่งจะถูกพลังงานกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณพื้นผิว เกิดเป็นช่องว่าง ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง เมื่อนำมาทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีค่าความผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 11 และ 12

สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 มีองค์ประกอบของผงไม้ 25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงการดัดโค้งคิดเป็นร้อยละ 12.12 สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงการดัดโค้งคิดเป็นร้อยละ 6.25 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงการดัดโค้งสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 มีค่าที่ต่ำกว่าสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 เนื่องจากปริมาณไททาเนียมออกไซด์สูตรที่ 15 มากกว่าสูตรที่ 2 ทำให้การเสื่อมสลายทางแสงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ช้าลง เพราะไททาเนียมออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นสารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตได้โดยไททาเนียมออกไซด์จะทำหน้าที่ดูดพลังงานที่มาจากแสงอัลตราไวโอเลต แล้วปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าหรือมีพลังงานที่ต่ำกว่าออกมาใน

รูปของความร้อน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะของสายโซ่โมเลกุลพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีอายุการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น (Aloui *et al.*, 2007) และมีปริมาณสารเติมแต่งที่เหมาะสม

ตารางที่ 12 สมบัติการตัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงภายใต้ภาวะเร่ง
สูตรที่ 2

สมบัติการตัดโค้ง	สูตรที่ 2			
	0 ปี	1 ปี	2 ปี	3 ปี
ความเค้น (เมกะปาสคาล)	27.88±4.16	25.70±3.21	25.92±4.01	24.50±3.89
ความเครียด (เปอร์เซ็นต์)	3.90±0.51	3.63±0.30	3.59±0.27	3.40±0.30
มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	1300.18±101.73	1281.21±98.77	1205.20±71.59	1195.70±81.71
น้ำหนักการตัดโค้ง (นิวตัน)	424.27±62.56	400.25±70.00	385.10±50.99	370.50±50.89

ตารางที่ 13 สมบัติการตัดโค้งของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงภายใต้ภาวะเร่ง
สูตรที่ 15

สมบัติการตัดโค้ง	สูตรที่ 15			
	0 ปี	1 ปี	2 ปี	3 ปี
ความเค้น (เมกะปาสคาล)	59.63±1.37	57.97±1.32	56.51±1.30	55.90±1.31
ความเครียด (เปอร์เซ็นต์)	5.28±0.24	5.05±0.61	4.95±0.20	4.10±0.46
มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	2455.79±108.37	2400.50±105.00	2350.10±106.77	2325.59±107.88
น้ำหนักการตัดโค้ง (นิวตัน)	929.05±33.32	870.55±50.11	820.10±30.17	810±29.11

5.3 ลักษณะปรากฏทางกายภาพแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

ลักษณะปรากฏทางกายภาพแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้พื้นผิวได้จากภาพถ่ายดิจิทัล และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy) ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ สัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นถูกตรวจวัดทำให้เกิดเป็นภาพถ่ายตามภาพที่ 22 ถึง 25 เติร์มแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ โดยการนำไปอบให้แห้ง ตัดแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ให้มีขนาด กว้าง 0.5 มิลลิเมตร ยาว 0.5 มิลลิเมตร ทำการเคลือบด้วยทองโดยระบบสุญญากาศเป็นเวลา 200 วินาที กำลังขยายที่ใช้ 1,000 เท่า

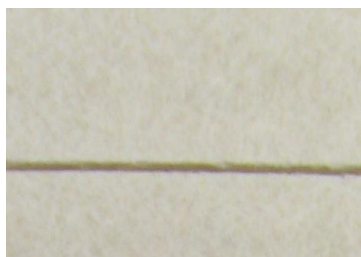
ผลปรากฏว่า สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 มีองค์ประกอบของผงไม้ 25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีระดับความคล้ำสูงขึ้น (ค่า L^* ลดลง) ตามภาพที่ ก1 ถึง ก4 แสงอัลตราไวโอเล็ตเข้าไปทำปฏิกิริยากับผงไม้ทำให้สีของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้เกิดการเปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Raghi *et al.* (2000) ที่ทำการศึกษาความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมของพอลิไวนิลคลอไรด์ การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นภายใต้ภาวะเร่ง แสงอัลตราไวโอเล็ต ออกซิเจน และความชื้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดออกของกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination) สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี สมบัติเชิงกลมีค่าลดต่ำลง

เปรียบเทียบสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 กับสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 อัตราส่วนขององค์ประกอบของสารเดิมทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ ผงไม้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต สารเพิ่มความทนแรงกระแทก และผงสี ในสูตรผสมที่ 15 เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และมีเสถียรภาพทางรูปร่างที่ดีกว่าสูตรผสมที่ 2 สอดคล้องกับการทดสอบหาค่าความหนาแน่น และความเงาของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายทางพื้นผิว (Zhao *et al.*, 2010) จะเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่อง-

