

ผลของสารประสานต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจาก  
พอลิไวนิลคลอไรด์

นางสาวกนกวรรณ พนิชนาพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF COUPLING AGENTS ON PROPERTIES OF WOOD PLASTIC  
COMPOSITES PREPARED FROM POLY(VINYL CHLORIDE)

Miss Kanokwan Panitchanapan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสารประสานต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่  
เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์

โดย

นางสาว กนกวรรณ พนิชนาพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ ไคววาสาร์ช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ ไคววาสาร์ช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)

..... กรรมการ  
(คุณ ปรีชา แสงธีระปิติกุล)

กนกวรรณ พินิชานาพันธ์:ผลของสารประสานต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก  
ที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์. EFFECTS OF COUPLING AGENTS ON PROPERTIES OF  
WOOD PLASTIC COMPOSITES PREPARED FROM POLY(VINYL CHLORIDE)

อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. สิริจุฑารัตน์ โกวาวิสารัช, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร.ณัฐพร โทพานนท์

146 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารประสานต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกเพื่อใช้ทดแทนไม้ธรรมชาติ ไม้พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) กับวัสดุเสริม 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ ถั่วแกลบ และไม้เต็ง สารประสานกลุ่มอะมิโนไซเลนที่ใช้ได้แก่ N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ปริมาณของสารประสาน ซึ่งใช้ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0% โดยน้ำหนักและปริมาณของวัสดุเสริมซึ่งเดิม 2 ระดับ ได้แก่ 20 และ 60 phr และขนาดอนุภาคของวัสดุเสริมแต่ละชนิดซึ่งบดและแยกใช้ขนาด 45 75 106 180 และ 250 ไมครอน การศึกษาหุ้ฟงักซันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของอะมิโนไซเลนกับไม้พลาสติกด้วย FTIR พบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไซเลนอล Si(OH)<sub>3</sub> ของอะมิโนไซเลนกับหมู่ไฮดรอกซิล(Si-OH) ของแกลบและSiO<sub>2</sub>ของถั่วแกลบเกิดเป็นหมู่ Si-O-Si ส่วนปฏิกิริยาของหมู่ไซเลนอล Si(OH)<sub>3</sub> ในอะมิโนไซเลนกับC-OHในไม้เต็งเกิดเป็นหมู่ Si-O-C ทำให้การยึดติดที่ผิวระหว่าง PVC กับวัสดุเสริมดีขึ้น จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า มอดูลัสแรงดึง แรงดัดโค้งและแรงกดอัด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริมด้วยอะมิโนไซเลน ช่วงความเข้มข้น 0.6-0.8% โดยน้ำหนัก และปริมาณของวัสดุเสริมทั้ง 3 ชนิด เพิ่มจาก 20 เป็น 60 phr การทนต่อแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมทั้ง 3 ระบบ เนื่องจากอนุภาคของวัสดุเสริมเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนขยับและคลายขดของโมเลกุล PVC ทำให้ไม้พลาสติกยึดตัวได้น้อยลง และการทนต่อแรงดัดโค้งและแรงกดอัดมากขึ้นเมื่อปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริมด้วยอะมิโนไซเลนและเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมจาก 20 เป็น 60 phr แต่การทนต่อแรงกระแทกลดลงและการยึดภายใต้แรงดึง แรงดัดโค้งและแรงกดอัดลดลงเมื่อปริมาณวัสดุเสริมเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของวัสดุเสริมที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยอะมิโนไซเลน พบว่าขนาดอนุภาคไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างเห็นได้ชัด การศึกษาเชิงความร้อนพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมหรือมีการปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริมด้วยอะมิโนไซเลนมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(T<sub>g</sub>) เพิ่มสูงขึ้น และอุณหภูมิการโค้งงอของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการยึดติดระหว่างอนุภาคของวัสดุเสริมและ PVC ดีขึ้น สามารถทนต่อแรงดัดโค้งภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ WPC ที่ไม่ปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริมด้วยสารประสาน

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา 2550.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4770202721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: WOOD PLASTIC COMPOSITES / RICE HULL / PVC / COUPLING AGENTS

KANOKWAN PANITCHANAPAN: EFFECTS OF COUPLING AGENTS ON PROPERTIES OF WOOD PLASTIC COMPOSITES PREPARED FROM POLY(VINYL CHLORIDE).

THESIS ADVISOR: SIRIJUTARATANA COVAVISARUCH,

THESIS CO-ADVISOR: Asst.Prof. NATTAPORN TONANON, 146 pp.

This research aims to investigate the influences of aminosilane coupling agents on the interfacial adhesion of wood plastic composites (WPCs) prepared from PVC and three types of reinforcements namely rice hull, rice hull ash and wood (balau) flour. The coupling agent selected for the present study was N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane. It was applied at the concentration of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0% on the surface of each filler which had been milled and sieved to the particle sizes of 45, 75, 106, 180 and 250 micron. The amount of each filler in WPCs was varied at two levels, i.e. 20 and 60 phr. Fourier transform infrared Spectroscopy (FTIR) was employed in order to identify the reaction occurred at the PVC matrix and the surface of each filler treated with aminosilane coupling agent. The FTIR scans indicated the generation of Si-O-Si group on rice hull and rice hull ash surface, and Si-O-C group on the balau wood flour surface. As a consequence, an improvement in the interfacial adhesion between the PVC matrix and each filler. Mechanical tests revealed that the tensile modulus, flexural strength and compressive strength of all the WPCs were raised after treated by aminosilane. An increment in the filler content led to lower tensile strength. PVC chain movement and entanglement were obstructed due to the presence of each filler in the WPCs. The flexural strength and the compressive strength were increased as the aminosilane coupling agent and filler content increased. The impact strength, elongation at break, flexural strength and compressive strength were abated when the filler content increased. The particle size did not distinctly affected the mechanical properties of the aminosilane-treated WPCs. The thermal characterizations indicated that the increment in filler content and aminosilane dosage led to an increase in the glass transition temperature and the heat deflection temperature.

Department Chemical Engineering..

Field of study Chemical Engineering..

Academic year 2007..

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนได้รับความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผศ.ดร. ณัฐพร โทณานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ท่านกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการวิจัย ท่านได้สละเวลาช่วยเหลือ ตรวจสอบข้อผิดพลาดและแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย รศ.ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ผศ. ดร. วิจิตรา จงวิศาลและคุณปรีชา แสงธีระปิติกุล ที่ได้กรุณาสละเวลามาเข้าร่วมสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณบูรณินท์ กัมพลพันธ์ วิศวกรพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท นวพลาสติก อุตสาหกรรม (สระบุรี) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ เครื่องมือขึ้นรูป และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย คุณ กัญญา บุญยืนวิทย์ ผู้จัดการฝ่ายเทคนิค/ผลิตภัณฑ์และประกันคุณภาพ บริษัทไทยนามพลาสติกส์ จำกัด (มหาชน) (สมุทรสาคร) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือขึ้นรูปชิ้นงาน

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายของบริษัท ไทยนามพลาสติกส์ จำกัด ที่ได้สละเวลามาช่วยเหลือในส่วนของการใช้เครื่องมือขึ้นรูปต่างๆ

ขอขอบคุณคุณ นวตล เพ็ชรวัฒนา นิสิตปริญญาเอกปี 2 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคุณ จักรกฤษณ์ เสนีตันติกุล นิสิตปริญญาโทปี 2 ที่ช่วยอนุเคราะห์ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือของห้องแล็บพอลิเมอร์