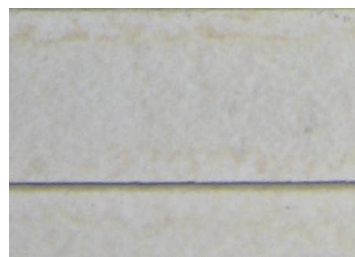
กราด ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี บริเวณพื้นผิวของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้สูตรที่ 15 บริเวณพื้นผิวมีความเรียบ และเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าสูตรที่ 2 จึงทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้สูตรที่ 15 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่ต่ำกว่า และค่าการเปลี่ยนแปลงความความเงาต่ำกว่าแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้สูตรที่ 2

อิทธิพลของภาวะเร่งต่อลักษณะปรากฏของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ 1 ปี 2 ปี และ 3 ปี มีแนวโน้มการเสื่อมสลายทางพื้นผิวที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผงไม้ที่ทำการเติมลงไปในเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์ เซลลูลอส เฮมิเซลลูลอส และลิกนิน เกิดการเสื่อมสลายทางแสง (Beg and Pickering, 2008) ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องบนพื้นผิวของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ทั้ง 2 สูตร ที่เวลา 1 ปี เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาภายใต้ภาวะเร่งเพิ่มสูงขึ้นจนครบ 3 ปี ความรุนแรงของการเสื่อมสลายทางพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น พอลิไวนิลคลอไรด์ เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นกับแสงอัลตราไวโอเล็ต ออกซิเจน และความชื้น เกิดปฏิกิริยาการขจัดออกของกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination) กรดไฮโดรคลอริกหลุดออกจากโมเลกุลพอลิไวนิลคลอไรด์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี สมบัติเชิงกลมีค่าลดต่ำลง

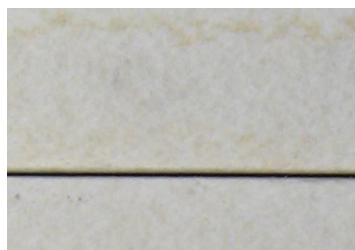
เมื่อทำการเปรียบเทียบสูตรแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 ทั้ง 3 ระยะเวลา ได้แก่ 1 ปี 2 ปี และ 3 ปี กับสูตรแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 การเสื่อมสลายทางพื้นผิวสูตรที่ 2 เกิดมากกว่าสูตรที่ 15 การนำสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 ประยุกต์เป็นแท่นรองสินค้า เมื่อครบ 3 ปีจะมีสมบัติกายภาพสมบัติเชิงกล ที่ดีกว่าสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ (สูตรที่ 2) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน



ก



ข

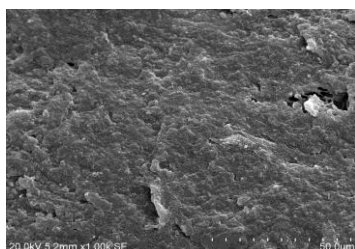


ค

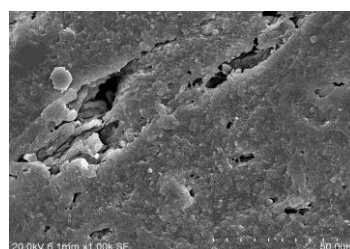


ง

ภาพที่ 22 ภาพถ่ายดิจิทัลพื้นผิวของสูตรที่ 2 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี



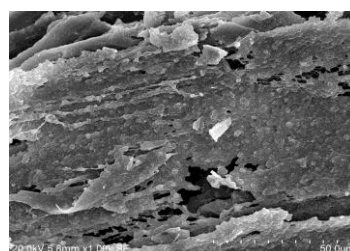
ก



ข



ค



ง

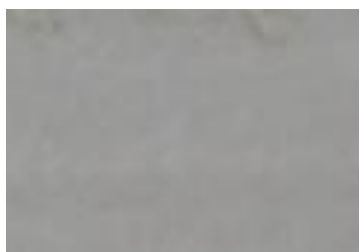
ภาพที่ 23 ภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสูตรที่ 2 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี



ก



ข

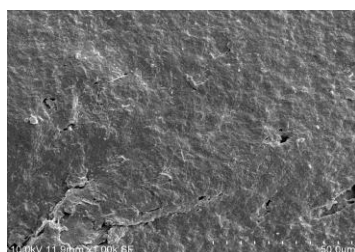


ค

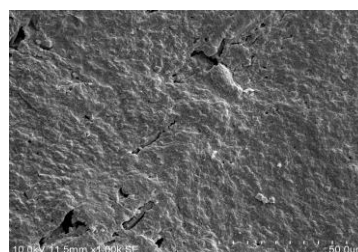


ง

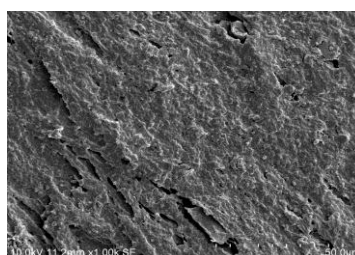
ภาพที่ 24 ภาพถ่ายดิจิทัลพื้นผิวของสูตรที่ 15 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี



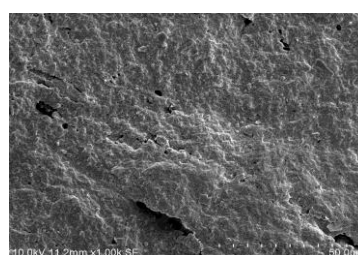
ก



ข



ค



ง

ภาพที่ 25 ภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสูตรที่ 15 ก) ที่ 0 ปี ข) ที่ 1 ปี ค) ที่ 2 ปี และ ง) ที่ 3 ปี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การออกแบบแผนการทดลองด้วย Central Composite Design กำหนดให้มีปัจจัยที่สนใจ 4 ปัจจัย ได้แก่ ผงไม้ สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต (ฟีนอล 2,2-เมทิลีน-บิส (6-(2-ไฮโดรเจน-เบนโซไทโรอะโซน-2-อิล)-4-(1,1,3,3-เตตระเมทิลบิวทิล)) สารดัดแปรความทนแรงกระแทก (คลอรีเนเตดพอลิเอทิลีน) และผงสี (ไททาเนียมไดออกไซด์) ระดับปริมาณที่สนใจ 5 ปริมาณ (-2, -1, 0, 1 และ 2) จำนวนการทดลอง 30 การทดลองจากจำนวนการทดลองทั้งหมด 625 การทดลอง

1. สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ทั้ง 30 สูตร เพื่อนำไปทดสอบเสถียรภาพทางแสง ได้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน เพราะสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้มีระดับปริมาณของสารเติมต่างแตกต่างกัน สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 เป็นสูตรของโรงงานอุตสาหกรรม มีองค์ประกอบของผงไม้ 25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.3200 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้ง 27.88 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งแรงการกระแทก 1,760.00 จูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 กับสูตรผสมอื่นเพื่อทำการหาสูตรผสมที่เหมาะสม มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำ และสมบัติเชิงกลสามารถยอมรับได้ พบว่า สูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 มีองค์ประกอบของผงไม้ 30.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารดูดซับแสงอัลตราไวโอเลต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารเพิ่มความทนแรงกระแทก 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงสี 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.0789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเค้นสูงสุดในการดัดโค้ง 59.63 เมกะปาสคาล และค่าความทนแรงการกระแทก 2,322.00 จูลส์ต่อตารางมิลลิเมตร เป็นสูตรที่มีสมบัติทางกายภาพสมบัติเชิงกลเป็นที่ยอมรับได้ก่อนเข้าภาวะเร่ง

2. การทดสอบเสถียรภาพทางแสง กำหนดระยะเวลาในการทดสอบภายใต้ภาวะเร่ง 4 เวลา เวลา 15 วันภายใต้ภาวะเร่ง เท่ากับ 1 ปีกลางแจ้ง เวลา 30 วันภายใต้ภาวะเร่ง เท่ากับ 2 ปีกลางแจ้ง และเวลา 45 วันภายใต้ภาวะเร่ง เท่ากับ 3 ปีกลางแจ้ง เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดนำแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ คือ ความหนาแน่น ความเงาของสูตรผสมทั้ง 2 สูตรมีแนวโน้มที่ลดลงตลอด 3 ปี สारเติมแต่งคลื่อนย้ายออกมาสู่บริเวณพื้นผิว ทำให้ความขรุขระเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นและความเงาลดต่ำลง

3. สมบัติเชิงกล ทดสอบความต้านทานการตัดโค้ง การเปลี่ยนแปลงความต้านทานการตัดโค้งที่เกิดขึ้นภายใต้ภาวะเร่ง เกิดจาก แสงอัลตราไวโอเลต ออกซิเจน และความชื้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการขจัดออกของกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination) สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาด ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ลดต่ำลง เมื่อทำการเปรียบเทียบสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 2 กับ 15 พบว่า สูตรที่ 15 มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลดีกว่าสูตรที่ 2 เนื่องจากสูตรที่ 15 มีปริมาณองค์ประกอบที่เหมาะสม มีความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด เมื่อครบ 3 ปี สูตรที่ 15 เกิดความเสียหายบริเวณพื้นผิวน้อยกว่าสูตรที่ 2 สามารถทำการสรุปได้ว่า การนำสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ 15 ไปประยุกต์เป็นแท่นรองสินค้า เมื่อครบ 3 ปีจะมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ที่ดีกว่าสูตรผสมแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ข้อเสนอแนะ

ผงไม้เกี่ยวข้องกับกลไกการเสื่อมสลายทางแสง เนื่องจากองค์ประกอบของผงไม้ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สามารถเกิดปฏิกิริยากับแสงทำให้โครงสร้างทางเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ระดับความเหลืองเพิ่มสูงขึ้น

ขนาดและรูปร่างอนุภาคของสารตัวเติม เป็นอีกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ รูปร่างของอนุภาคของสารตัวเติมมีผลอย่างมากต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติพื้นผิว เช่น ความเงา สารตัวเติมที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา (aspect ratio) สูง เช่น สารตัวเติมที่มีรูปร่างขาดอนุภาคเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น จะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ และทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) ในทางตรงกันข้าม สารตัวเติมที่มีลักษณะกลมจะทำให้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีสมบัติไอโซโทรปิก (isotropic) ผงไม้ที่ใช้เป็นสารตัวเติมจะต้องทำการวิเคราะห์รูปร่างและขนาดเบื้องต้น การทดสอบทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงไม้ ประเภทของผงไม้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2554. **สถิติสำหรับงานวิจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 6 โรงพิมพ์ บริษัท ธรรมสาร จำกัด, กรุงเทพฯ.