ขอขอบคุณ คุณภาภภูมิ ล่อใจ นิสิตปริญญาเอก วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลืออีกหลายท่านที่มีได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการวิจัยตลอดมาให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฌ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก .....	4
2.1.1 เมตริกซ์ (Matrix Materials) .....	4
2.1.2 วัสดุเสริม(Filler) .....	5
i) แกลบ (Rice Hull) .....	6
ii) เถ้าแกลบ(Rice Hull Ash).....	6
iii) ไม้(Wood).....	8
2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride).....	9
2.3 สารประสาน(Coupling Agents).....	10
2.3.1 ประเภทของสารประสาน.....	10
2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	13
2.4.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile property).....	13
2.4.2 การทดสอบสมบัติในการต้านแรงกระแทก (Impact property).....	13
2.4.3 การทดสอบสมบัติในการต้านทานความโค้งงอ (Flexural property) .....	15
2.5 การทดสอบเชิงความร้อน .....	16
2.5.1 การทดสอบอุณหภูมิในการโค้งงอ (Heat Deflection Temperature)	16
2.6. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	16

	หน้า
2.7งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18
3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	
3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมวัตถุประสงค์ .....	23
3.1.1 พอลิไวนิลคลอไรด์.....	23
3.1.2 วัสดุเสริม.....	23
3.1.3 สารประสาน.....	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการวิจัย.....	25
3.3 ขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	26
3.3.1 การเตรียมวัสดุเสริม.....	26
3.3.2 พอลิไวนิลคลอไรด์.....	27
3.3.3 สารประสาน.....	27
3.3.4 การผสมแห้ง PVC กับวัสดุเสริม.....	28
3.3.5 การเตรียมชิ้นงานไม้พลาสติก PVC/วัสดุเสริมเพื่อการทดสอบ.....	29
3.4 การทดสอบห่มูฟงักซ์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	31
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	32
3.5.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile property).....	32
3.5.2 การทดสอบการทนต่อการดัดโค้ง(Flexural property).....	32
3.5.3 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact property).....	33
3.5.4 การทดสอบการทนต่อการกดอัด (Compression property).....	34
3.6 การตรวจสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของชิ้นงาน.....	35
4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	
4.1 การวิเคราะห์ห่มูฟงักซ์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	36
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาของชิ้นงาน.....	40
4.3 สมบัติการทนต่อแรงกระแทก (Impact property).....	58
4.4 สมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile property).....	64
4.5 สมบัติการทนต่อการดัดโค้ง(Flexural property).....	79
4.6 สมบัติการทนต่อแรงกดอัด (Compression property).....	93
4.7 สมบัติเชิงความร้อน.....	106
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....	
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	111



รายการอ้างอิง .....	112
ภาคผนวก ก.....	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	146

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ.....	7
ตารางที่ 2.2 แสดงความแข็งแรงของไม้และความต้านทานของไม้.....	8
ตารางที่ 5.1 มอดูลัสและค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ....	110
ตาราง 5.2 มอดูลัสและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ...	111
ตาราง 5.3 มอดูลัสและค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ...	111
ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/ แกลบที่แกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.6%ปริมาณ แกลบ 20 phr.....	117
ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/ แกลบที่เถ้าแกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.6%ปริมาณ แกลบ 60 phr.....	108
ตารางที่ ก-3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/เถ้า แกลบที่เถ้าแกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8%ปริมาณแกลบ 20 phr	119
ตารางที่ ก-4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/เถ้า แกลบที่เถ้าแกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8%ปริมาณแกลบ 60 phr.....	120
ตารางที่ ก-5 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/ผง ไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ปริมาณผง ไม้ 20 phr.....	121
ตารางที่ ก-6 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/ไม้ เต็ง ที่ ไม้อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ปริมาณแกลบ 60 phr .....	122
ตารางที่ ก-7 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ แกลบ ที่ขนาดอนุภาคต่างๆที่ความเข้มข้น0.8%ปริมาณแกลบ 20 phr.....	123
ตารางที่ ก-8 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ แกลบ ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8%ปริมาณเถ้าแกลบ 60 phr .....	124
ตารางที่ ก-9 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ เถ้าแกลบ ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ปริมาณเถ้าแกลบ 20 phr....	125
ตารางที่ ก-10 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ เถ้าแกลบ ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ปริมาณเถ้าแกลบ 60 phr	126
ตารางที่ ก-11 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ ไม้เต็ง ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ปริมาณ ไม้เต็ง 20 phr.....	127

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ก-12 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกัดของไม้พลาสติกPVC/ กลบ ที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ที่ปริมาณกลบ 20 phr.....	128
ตารางที่ ก-13 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกัดของไม้พลาสติกPVC/ กลบ ที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ที่ปริมาณกลบ 60 phr	129
ตารางที่ ก-14 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกัดของไม้พลาสติกPVC/ เถ้ากลบ ที่เถ้ากลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8%ที่ปริมาณเถ้า กลบ 20 phr.....	130
ตารางที่ ก-15 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกัดของไม้พลาสติกPVC/ เถ้ากลบ ที่เถ้ากลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8%ที่ปริมาณเถ้า กลบ 60 phr.....	131
ตารางที่ ก-16 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกัดของไม้พลาสติกPVC/ ไม้เต็ง ที่ไม้เต็ง อนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 20 phr.....	132
ตารางที่ ก-17 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกัดของไม้พลาสติกPVC/ ไม้เต็ง ที่ไม้เต็งอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ที่ปริมาณผง ไม้ 60 phr.	133
ตารางที่ ก-18 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/กลบที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณกลบ 20 phr.....	134
ตารางที่ ก-19 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/กลบที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณกลบ 20 phr.....	134
ตารางที่ ก-20 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/กลบที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณกลบ 20 phr.....	134
ตารางที่ ก-21 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/กลบที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณกลบ 20 phr.....	135
ตารางที่ ก-22 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/กลบที่กลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณ กลบ 20 phr.....	135





ตาราง	หน้า
ตารางที่ ก-45 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ไม้เต็งที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณไม้เต็ง 60 phr.....	144
ตารางที่ ก-46 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ไม้เต็งที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณไม้เต็ง 60 phr.....	145
ตารางที่ ก-47 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ไม้เต็งที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณไม้เต็ง 60 phr.....	145

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์.....	9
รูปที่ 2.2 ทดสอบแรงดึง (Tensile strength).....	13
รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact pendulum).....	14
รูปที่ 2.4 ทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural Properties).....	15
รูปที่ 2.5 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	17
รูปที่ 3.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ เกรด K 66.....	22
รูปที่ 3.2 ผงแคลบ (ก) ผงเถ้าแคลบ (ข) และผงไม้เต็ง (ค).....	23
รูปที่ 3.3 เครื่องบดละเอียดและ (ข) เครื่องคัดขนาดอนุภาค.....	25
รูปที่ 3.4 สารประสาน (Z-6020).....	26
รูปที่ 3.5 การเคลือบวัสดุเสริมด้วยสารประสาน.....	26
รูปที่ 3.6 เครื่องผสมแห้ง(Dry Blender).....	27
รูปที่ 3.7 เครื่องHydraulic press.....	28
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปเพื่อทดสอบ.....	29
รูปที่ 3.9 เครื่อง Perkin Elmer FT-IR Spectrometer .....	30
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานขณะทดสอบแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine.....	31
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานขณะทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3-point bending ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine.....	32
รูปที่ 3.12 เครื่องImpact tester .....	33
รูปที่ 3.13 แสดงการวางชิ้นงานทดสอบการทนต่อแรงกระแทกด้วยเครื่องImpact tester .....	33
รูปที่ 3.14 แสดงการทดสอบการทนต่อการกดอัด.....	33
รูปที่ 3.15 เครื่องScanning Electron Microscope (SEM).....	34
รูปที่ 4.1 FT-IR ของPVC/ผงแคลบปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน.....	36
รูปที่ 4.2 FT-IR ของ PVC/ผงเถ้าแคลบปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน.....	37
รูปที่ 4.3 FT-IR ของPVC/ผงไม้เต็งที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน.....	38
รูปที่ 4.4a แสดงภาพการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคแคลบ.....	40
รูปที่ 4. 4b แสดงภาพการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคเถ้าแคลบ .....	41
รูปที่ 4. 4c แสดงภาพการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคไม้เต็ง .....	42
รูปที่ 4.4ก แสดงภาพการยึดติระหว่างเฟสของแคลบ ขนาด 45 $\mu$ m, 20 phr(Untreated).....	43
รูปที่ 4.4ข แสดงภาพการยึดติระหว่างเฟสของแคลบ ขนาด 45 $\mu$ m , 0.2%, 20 phr(treated)...	
รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการยึดติระหว่างเฟสของแคลบ ขนาด 45 $\mu$ m, 1.0%, 20 phr(treated).....	





ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.4ศ แสดงภาพการกระจายตัวของไม้เต็งขนาด 250 $\mu$ m, 60 phr(Untreated).....	56
รูปที่ 4.4ข แสดงภาพการกระจายตัวของไม้เต็ง ขนาด 250 $\mu$ m,0.2%, 60 phr(treated).....	
รูปที่ 4.4ส แสดงภาพการกระจายตัวของไม้เต็ง ขนาด 250 $\mu$ m,1.0%, 60 phr(treated).....	
รูปที่ 4.5 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบที่ขนาดต่างๆ และที่ปริมาณ20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%.....	57
รูปที่ 4.5 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบที่ขนาดต่างๆ และที่ปริมาณ20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%.....	59
รูปที่ 4.6 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็งที่ขนาดต่างๆ และที่ปริมาณ20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%.....	61
รูปที่ 4.7 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็งที่ขนาดต่าง และที่ปริมาณ20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%.....	63
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	64
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	65
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบที่ ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	66
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	67
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0.6-0.8%.....	68
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบที่ขนาด ต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0.6-0.8% . . . . .	68
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	69
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	70
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%.....	71







ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของ ไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน0.6%.....	104
รูปที่ 4.61 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของ ไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.6% ...	105

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้ไม้ทั่วโลกมีมากขึ้นทุกปี ทั้งการใช้เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เฟอร์นิเจอร์ตกแต่ง ทั้งภายนอกและภายในบ้าน และการใช้ในงานก่อสร้าง ส่งผลให้พื้นที่ป่าไม้ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไม้จากธรรมชาติมีอยู่ในปริมาณจำกัด จึงเกิดภาวะการขาดแคลน ส่งผลให้ไม้จากธรรมชาติมีราคาสูงขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมที่ผลิตวัสดุเพื่อทดแทนไม้จากธรรมชาติ เช่น อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก (Wood Plastic Composites, WPC) เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง การศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุที่จะใช้ทดแทนไม้จึงจำเป็นอย่างยิ่ง ถือได้ว่าเป็นการนำเอาความรู้ทางไม้และทางพลาสติกมาผสมผสานทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ สามารถนำมาใช้งานได้จริงในระดับเดียวกับวัสดุวิศวกรรมอื่นๆ เช่น โลหะ ไม้ ฯลฯ

ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก เกิดจากการนำวัสดุต่างชนิดมาประกอบอยู่ด้วยกัน โดยมีโครงสร้างแบบต่างๆ วัสดุหลัก คือ พอลิเมอร์ เรียกเป็นเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Matrix) เพราะเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous Phase) ใช้ได้ทั้งเทอร์โมเซต (Thermosets) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) หรือยาง (Rubber) ตัวอย่างเช่น พอลิพอร์พิลีน (PP), พอลิเอทิลีน (PE), พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), พอลิสไตรีน (PS) เป็นต้น และวัสดุเติมเพื่อประกอบอยู่กับพอลิเมอร์ คือ วัสดุเสริม (Filler) ซึ่งอาจเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) หรือเป็นผงละเอียด (Particulate) เช่น ผงไม้ ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผงแก้ว ผงคาร์บอน เป็นต้น เนื่องจากว่าวัสดุเหล่านี้มีสมบัติเฉพาะตัวที่น่าสนใจ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีความแข็ง เนื่องจากมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่จำนวนมาก ผงไม้เนื้ออ่อนหรือไม้เนื้อแข็ง เป็นวัสดุเสริมแรงให้แก่พอลิเมอร์ เนื่องจากไม้เป็นพืชที่มีเซลลูโลส ลิกนิน สามารถสร้างความแข็งแรงให้กับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกได้ วัสดุเสริมเหล่านี้สามารถหาได้ง่าย เพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม จาก การก่อสร้างต่างๆ ทำให้มีเศษไม้ ขี้เลื่อย ที่เหลือจากแปรรูปไม้ในรูปแบบต่างๆ สามารถนำมาเป็น ตัวเติมแต่งได้ วัสดุเหล่านี้มีราคาถูกมากจึงสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตไม้พลาสติกได้ และใน ขณะเดียวกัน การใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์ต่อเนื่องในอุตสาหกรรมอื่นยังเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ได้ด้วย การเติบโตทางด้านเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบันทำให้อุปสงค์ละ อุปทานของการใช้ไม้ไม่สมดุลกัน ทำให้ความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมากขึ้น เนื่องจากสามารถใช้ทดแทนไม้ธรรมชาติได้ดีโดยไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการผลิต สามารถแปรรูปให้อยู่ในขนาดและลักษณะต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน มีน้ำหนักเบา ดูแลรักษาง่ายกว่าไม้

ธรรมชาติ ทนต่อการผุพังและมีอายุการใช้งานนาน ไม่มีปัญหาในเรื่องของปลวกและแมลง ทนทานต่อการถูกทำลายจากสภาวะแวดล้อมและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม แต่ปัญหาของ WPC คือ ขาดการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์และวัสดุเสริม ปัญหาการกระจายตัวของวัสดุเสริม สมบัติด้านความมีขี้้ว(Polar) ของพอลิเมอร์และไม่มีขี้้ว(Non-polar) ของวัสดุเสริม การที่พอลิเมอร์เป็นวัสดุ (Hydrophobic) ที่ไม่ชอบน้ำและแต่วัสดุเสริมแรง เช่น ผงไม้ เป็นวัสดุประเภทที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อนำมาผสมกันและขึ้นรูปเป็นไม้พลาสติก ทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ได้ยังไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น จึงควรต้องมีการเติมสารประสาน(Coupling agents) เพื่อช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างทั้งสององค์ประกอบให้ดีขึ้น โดยที่ส่วนหนึ่งของโมเลกุลของสารประสานสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์และอีกส่วนหนึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุเสริม โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเข้ามาช่วยในการยึดเกาะดีขึ้น เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล

ปัจจุบันไม้พลาสติกที่ผลิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจาก PVC เป็น Commodity Plastic ที่ประเทศไทยสามารถผลิตได้มาก จนสามารถตอบสนองความต้องการในประเทศได้ PVC มีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมได้ดี มีความต้านทานต่อสารเคมีและน้ำ สามารถเติมสี สารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความแข็งและคงตัว หรืออ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากๆ นอกจากนี้ PVC ยังมีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Commodity Plastic ชนิดอื่นเช่น PE, PP,PS เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไม้พลาสติกจาก PVC ไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมชิ้นส่วนก่อสร้างและการตกแต่งอาคารบ้านเรือน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ ได้แก่