ภัทรารุณ มนต์วิเศษ. 2552. **การใช้พอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. 2550. **เคมีพอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. 2551. **พลาสติกในสิ่งแวดล้อมและการรีไซเคิลพลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1 บริษัท บุ๊คเน็ต จำกัด, กรุงเทพฯ.

สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยู่ธยา, กอบบุญ หล่อทองคำ, ธาราย เหลืองวรานันท์ และปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. 2548. **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน**. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. แปลจาก William D. and Callister Jr. : **Materials Science and Engineering An Introduction**.

เสาวรจณ์ ชัยจุลจิตร. 2546. **วัสดุศาสตร์มูลฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 3 โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรอุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรอุษา สรวารี. 2544. **สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์)**. พิมพ์ครั้งที่ 2 โรงพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Allen, N.S., and M.Edge. 1992. **Fundamentals of polymer degradation and stabilization**.
Elsevier applied science, New York.

Aloui, F., A. Ahajji., Y. Irmouli., B. George. and A. Merlin. 2007. Inorganic UV absorbers
for the photostabilisation of wood-clearcoating systems: Comparison with
organic UV absorber. **Applied Surface Science** 2007: 3737-3745.

Beg, M.D.H. and K.L. Pickering. 2008. Reprocessing of wood fibre reinforced
polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical
properties. **Composites** 39: 1091-1100.

Beg, M.D.H. and K.L. Pickering 2008. Accelerated weathering of unbleached Kraft
wood fibre reinforced polypropylene composites. **Polymer Degradation and
Stability** 93: 1939-1946.

Ferrer, C.F., M.C.Garrigos. and A.Jimenez. 2010. Characterization and thermal stability
of poly(vinyl chloride) plasticized with epoxidized soybean oil for food
packaging. **Polymer Degradation and Stability**: 1-6.

Garcia, M., J. Hidalgo., I. Garmendia., and G.Jaca. 2009. Wood-plastics composites
with better fire retardancy and durability performance. **Composites** 40: 1772-
1776.

Gesenhues, U. 2000. Influence of titanium dioxide pigments on the photodegradation
of poly(vinyl chloride). **Polymer Degradation and Stability** 68: 185-196.

Grossman, R.F. 2008. **Handbook of vinyl formulation**. Second edition. John Wiley and Sona Inc, New Jersey.

Habibi, Y., W. K El-zawawy., M.M.Ibrahim. and A.Dufresne. Processing and characterization of reinforced polyethylene composites made with lignocellulosic fibers from Egyptian agro-industrial residues. **Composites Science and Technology** 68: 1877-1885.

Ito, M. and K.Nagai. 2007. Analysis of degradation mechanism of plasticized PVC under artificial aging conditions. **Polymer Degradation and Stability** 92: 260-270.

Jakubowicz, I. 2001. Effect of artificial and natural ageing on impact-modified poly(vinyl chloride)(PVC). **Polymer Testing** 20: 545-551.

Karayildirim, T., J. Yanik, M. Yuksel, M. Saglam, C. Vasile. and H. Bockhorn. 2006. The effect of some fillers on PVC degradation. **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 75: 112–119.

Karmalm, P., T. Hjertberg, A. Jansson. and R. Dahl. 2009. Thermal stability of poly(vinyl chloride) with epoxidised soybean oil as primary plasticizer. **Polymer Degradation and Stability** 94: 2275–2281.

Leu, Y. S., H.T. Yang, F.S. Lo. and H.T. Yang. 2012. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs). **Construction and Building Materials** 29: 120-127.

Mantia, La F.P. and M. Morreale 2011. Review green composites: A brief review. **Composites: Part A** 42: 579-588.

- Matar, S. 2000. **Chemistry of petrochemical processes**. 2nd edition. Gulf publishing company, Houston.
- Matuana, L. M., S. Jin. and N.M. Stark. 2011. Ultraviolet weathering of HDPE/wood-flour composites coextruded with a clear HDPE cap layer. **Polymer Degradation and Stability** 96: 97-106.
- Muasher, M. and M. Sain. 2006. The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites. **Polymer Degradation and Stability** 91: 1156-1165.
- Mulder, K. and M. Knot. 2001. PVC plastic: a history of systems development and entrenchment. **Technology in Society** 23: 265–286.
- Pechyen, C., D. Atong. and D. Aht-Ong 2011. Effect of additive on mechanical properties and photo-stability of filament-wound glass fiber reinforced epoxy pipes. **Polymer and polymer composites** 19: 161-170.
- Pita, V.J.R.R., E.E.M. Sampaio. and Monteiro. 2002. Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing. **Polymer Testing** 21: 545–550.
- Raghi El, S., R.R. Zahran. and E.B. Gebril. 2000. Effect of weathering of polyvinyl chloride/lignin blends. **Materials Letters** 46: 332-342.
- Real, P.L., P.A. Rocha. and L.J. Gardette 2003. Artificial accelerated weathering of poly(vinyl chloride) for outdoor applications: the evolution of the mechanical and molecular properties. **Polymer Degradation and Stability** 82: 235-243.