- 1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของสารประสานต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารประสานต่อผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตรอบคลุม ดังนี้

- 1.3.1. ผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติกที่ศึกษาเตรียมจาก PVC ที่เป็นเมตริกซ์ มี 3 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ใช้ผงแคลบ ผงเถ้าแคลบและผงไม้เป็นวัสดุเสริมเพื่อผลิตเป็น ไม้พลาสติก PVC/แคลบ PVC/เถ้าแคลบ และPVC/ผงไม้

- 1.3.2 อัตราส่วน PVC:วัสดุเสริม ของแต่ละระบบ คือ 80:20 และ 40:60
- 1.3.3 สารประสาน (Coupling agents) ที่ศึกษาได้แก่ สารกลุ่ม Aminosilane Coupling agent คือ N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane
- 1.3.4 ความเข้มข้นของสารประสานที่ศึกษาคือระหว่าง 0-1.0% โดยน้ำหนัก
- 1.3.5 สมบัติเชิงกลที่ศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง (Tensile Properties), สมบัติด้านแรงกด (Compressive Properties), สมบัติด้านการกระแทก (Impact Properties) และสมบัติด้านการดัดโค้ง (Flexural Properties)
- 1.3.6 สมบัติทางความร้อนที่ศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature), อุณหภูมิในการโค้งงอ (Heat Deflection Temperature)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ คาดว่าจะช่วยให้เกิด

- 1.4.1 ความเข้าใจอิทธิพลของสารประสานกลุ่มอะมิโนไซเลนต่อผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจาก PVC กับผงแคลส ผงเถ้าแคลสและผงไม้
- 1.4.2 แนวทางการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่าง PVC กับวัสดุทางธรรมชาติ โดยใช้สารประสานกลุ่มอะมิโนไซเลน เพื่อพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่ง
- 1.4.3 เพิ่มสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจาก PVC



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ทฤษฎี

##### 2.1 วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก

เนื่องจากข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ในทางวิศวกรรมเพราะพอลิเมอร์มีความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะมาก จึงมีการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเพื่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น คือ วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก เป็นวัสดุที่มีหลายเฟส เกิดจากการผสมพอลิเมอร์ไม่ว่าจะเป็นเทอร์โมเซต(Thermoset) หรือเทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic) ที่เรียกว่าเมทริกซ์(matrix) ซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง(Continuous phase) โดยทั่วไปจะเป็นพอลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์ (Commodity plastic) เช่น พอลิโพรพิลีน(PP) หรือพอลิเอทิลีน(PE) หรือพอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) กับวัสดุเสริม (Filler) เช่น แกลบ ถั่วแกลบ ผงไม้เนื้ออ่อน ผงไม้เนื้อแข็ง ใยสังเคราะห์ เช่น ป่าน ปอ ฝ้าย ผักตบชวา ต้นและซังข้าวโพด เป็นต้น เพื่อผลิตวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลเด่นจากการผสมผสานสมบัติของวัสดุที่นำมาผสม โดยการอัดรีดหรือการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอื่น ๆ มักมีการเติมสารเติมแต่ง(Additives) เช่น สารทำให้อ่อนตัว(Softener) สารทำให้เสถียร(Stabilizer) สารหล่อลื่น(Lubricant) สารสี(Colorant) สารประสาน(Coupling Agent) สารเป่าโฟม (Foaming Agent) เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นได้ตามต้องการ

##### 2.1.1 เมทริกซ์ (Matrix Materials)

พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมพลาสติกในเชิงพาณิชย์ซึ่งผลิตได้ง่าย ราคาถูก นิยมใช้ในการผลิตวัสดุประกอบแต่ง ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กันมากคือ PE ซึ่งเป็นเม็ดพลาสติกที่สำคัญและมีการใช้แพร่หลายที่สุด PP PVC และไนลอน(Nylon) เป็นต้น ข้อได้เปรียบของการใช้เทอร์โมพลาสติกเหนือเทอร์โมเซต คือสามารถขึ้นรูปโดยเทคนิคการฉีดเข้าบ้ำ (Injection) และการอัดรีด (Extrusion) ที่ใช้กันทั่วไปได้ ทำให้ลดต้นทุนการแปรรูป สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ และผลิตในปริมาณมากๆ ได้ แต่การขึ้นรูปวัสดุประกอบแต่ง จะต้องพิจารณาผลของสารตัวเติมที่ผสมเข้าไป เนื่องจากทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเพิ่มขึ้นและทำให้เครื่องขึ้นรูปสึกหรอได้ง่ายเนื่องจากความมีเหลี่ยมคมของสารตัวเติมบางชนิด เช่น เส้นใยแก้ว

สั้น (chopped strand glass fiber) และซิลิกา เป็นต้น ดังนั้นในบางกรณีจึงต้องมีการออกแบบเครื่องมือสำหรับขึ้นรูปวัสดุประกอบแต่งโดยเฉพาะ[19]

ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกที่นิยมนำมาทำเป็นเมทริกซ์ ได้แก่ พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone, PEEK) เป็นพอลิเมอร์ที่ทนแรงกระแทกได้ดี และทนต่อตัวทำละลายดีมาก พอลิอิมิด (Polyamide, PI) ใช้ในการผลิตวัสดุใช้ในอุตสาหกรรมยานอวกาศ เนื่องจากแปรรูปได้ง่าย และทนต่อความร้อนสูง เป็นต้น

### 2.1.2 วัสดุเสริม (Fillers)

วัสดุเสริมแรง คือ วัสดุที่เติมลงไปเป็นองค์ประกอบของการผลิต ที่มีโครงสร้างแตกต่างจากพลาสติก อาจจะช่วยทำให้คุณสมบัติทางเชิงกลและทางกายภาพดีขึ้น เช่น ช่วยเพิ่มการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มค่า Modulus of elasticity การทนต่อแรงกดอัด (Compressive strength) ความแข็ง (Hardness) และ stiffness ให้สูงขึ้น

ปกติผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งพอลิเมอร์จะมีสมบัติดีกว่าวัสดุพื้นฐานที่เป็นองค์ประกอบ แต่สมบัติเชิงกลก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ

i) การกระจายตัวหรือการจัดเรียงตัว (Orientation) สารเสริมแรงจะมีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ใน 2 รูปแบบคือ แบบมีทิศทางเป็นระเบียบ (Oriented) และแบบสุ่ม ไม่มีทิศทางแน่นอน (Random) ตามปกติการเรียงตัวของสารเสริมแรงพวกเส้นใย จะมีทิศทางเป็นระเบียบในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จึงเสริมให้เกิดความแข็งแรงในทิศทางของการเรียงตัวนั้นเป็นอย่างมาก

ii) แรงกระทำ ระหว่างผิวสัมผัสของสารเสริมแรงกับเมทริกซ์ (Interaction) แรงกระทำระหว่างผิวสัมผัสของสารเสริมแรงกับเมทริกซ์นี้ คือความสามารถในการเกาะยึดตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์โดยทั่วไป มินเนอรัลฟิลเลอร์ส่วนใหญ่ก็มีหมู่อะมิโนที่มีขั้ว เช่น หมู่อไฮดรอกซิลบนพื้นผิว ทำให้เปียกน้ำได้ง่ายแต่ไม่ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งพื้นผิว (Treat) ของวัสดุเสริมเพื่อให้ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

วัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการผลิตวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) วัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใย โดยเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด และเส้นใยจากวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งจะต้องมีการเตรียมเส้นใยในลักษณะต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานต่อไปและ