- Real, P.L., M.A. D.B Ferraria and Rego. 2007. The influence of weathering on the properties of poly(vinyl chloride) for outdoor applications. An analytical study using surface analysis techniques. **Polymer Testing** 26: 77-87.
- Singh, B. and N. Sharma. 2008. Mechanistic implication of plastic degradation. **Polymer Degradation and Stability** 93: 561–584.
- Sterky, K., T. Hjerberg. and H. Jacobsen 2009. Effect of montmorillonite treatment on the thermal stability of poly(vinyl chloride) nanocomposites. **Polymer Degradation and Stability** 94: 1564–1570.
- Xu, Y., Q. Wu., Y Lei., F.Yao. and Q. Zhang. 2008. Natural fiber reinforced poly(vinyl chloride): effect of fiber type and impact modifier. **J Polym Environ**.
- Yang, F. and V. Hlavacek. 1999. Improvement of PVC wearability by addition of additives. **Powder Technology** 103: 182–188.
- Zhang, Z., S. Chen, J. Zhang and Jin . 2010. Influence of chlorinated polyethylene on poly(vinyl chloride)/poly(α -methylstyrene-acrylonitrile) blends: mechanical properties, morphology and thermal properties. **Polymer Testing** 29: 995-1001.
- Zhao, Q, Z Jia, X.Li and Z. Ye 2010. Surface degradation of unsaturated polyester resin in Xe artificial weathering environment. **Materials and Design** 31: 4457-4460.
- Zweifel, H. 2001. **Plastic Additives Handbook**. 5th edition. Hanser gardner publications Inc, Cincinnati.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดสอบแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

ตารางผนวกที่ ก1 ความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	1.2489	1.2602	1.3044	1.2789	1.2675	1.27198	0.0211570
2	1.1125	1.3132	1.4299	1.3560	1.3886	1.32004	0.1236754
3	1.3664	1.3117	1.3252	1.3946	1.3755	1.35468	0.0349313
4	1.2423	1.2415	1.2463	1.2321	1.1809	1.22862	0.0271796
5	1.3302	1.3286	1.3524	1.3963	1.3966	1.36082	0.0388450
6	1.3200	1.2303	1.1791	1.1732	1.2294	1.22640	0.0588487
7	1.2485	1.4923	1.4299	1.4135	1.2416	1.36516	0.1135443
8	1.0787	1.1406	1.0795	1.0521	1.1362	1.09742	0.0390316
9	1.1963	1.2734	1.1748	1.2425	1.2188	1.22116	0.0385916
10	1.3586	1.3308	1.4415	1.3687	1.3802	1.37596	0.0409481
11	1.3631	1.2836	1.4807	1.2069	1.2832	1.32350	0.1037927
12	1.1375	1.1372	1.1338	1.1372	1.2057	1.15028	0.0310180
13	-	-	-	-	-	-	-
14	1.3451	1.3483	1.3069	1.332	1.249	1.31626	0.0250130
15	1.0434	1.0466	1.1254	1.118	1.0612	1.07892	0.0397111
16	1.3409	1.2310	1.3841	1.4084	1.3631	1.34550	0.0614614
17	1.2290	1.2848	1.2664	1.1460	1.1270	1.21064	0.0709224
18	1.4052	1.5381	1.411	1.4617	1.4568	1.45456	0.0533123
19	-	-	-	-	-	-	-
20	1.3534	1.3462	1.3749	1.3738	1.3491	1.35948	0.0138194

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21	1.1853	1.1987	1.1722	1.2003	1.2427	1.19984	0.0265230
22	1.1387	1.1320	1.1475	1.1521	1.1420	1.14246	0.0077797
23	1.2535	1.2506	1.2634	1.2792	1.2700	1.26334	0.0117796
24	1.2343	1.2172	1.2349	1.2215	1.2291	1.22740	0.0078358
25	1.2572	1.2047	1.1835	1.2227	1.2077	1.21516	0.0273479
26	1.5726	1.5275	1.4627	1.4977	1.5784	1.52778	0.0492735
28	1.3392	1.3637	1.3613	1.3548	1.3717	1.35814	0.0121927
29	1.4220	1.2836	1.2410	1.4220	1.2835	1.33042	0.0853864
30	1.3419	1.1125	1.4483	1.4084	1.2069	1.30360	0.1407641

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าความทนแรงกระแทกแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	64.05	63.49	63.61	52.86	64.05	61.61	4.90
2	29.95	22.16	30.21	32.13	24.96	27.88	4.16
3	41.82	52.19	49.52	38.14	48.50	46.03	5.84
4	55.13	69.19	68.14	67.49	46.06	61.20	10.22
5	44.21	42.18	44.62	43.24	42.09	43.27	1.15
6	48.17	50.30	45.13	42.70	42.85	45.83	3.34
7	27.42	31.82	29.85	31.98	25.34	29.28	2.88
8	51.70	50.57	52.66	51.87	51.72	51.70	0.75
9	50.33	49.23	44.95	45.62	46.53	47.33	2.34
10	35.73	34.42	40.71	35.66	39.14	37.13	2.66
11	27.79	25.86	29.60	30.82	26.87	28.19	2.01
12	25.47	25.93	24.20	25.68	25.88	25.43	0.71
13	-	-	-	-	-	-	-
14	54.68	53.16	57.83	56.52	45.11	53.46	4.99
15	60.58	57.81	59.23	61.34	59.19	59.63	1.37
16	28.49	29.37	28.21	31.31	26.78	28.83	1.67
17	24.62	24.68	23.71	24.67	23.68	24.27	0.53
18	62.38	61.09	53.16	61.91	58.74	59.46	3.79
19	-	-	-	-	-	-	-
20	47.96	49.26	41.10	47.60	45.79	46.34	3.18

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21	26.60	31.61	28.57	30.19	28.90	29.17	1.87
22	36.31	38.89	40.28	38.84	37.33	38.33	1.54
23	36.40	37.07	35.33	37.70	39.70	37.24	1.63
24	42.95	42.96	44.07	44.35	39.22	42.71	2.05
25	40.12	39.14	42.33	43.55	42.96	41.62	1.90
26	34.51	33.38	36.73	30.95	35.40	34.19	2.19
27	44.64	41.81	40.73	43.22	40.73	42.23	1.69
28	39.69	54.93	52.76	51.45	50.29	49.82	5.92
29	31.53	32.64	30.98	31.44	32.41	31.80	0.70
30	31.07	25.79	30.84	31.21	29.43	29.67	2.28

**ตารางผนวกที่ ก3 ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/
ผงไม้**

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	3.55	3.47	3.54	3.80	4.86	3.84	0.58
2	3.87	3.42	4.77	3.74	3.70	3.90	0.51
3	5.64	5.18	4.55	4.46	4.41	4.85	0.54
4	4.97	5.51	4.42	4.29	4.16	4.67	0.56
5	5.83	5.73	5.52	5.37	5.30	5.55	0.23
6	4.80	4.92	5.00	5.17	5.04	4.99	0.14
7	3.67	3.42	4.46	3.74	3.71	3.80	0.39
8	3.58	3.60	3.54	3.57	3.68	3.59	0.05
9	6.70	7.05	6.72	6.64	6.78	6.78	0.16
10	3.29	4.27	3.37	4.22	3.81	3.79	0.46
11	3.67	3.44	4.46	3.98	3.79	3.87	0.38
12	5.77	5.56	5.42	5.20	5.04	5.40	0.29
13	-	-	-	-	-	-	-
14	3.82	3.81	3.73	4.15	4.28	3.96	0.24
15	5.06	4.99	5.53	5.33	5.48	5.28	0.24
16	4.46	3.45	3.46	3.98	3.69	3.81	0.42
17	4.43	4.39	4.51	4.44	4.50	4.45	0.05
18	4.30	4.67	4.05	3.99	3.29	4.06	0.51
19	-	-	-	-	-	-	-
20	5.53	5.49	5.71	4.70	4.33	5.15	0.60

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21	6.37	6.61	6.30	5.90	5.90	6.22	0.31
22	5.65	5.81	5.25	5.54	5.41	5.53	0.22
23	3.68	3.89	3.54	3.64	3.67	3.68	0.13
24	5.20	4.92	5.32	4.88	5.10	5.20	0.19
25	5.84	6.04	5.56	5.04	5.82	5.66	0.39
26	6.84	6.36	6.36	7.52	6.03	6.62	0.58
27	3.63	3.66	3.68	3.99	3.52	3.70	0.18
28	3.85	3.45	3.93	3.96	3.76	3.79	0.21
29	3.67	3.72	4.03	3.98	3.79	3.84	0.16
30	3.95	4.25	3.88	3.98	3.79	3.97	0.17

ตารางผนวกที่ ก4 ค่ามอดุลัสการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	2093.26	2002.76	2016.26	2103.33	2286.86	2100.49	113.40
2	1277.66	1451.57	1166.29	1298.87	1306.52	1300.18	101.73
3	2097.81	2122.69	1911.16	2394.51	1789.81	2063.20	230.41
4	2676.35	2692.36	2778.34	2740.22	1991.63	2575.78	329.02
5	1831.44	1812.56	1825.10	1807.76	1785.48	1812.47	17.82
6	2043.55	1927.67	2074.12	1982.32	1876.90	1980.91	81.03
7	1196.34	1299.04	1057.07	1425.39	1458.98	1287.36	165.80
8	2330.66	2367.32	2409.54	2399.77	2367.19	2374.90	31.20
9	1900.47	1803.17	1845.03	1797.48	1688.01	1806.83	78.18
10	1440.02	1612.50	1564.93	1349.13	1287.61	1450.84	138.07
11	1407.45	1214.89	1180.77	1362.73	1322.69	1297.71	96.73
12	979.50	1029.34	950.02	967.55	932.25	971.73	36.83
13	-	-	-	-	-	-	-
14	2325.03	2562.33	2372.36	2287.67	2272.87	2364.05	117.32
15	2642.35	2455.82	2412.90	2385.24	2382.62	2455.79	108.37
16	1405.22	1177.75	1401.97	1297.08	1232.98	1303.00	101.08
17	1055.97	1071.36	981.42	1064.98	1056.76	1046.10	36.71
18	2529.07	2394.34	2333.89	2750.17	2379.00	2477.29	169.00
19	-	-	-	-	-	-	-
20	1918.17	1885.69	2000.46	1939.51	1837.94	1916.35	60.63