2) วัสดุเสริมแรงชนิดผงละเอียด (Particulate Reinforcements) มักจะเป็นวัสดุจากจากหินแร่ เช่น ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต วัสดุทางธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ ถั่วแกลบ ผงไม้ เป็นต้น

### i) แกลบ

แกลบหรือเปลือกข้าว คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวไว้ ลักษณะทั่วไป มีขนาดเล็ก สีเหลืองยาวไม่เกิน 5 มม. และหนาไม่เกิน 2 มม. ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในการสีข้าว เป็นวัสดุจากการเกษตรได้จากโรงสีข้าว มีปริมาณมากในประเทศไทย ราคาถูก แกลบสามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น เป็นเชื้อเพลิง ผสมลงในดินเพื่อปรับสภาพดินก่อนเพาะปลูก[20] เมื่อนำไปเผาจะมีปริมาณขี้เถ้า 16-18 % โดยน้ำหนัก มีสมบัติเป็นฉนวนจึงไม่นำไฟฟ้าและความร้อน ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี สลายตัวได้ช้า เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่สำคัญ พบได้ทั่วไปในแหล่งแร่ธรรมชาติ นอกจากนี้ ซิลิกา ยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นและสารเคมีได้ดี นิยมใช้เป็นสารดูดความชื้น ซึ่งใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารและยา ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ ใช้เป็นตัวทำให้สารบริสุทธิ์ (refining agent) ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวตรึง ใช้เป็นสารช่วยเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี และใช้ผลิตสารซิลิกอนบริสุทธิ์ เพื่อผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

### องค์ประกอบของแกลบ

จากการสำรวจข้าวจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลก สามารถสรุปองค์ประกอบต่างๆ ของแกลบเป็นค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (คิดเป็นเซลลูโลสร้อยละ 38 ลิกนินร้อยละ 22 และเพนโทแซนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก) ส่วนที่เหลือเป็นสารอนินทรีย์ ประกอบด้วยซิลิกามากกว่าร้อยละ 95 เป็นสารประกอบหลัก ซึ่งมีธาตุซิลิกอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีชื่อเรียกทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ และมีสารอนินทรีย์อื่นๆ อีกร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แกลบมีความชื้นต่ำไม่เกิน 15 % ซึ่งความแตกต่างขององค์ประกอบต่างๆ ในแกลบนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการเพาะปลูก ปัจจัยทางภูมิศาสตร์ ปีที่เพาะปลูก การเตรียมตัวอย่าง และวิธีวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

### ii) เถ้าแกลบ

เกิดจากจากนำเอาแกลบมาเผา ทำให้คาร์บอนที่เป็นขององค์ประกอบหนึ่งในแกลบถูกเผาไหม้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่คงเหลือแต่ซิลิกอนในรูปของซิลิกา ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงสารอินทรีย์จะ oxidize กลายเป็น  $\text{CO}_2$  จะกลายเป็นสีขาว มีองค์ประกอบของ  $\text{SiO}_2$  มากกว่า 80 % ขึ้นไป[21] ซึ่งองค์ประกอบหลักส่วนที่เป็นซิลิกานี้ส่งผลให้มีการนำเอาเถ้าแกลบไปใช้มากมาย เช่น ทำเป็นส่วนประกอบของก๊อสนิเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ใช้เป็นวัสดุในการเตรียมซิลิกา ตัวดูดซับและวัสดุเรซินแก่พอลิเมอร์

## องค์ประกอบของถ้ำกลบ

เมื่อเผาถ้ำกลบจะได้ถ้ำกลบ มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 80 % ขึ้นไป นับว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญและมีปริมาณมากอีกแหล่งหนึ่งสำหรับการผลิตซิลิกานอกเหนือไปจากทราย ปัจจุบันประเทศไทยส่งถ้ำกลบไปขายยังต่างประเทศในราคาที่ค่อนข้างถูก แต่ถ้ำกลบมาผ่านกระบวนการทางเคมีและการเผาที่เหมาะสมจะให้ถ้ำกลบที่มีซิลิกาความบริสุทธิ์มากขึ้นถึงร้อยละ 90-99 โดยน้ำหนัก ถ้ำกลบที่ผ่านการเผาจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา กรรมวิธีการเตรียม และการเผาถ้ำกลบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

i) ถ้ำกลบสีดำ เกิดจากการเผาถ้ำกลบที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีคาร์บอนเหลืออยู่มาก ถ้ำกลบลักษณะนี้นำไปทำสารดูดสี คาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon)

ii) ถ้ำกลบสีขาว เกิดจากการเผาถ้ำกลบที่อุณหภูมิสูงและมีอากาศเพียงพอ ถ้ำกลบชนิดนี้ใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุทนไฟโดยสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส ใช้หลอมเหลวในการทำแก้วแทนทรายขาวหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบต่างๆ

จากตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกลบ

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกลบ[20]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	86.30-97.30
K <sub>2</sub> O	0.58-2.50
Na <sub>2</sub> O	0.00-1.75
CaO	0.20-1.50
MgO	0.12-1.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	เล็กน้อย-0.54
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20-2.85
Cl	เล็กน้อย-0.42

### 2.1.3 ไม้ (Wood)

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติ ที่มีความสำคัญในการก่อสร้าง เพราะมีน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับโลหะและคอนกรีต ตัดกลึงหรือเปลี่ยนรูปได้ง่าย มีความสวยงาม ตลอดจนสามารถปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นได้ ข้อเสียของไม้ คือ มีความแข็งแรงต่ำและมีสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน (anisotropic) นอกจากนั้นในไม้ชนิดเดียวกันก็อาจมีความแตกต่างกันมากในด้านสมบัติเชิงกลซึ่งขึ้นกับคุณภาพของไม้แต่ละท่อน ลักษณะการเลื่อย อายุของไม้ เป็นต้นไม้จำแนกแบ่งเป็นไม้เนื้ออ่อน(Softwood) ซึ่งปกติเป็นไม้ใบแคบ และไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ซึ่งเป็นไม้ใบกว้าง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงแยกประเภทของไม้ออกเป็น 3 ประเภท โดยถือเอาค่าความแข็งแรงในการตัดไม้และความทนทานตามธรรมชาติของไม้นั้นๆเป็นเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ไม้เนื้อแข็ง มีหลายชนิด เช่น ไม้เต็ง ไม้ประดู่ ไม้มะค่า ไม้ตะแบก ไม้ตะเคียน ไม้รัง ไม้แดง ซึ่งมีคุณสมบัติและประโยชน์ที่ควรทราบดังต่อไปนี้

ไม้เต็ง เป็นต้นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ขึ้นเป็นหมู่ตามป่าเต็งทั่วไปกว้นภาคใต้ ลักษณะเนื้อไม้เป็นสีน้ำตาลอ่อนเมื่อแรกตัดทิ้งไว้นานจะเป็นสีน้ำตาลแก่แกมแดง เสี้ยนสับสน เนื้อหยาบแต่สม่ำเสมอแข็งแรงเหนียวแข็งแรงและทนทานมากแห้งแล้วเลื่อยไสกบตกแต่งได้ยาก น้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 1,040 กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร ใช้ทำหมอนรองรถไฟเครื่องมือกลึงกรรมโครงสร้างอาคาร เช่น ตง คาน วงกบ ประตูหน้าต่าง โครงหลังคาเสา

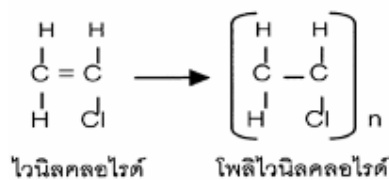
และยังมีไม้เนื้อแข็งปานกลาง เช่น ไม้ยาง ไม้กระบาก ไม้มะม่วง ไม้กระท้อน และไม้เนื้ออ่อน เช่น ไม้สักขาว ไม้ก้านเหลือง ไม้มะยมป่า ไม้ต้นมะพร้าว เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงความแข็งแรงของไม้และความต้านทานของไม้

ประเภทไม้	ความแข็งแรง (kg.cm <sup>2</sup> )	ความทนทาน (ปี)
ไม้เนื้อแข็ง	> 1000	> 6
ไม้เนื้อแข็งปานกลาง	600 – 1000	2 – 10
ไม้เนื้ออ่อน	< 600	< 2

## 2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride)

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะสายโซ่ตรงในกลุ่มไวนิล มีคลอรีนเกาะอยู่ในสายโซ่โมเลกุล การมีหมู่คลอรีนเป็นหมู่อิสระบนสายโซ่หลักทำให้พีวีซีมีสมบัติแตกต่างจากพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีน เนื่องจากอะตอมคลอรีนมีขนาดค่อนข้างใหญ่ จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพีวีซี มีความว่องไวต่อตัวทำละลายซึ่งมีผลต่อการประยุกต์ใช้งานและทำให้มีสมบัติที่แตกต่างไปจากพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ คือ มีความแข็งแรงเชิงกลเนื่องจากเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุกรมอิสระ โดยใช้เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension Polymerization) อิมัลชัน (Emulsion Polymerization) บัลค์ (Bulk Polymerization) หรือแบบสารละลาย (Solution Polymerization) สมบัติโดยทั่วไปของพีวีซี คือ มีลักษณะเป็น ผงละเอียด หรือเป็นเม็ด มีความแข็งแรงสูง เหนียว ทนต่อการติดไฟ ทนทานต่อสภาวะอากาศและสิ่งแวดล้อมปกติ ทนต่อสารเคมีสูง ทำความสะอาดได้ง่าย จะถูกใช้อย่างแคบมากถ้าไม่มีการเติมสารปรับแต่งคุณภาพต่างๆ เช่น Plasticizers, Heat stabilizers, Lubricants, Fillers และ Pigments ต่างๆ เช่น Plasticizers ซึ่งจะมีผลต่อค่า Tensile strength ของพีวีซีมีสมบัติการเป็นเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี โปร่ง และมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง เนื่องจากมีสารทำให้อ่อนเจือปนอยู่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ประมาณ 180-210 องศาเซลเซียส นิยมขึ้นรูปเป็นแบบ ท่อ ฟิล์มและแผ่น ตัวอย่างการใช้งานของพอลิไวนิลคลอไรด์ เช่น ท่อน้ำ ท่อความดัน ขวดน้ำมันพืช ขวดแชมพู ของเล่นเด็ก กระเป๋าถือของสตรี กระเป๋าเดินทาง กระเป๋าใส่สตางค์ เข็มขัด รองเท้ากันน้ำ รองเท้าหนัง ส้นรองเท้า พลาสติกหุ้มสายไฟ สายเคเบิล เป็นต้น



รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์

สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลคลอไรด์ คือ มีความแข็งแรงดี ทนทานต่อสภาวะปกติ ต้านทานต่อสารเคมีและน้ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี เช่น ทำปลอกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล สามารถผสมสีและแต่งสีได้อย่างไม่จำกัด สามารถเติมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรุงแต่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่แข็งและคงตัว จนถึงอ่อนนุ่ม และยืดหยุ่นมาก เป็นต้น

### 2.3 สารประสาน (Coupling Agents)[16]

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โดยการเติมวัสดุเสริมแรงซึ่งจะเป็นอนุภาคหรือเส้นใยเสริมแรงนั้น ผลลัพธ์ประกอบแต่งที่ได้จะมีสมบัติดี ถ้าวัสดุเสริมแรงกระจายตัวหรือยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี วิธีการหนึ่งที่นิยม คือ การเคลือบหรือปรับแต่งพื้นผิว(Treat)ของวัสดุเสริมแรงด้วยสารเคมีที่สามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งพอลิเมอร์และวัสดุเสริมแรง ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริก เมื่อนำไปผสมกับพอลิเมอร์ หมู่กรดจะทำหน้าที่ยึดเกาะกับอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่สายโซ่อะลิฟาติกสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับพอลิเมอร์ ส่งผลให้แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวในพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ดี

นอกจากการใช้สารปรับแต่งพื้นผิว ยังใช้สารเติมแต่งอีกประเภทหนึ่ง คือ สารประสาน (Coupling agent) ซึ่งสารประเภทนี้ จะทำหน้าที่เป็นสะพานหรือเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุเสริม โดยการสร้างพันธะทางเคมีกับเฟสทั้งสอง ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพให้ดีขึ้น โดยสารประสานซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับวัสดุเสริมส่วนสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยาเข้ากับพอลิเมอร์

**กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างวัสดุเสริมกับพอลิเมอร์โดยสารประสาน**

สารประสานมีสูตรทั่วไปคือ  $(R'O)_x-M-(R-X)_y$  โดย

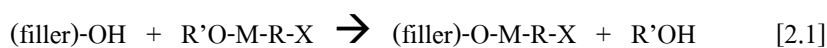
M คือ โลหะ ได้แก่ ซิลิกอน ไททานเนียม หรือเซอร์โคเนียม

X เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ เช่น หมู่ไวนิล  
หมู่อะมิโน เป็นต้น

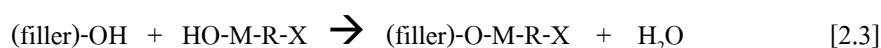
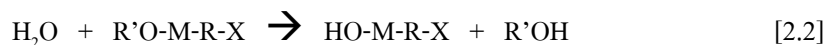
R เป็นหมู่อินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ M

R'O เป็นหมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับวัสดุเสริมแรง

การยึดเกาะระหว่างสารประสานและวัสดุเสริมแรง อาจเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างหมู่ OR' ของสารประสานกับหมู่ OH ที่พื้นผิวของวัสดุเสริมแรง ดังแสดงในสมการที่ [2.1]



หรืออาจเกิดจากการที่หมู่ OR' ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้นที่พื้นผิววัสดุเสริมแรง ได้เป็นหมู่ OH ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปกับวัสดุเสริมแรง ดังแสดงในสมการ



สำหรับการยึดเกาะระหว่างสารประสานและพอลิเมอร์เกิดจากหมู่ X ของสารประสานเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ โดยหมู่ X มีแตกต่างกันหลายชนิดเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น

สารประสานที่หมู่ X คือ หมู่ไวนิลหรือหมู่อะคริลิล (Acrylyl) ก็จะถูกนำไปใช้กับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวหรือพอลิโอเลฟินส์ชนิดเชื่อมขวาง (Crosslinked polyolefins) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารประสานกับพอลิเมอร์เป็นแบบฟรีเรดิคัล หรือถ้าหมู่ X คือหมู่อะมิโน ก็จะนำสารประสานชนิดนี้ไปใช้กับอีพอกซีเรซินหรือพอลิเอไมด์ เป็นต้น

การใช้สารประสานมี 2 วิธี คือ

- นำไปเคลือบหรือปรับแต่งที่พื้นผิวของสารเดิมแต่งแล้วจึงนำไปผสมกับพอลิเมอร์
- ผสมกับพอลิเมอร์โดยตรงระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