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21	1327.72	1291.47	1301.46	1208.76	1211.33	1268.15	54.68
22	1331.92	1374.03	1358.29	1365.05	1324.93	1350.84	21.36
23	1774.08	1728.01	1626.52	1672.27	1570.14	1674.20	80.59
24	1701.83	1580.88	1705.57	1722.56	1597.56	1661.68	66.87
25	1583.40	1543.03	1548.59	1569.24	1594.95	1567.84	22.16
26	1251.10	1247.94	1238.55	1277.91	1168.00	1236.70	41.09
27	2204.87	2267.31	2015.30	2020.28	1827.80	2067.11	174.07
28	2241.64	2133.14	2241.99	2189.98	2058.86	2173.12	78.06
29	1348.13	1309.60	1254.54	1322.40	1200.54	1287.04	59.22
30	1314.22	1340.20	1258.32	1235.21	1400.53	1309.70	65.93

ตารางผนวกที่ ก5 คำนวณน้ำหนักสูงสุดในการตัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	967.44	805.55	975.97	976.04	969.30	938.86	74.62
2	456.44	337.63	460.29	486.62	380.35	424.27	62.56
3	637.29	795.32	754.62	739.00	581.17	701.48	88.93
4	840.01	1054.27	1038.27	1028.35	701.84	932.55	155.69
5	673.68	679.99	702.48	642.74	641.33	668.04	26.05
6	674.97	687.73	650.68	652.97	733.95	680.06	33.86
7	417.83	484.95	394.07	423.52	337.45	411.56	53.31
8	831.77	819.53	802.45	790.42	788.15	806.46	18.84
9	684.97	695.23	666.69	686.94	767.00	700.17	38.79
10	544.45	524.42	620.30	543.40	596.37	565.79	40.54
11	447.50	451.01	469.57	409.44	361.04	427.71	43.20
12	388.07	395.24	368.70	399.20	399.41	390.12	12.83
13	-	-	-	-	-	-	-
14	833.23	810.07	769.70	881.16	861.27	831.09	43.68
15	923.19	902.49	934.71	982.99	901.89	929.05	33.24
16	434.21	497.38	310.96	472.14	479.04	438.75	75.04
17	375.16	376.10	361.35	375.13	361.42	369.83	7.72
18	950.63	930.97	810.13	943.40	795.12	886.05	76.66
19	-	-	-	-	-	-	-
20	730.87	750.66	725.34	697.71	669.23	714.76	31.72

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21	405.27	481.61	435.33	460.08	440.30	444.52	28.55
22	568.89	591.79	613.85	551.22	592.56	583.66	24.12
23	554.63	564.83	538.31	574.42	532.87	553.01	17.48
24	654.46	654.55	671.48	669.08	655.54	661.02	8.50
25	654.68	663.55	645.06	611.32	596.34	634.19	28.96
26	525.87	559.73	539.37	580.99	508.70	542.93	28.31
27	680.28	637.15	620.66	658.65	721.14	663.58	39.23
28	604.79	836.98	804.04	783.98	766.25	759.21	90.23
29	493.81	451.08	387.66	447.23	376.09	431.17	48.75
30	416.99	397.98	467.77	428.22	436.78	429.55	25.83

ตารางผนวกที่ ก6 ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/
ผงไม้

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	2000.00	1800.00	2300.00	1900.00	2100.00	2020.00	192.35
2	1800.00	1700.00	1700.00	1800.00	1800.00	1760.00	54.77
3	1500.00	1600.00	1900.00	1500.00	1600.00	1620.00	164.32
4	1700.00	2400.00	2100.00	2300.00	1200.00	1940.00	492.95
5	2100.00	2100.00	2100.00	1900.00	2200.00	2080.00	109.54
6	1500.00	1500.00	1600.00	1600.00	1600.00	1560.00	54.77
7	1600.00	1800.00	1800.00	1700.00	1800.00	1740.00	89.44
8	2100.00	2100.00	1700.00	1700.00	2100.00	1940.00	219.09
9	1500.00	2100.00	1900.00	1600.00	1900.00	1800.00	244.95
10	2400.00	2300.00	2200.00	2200.00	2400.00	2300.00	100.00
11	1500.00	1800.00	1900.00	1400.00	1700.00	1660.00	207.36
12	1100.00	1300.00	1300.00	1100.00	1100.00	1180.00	109.54
13	-	-	-	-	-	-	-
14	1400.00	1300.00	1400.00	1400.00	1300.00	1360.00	54.77
15	2200.00	2500.00	2500.00	2600.00	1800.00	2320.00	327.11
16	1600.00	1600.00	1900.00	1500.00	1900.00	1700.00	187.08
17	1400.00	1500.00	1500.00	1400.00	1500.00	1460.00	54.77
18	1440.00	1500.00	1500.00	1600.00	1400.00	1488.00	75.63
19	-	-	-	-	-	-	-
20	2000.00	2000.00	2300.00	2100.00	1900.00	2060.00	151.66