สำหรับสารประสานที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ได้แก่

### 2.3.1 ประเภทของสารประสาน[16]

i) **สารโครเมียมเชิงซ้อน (Chrome complexes)** สารโครเมียมเชิงซ้อนเป็นสารประสานชนิดแรกที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส สารโครเมียมเชิงซ้อนช่วยให้ใยแก้วยึดเกาะกับพอลิเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว โดยการสร้างพันธะ Cr-O-Si ระหว่างตัวมันและพื้นผิวใยแก้ว และยึดติดกับพอลิเอสเทอร์จากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ methacryl กับพันธะคู่ในพอลิเอสเทอร์

ปัจจุบันนี้แทบไม่มีการใช้สารโครเมียมเชิงซ้อน แต่จะใช้ไซเลนหรือสารประสานชนิดอื่นๆ แทน

ii) **ไซเลน (Silanes)** โดยทั่วไปโครงสร้างของไซเลน คือ  $(RO)_3Si-Y$  ซึ่ง Y หมายถึง หมู่อินทรีย์เคมีที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่อีพอกซี หมู่ mercapto จะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ส่วนหมู่เคมี RO ได้แก่ หมู่อัลคอกซี (Alkoxy) หรือหมู่อะซิโทกซี (Acetoxy) ซึ่งจะเกิดพันธะกับน้ำ (Hydrolysis) เปลี่ยนเป็นหมู่ไซเลนอล (Silanol,  $(Si(OH)_3$ ) เกาะกับผิวอนุภาคหมู่เคมีทั้ง 2 ชนิดนี้ สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอนอิสระที่อยู่บนพื้นผิวอนุภาคที่บริเวณผิวสัมผัสแล้วเกิดเป็นชั้นเคลือบที่ผิวมีขนาดเป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monomolecular layer) ซึ่งเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี

ไซเลนที่ผลิออกจำหน่ายในทางการค้ามีหมู่ฟังก์ชัน (หมู่ Y) แตกต่างกันหลายแบบเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยนิยมใช้มากในการเสริมแรงเทอร์โมพลาสติกด้วยการเคลือบสารเดิมแต่งด้วยไซเลนหรือการผสมลงในพอลิเมอร์ก่อนที่จะทำการผสมวัสดุเสริม ตัวอย่าง เช่น ไซเลนที่ประกอบด้วยหมู่ไวนิล ถูกนำไปใช้กับพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ในขณะที่ ไซเลนที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซีหรือหมู่อะมิโน จะนำไปใช้กับพอลิเอไมด์ อีพอกซีเรซินหรือพอลิยูรีเทนชนิดเทอร์โมเซต ตัวอย่างของไซเลนที่ใช้กันส่วนใหญ่ ได้แก่ Vinyl-



triethoxysilane, Vinyl-tris(2-methoxy) silane, Aminopropyltriethoxy, Glycidoxytriethoxy Silane, Mecraptopropyltrimethoxy

เป็นต้น

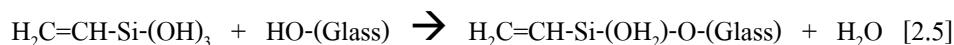
การใช้ไซเลนจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อนำไปใช้เป็นสารประสานต่อสำหรับ ซิลิกา แก้ว อะลูมินา และอะลูมิโนซิลิเกต ในทางตรงกันข้าม เมื่อนำไปใช้กับแคลเซียมคาร์บอเนต ไซเลนจะไม่มีประสิทธิภาพเลย

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ

ขั้นที่ 1 หมู่เอธอกซีถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH)



ขั้นที่ 2 ซิลานอลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ที่พื้นผิวของใยแก้ว เกิดเป็นพันธะ Si-O-Si ระหว่างสารประสานกับใยแก้ว



ในขณะที่เดียวกันหมู่ไวโนลจะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสารประสานกับพอลิเมอร์ โดยวิธีการนี้จึงทำให้ใยแก้วมีแรงยึดกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ดี

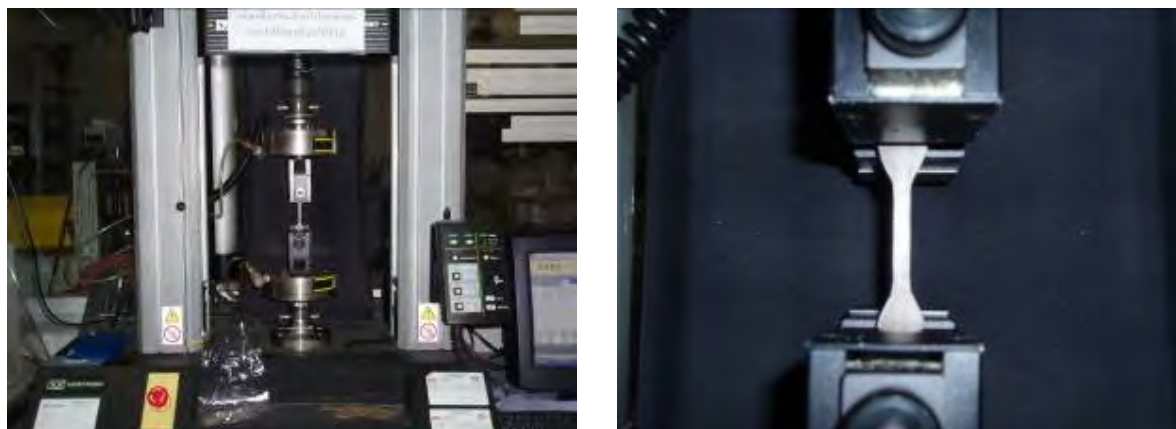
**iii) ไททานเตต (Titanates)** ไททานเตตเป็นสารประสานที่ผลิตขึ้นเพื่อนำไปใช้กับสารเติมแต่งจำพวกแร่เป็นส่วนใหญ่ (โดยเฉพาะ  $\text{CaCO}_3$ ) มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{RO-Ti}(\text{O-X})_3$  โดยหมู่ OR จะถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นหมู่ OH ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปกับหมู่ OH ที่พื้นผิวของสารเติมแต่ง เกิดเป็นพันธะ TiO เชื่อมระหว่างสารประสานกับสารเติมแต่ง ส่วน X ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างเช่น หมู่เอสเตอร์ หมู่ฟอสเฟต หมู่ไพโรฟอสเฟต หมู่ซัลโฟเนต หรือหมู่อะมิโน เป็นต้น ไททานเตตช่วยให้สารเติมแต่งยึดเกาะได้ดีขึ้นโดยใช้หลักการเช่นเดียวกับไซเลน ผลที่ได้คล้ายกับการใช้ไซเลนแต่สามารถใช้ได้กับ filler ที่มีกลุ่ม OH อยู่ด้วย แต่ปริมาณการใช้น้อยกว่าไซเลนมาก ข้อดีของไททานเตตคือ เมื่อนำไปใช้กับพอลิเมอร์ที่ใส่สารประกอบฟีนอลิก (ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกันออกซิเดชันหรือสารเพิ่มเสถียรภาพ) จะมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสีได้

## 2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

### 2.4.1 การทดสอบแรงดึง

เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ โดยการดึงชิ้นงานให้ยืดออกจนขาด นิยมทดสอบการดึงยึดตามมาตรฐาน ASTM 638 โดยใช้เครื่อง Instron Universal Tester ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปคัมเบลล์(Dumbell) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความยาวที่เปลี่ยนหรือระยะยืด ทำให้สามารถตรวจวัดความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์

โดยสมบัติเชิงกลเหล่านี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ ความเร็วในการทดสอบ ดังนั้นจึงกำหนดให้ ความเร็วและอุณหภูมิทดสอบตามมาตรฐาน



รูปที่ 2.2 ทดสอบแรงดึง (Tensile strength)