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

สูตร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21	1400.00	1500.00	1500.00	1500.00	1600.00	1500.00	70.71
22	2300.00	2000.00	2300.00	1900.00	2600.00	2220.00	277.49
23	1900.00	1900.00	2100.00	2200.00	2100.00	2040.00	134.16
24	2000.00	2000.00	2100.00	2300.00	2000.00	2080.00	130.38
25	2300.00	1700.00	1700.00	1900.00	2000.00	1920.00	249.00
26	2300.00	2300.00	2500.00	2000.00	2300.00	2280.00	178.89
27	2200.00	1800.00	2200.00	1800.00	2200.00	2040.00	219.09
28	2400.00	2400.00	1800.00	1700.00	1500.00	1960.00	415.93
29	1800.00	1250.00	1700.00	1800.00	1600.00	1630.00	228.04
30	1700.00	1800.00	1900.00	1700.00	1700.00	1760.00	89.44

**ตารางผนวกที่ ก7 ความหนาแน่นเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง**

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	1.3200	0.1237	1.2288	0.0923	1.2209	0.1127	1.2175	0.0856
15	1.0789	0.0397	0.9972	0.0381	0.9733	0.0401	0.9700	0.0398

**ตารางผนวกที่ ก8 ค่า L^* เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง**

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	42.75	0.1718	41.96	0.1819	41.97	0.1351	41.71	0.1298
15	43.01	0.1253	42.60	0.1501	42.43	0.1347	42.35	0.1341

**ตารางผนวกที่ ก9 ค่า a^* เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง**

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	0.58	0.0056	0.59	0.0078	0.53	0.0031	0.50	0.0065
15	0.60	0.0028	0.55	0.0057	0.50	0.0098	0.49	0.0023

ตารางผนวกที่ ก10 ค่า b^* เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	4.01	0.0501	4.18	0.0491	4.31	0.0521	4.46	0.0221
15	3.96	0.0213	3.98	0.0321	4.02	0.0525	4.08	0.0401

ตารางผนวกที่ ก11 ค่าความเงาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	5.53	0.1341	5.10	0.2411	5.20	0.5819	4.80	0.2571
15	6.30	0.1224	6.28	0.7694	5.36	0.1949	5.20	0.2550

ตารางผนวกที่ ก12 ค่าความเค้นสูงสุดในการตัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
แผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	27.88	4.16	25.70	3.21	25.92	4.01	24.50	3.89
15	59.63	1.37	57.97	1.32	56.51	1.30	55.90	1.31

ตารางผนวกที่ ก13 ค่าความเครียดสูงสุดในการดัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	3.90	0.51	3.63	0.30	3.59	0.27	3.40	0.30
15	5.28	0.24	5.05	0.61	4.95	0.20	4.10	0.46

ตารางผนวกที่ ก14 ค่ามอดุลัสการดัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	1300.18	101.73	1281.21	98.77	1205.20	71.59	1195.70	81.71
15	2455.79	108.37	2400.50	105.00	2350.10	106.77	2325.59	107.88

ตารางผนวกที่ ก15 ค่าน้ำหนักสูงสุดในการดัดโค้งเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้ภายใต้ภาวะเร่ง

สูตร	ภายใต้ภาวะเร่งที่ 0 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 1 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 2 ปี		ภายใต้ภาวะเร่งที่ 3 ปี	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	424.27	62.56	400.25	70.00	385.10	50.99	370.50	50.89
15	929.05	33.24	870.55	50.11	820.10	30.17	810.51	29.11

ภาคผนวก ข

ภาพการทดสอบแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้



ภาพผนวกที่ ข1 การหาค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์/ผงไม้
ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง



ภาพผนวกที่ ข2 การทดสอบความทนแรงดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ instron รุ่น
5965



ภาพผนวกที่ ๓3 การทำรอยบากก่อนการทดสอบความทนแรงกระแทก



ภาพผนวกที่ ๓4 การทดสอบความทนแรงกระแทก

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายบัณฑิต ศรีนวล
เกิดวันที่	5 พฤศจิกายน 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	Surface Degradation and Mechanical Properties of PVC/Wood-Pallet Composite under UV-Weathering Environment., Advanced Materials Research Vol. 506 (2012): 548-551
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1) ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2554 ระดับปริญญาโท ด้านการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางด้านการเกษตร จากสถาบันวิจัยแห่งชาติ 2) ทุนโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)