### 2.4.2 การทดสอบการทนแรงกระแทก (Impact resistance testing)

เป็นการทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงานของพอลิเมอร์ โดยการทดสอบการทนแรงกระแทกมี 2 รูปแบบ คือ แบบให้น้ำหนักตกบนชิ้นงานตัวอย่าง (Falling weight test) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 1709 เป็นการปล่อยมวลทรงกลมที่ระดับความสูงต่างๆลงบนชิ้นงานเพื่อดูลักษณะของการแตกร้าวของชิ้นงานหรือการแตกแบบต่างๆ และแบบพอนด์ (pendulum test) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 เป็นการคำนวณปริมาณพลังงานของพอนด์ที่เหวี่ยงไปตีชิ้นงาน ผลที่ได้คือพลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ก่อนที่ชิ้นงานจะขาดออกจากกัน ในวัสดุที่เปราะ (brittle) พลังงานที่ทำให้เกิดการแตกดำเนินไปมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มแตกในทางตรงกันข้ามวัสดุที่เหนียว (tough) จะสามารถดึงเป็นเส้นได้(ductile) จะใช้พลังงานที่

ทำให้เกิดการแตกดำเนินไปมากกว่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มแตก ดังนั้น พลังงานที่เกี่ยวข้องในการวัด ได้แก่ พลังงานที่ทำให้เกิดการแตกดำเนินไปเป็นพลังงานที่ทำให้แขนของหมอนสั้นและพลังงานที่หายไปเมื่อหมอนกระทบชิ้นงาน

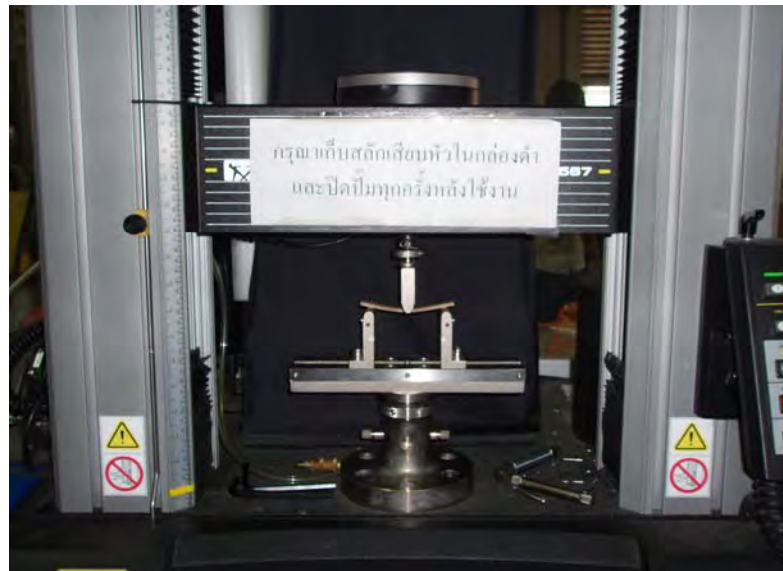


รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact pendulum)

การบดชิ้นงานเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงาน โดยรอยบากบนชิ้นงานทำหน้าที่เป็นจุดที่แรงกระทำมาสะสมกัน ทำให้การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเกิดขึ้นได้ยาก เพราะการแตกขาดจะเกิดขึ้นบริเวณรอยบากเท่านั้น การทดสอบการทนแรงกระแทกชิ้นงานที่มีรอยบากมี 2 วิธี คือ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันในทางปฏิบัติ คือ วิธี Charpy Impact Test นั้นรอยบากจะอยู่ด้านตรงข้ามกับทางเดินของหมอนตีและตัวอย่างจะวางในแนวแกนนอน ส่วนวิธี Izod Impact Test รอยบากจะอยู่ด้านเดียวกับทางเดินของหมอนตีและตัวอย่างจะวางในแนวแกนตั้ง

### 2.4.3 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural Strength Testing)

สมบัติการดัดโค้งที่แสดงความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของชิ้นงาน โดยมาตรฐานที่นิยมใช้ในการทดสอบ คือ ASTM D 790 แรงที่กระทำเป็นผลเนื่องมาจากความเค้นของแรงกด (Compressive Strength) และความเค้นของแรงดึงที่เกิดขึ้นในขณะเดียวกันสมบัติในการต้านทานการดัดโค้งมักแสดงในรูปของค่าแรงดัดโค้งสูงสุด (Maximum Flexural Strength) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวนอกของชิ้นงานเมื่อเริ่มเกิดการแตกหัก กรณีที่ชิ้นงานไม่มีการแตกหักขณะที่มีการโค้งงอ มักแสดงสมบัตินี้ในรูปของค่าแรงของการดัดโค้ง (Flexural Yield Strength) เมื่อค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวนอกเข้าใกล้ 5%



รูปที่ 2.4 ทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural Properties)

## 2.5 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties Testing)

เครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อนเพื่อศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์มีหลายชนิดแต่ละชนิดมีหลักการทดสอบและวิเคราะห์ต่าง ๆ กัน เช่น Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการวัดปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนไปของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น การหลอมเหลว (melting) ส่วนเครื่องอุณหภูมิในการโค้งงอ (Heat Deflection Temperature) การที่พอลิเมอร์มีอุณหภูมิและสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำไปสร้างเฟสไดอะแกรมหรือใช้ศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา โดยวัดปริมาณของพลังงานที่พอลิเมอร์ผสมและวัสดุประกอบแต่ละจุดหรือพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากสารตัวอย่างเป็นแคลอรีในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำได้โดยการให้ความร้อนกับสารเฉื่อยที่เป็นตัวอ้างอิงแล้ววัดค่าความแตกต่างของพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนกับสารทดสอบและสารอ้างอิง ได้แก่

### 2.5.1 การทดสอบอุณหภูมิในการโค้งงอ (Heat Deflection Temperature, HDT Testing)

เป็นทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ทำให้ประยุกต์ใช้วัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาวะแรงกดเป็นสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์และของวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ เพื่อให้ผู้ใช้วัสดุดังกล่าวทราบว่าสามารถนำวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ ไปใช้ได้ที่อุณหภูมิถึงเท่าใดก่อนเกิดการโค้งงอเปลี่ยนสภาพ และสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการใส่สารเติม (Additives) ในพอลิเมอร์หรือวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ การทดสอบอุณหภูมิในการโค้งงอใช้วิธีตัดโดยใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point Bending) พร้อมกับการให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบจนจุดกึ่งกลางของชิ้นงานเกิดการโค้งงออุณหภูมิที่จุดนี้เราเรียกว่า อุณหภูมิในการโค้งงอ

## 2.6 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เป็นเทคนิคในการวัดการสั่นของพันธะในโมเลกุล ไม่ว่าจะเป็นการยืด-หด (Stretching) หรือการบิด (Bending) FTIR ใช้ศึกษาหมู่ฟังก์ชันและพันธะของสารประกอบเกิดขึ้นจาก 2 สถานะคือ พลังงานของรังสีเท่ากับพลังงานที่แตกต่างระหว่างโมเลกุลที่สถานะเร้าและสถานะพื้น ผลที่เกิดขึ้นคือ ทำให้โมเลกุลดูดกลืนพลังงานเข้าไปและเป็นพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ สำหรับตัวอย่างที่เป็นของเหลว ให้ป้ายของเหลวที่ต้องการวัดลงบนผลึกของ NaCl หรือผลึก KBr สำหรับสารทดสอบที่เป็นของแข็งสามารถเตรียมโดยอัดเป็นเม็ด (KBr disk) โดยผสมตัวอย่างกับผง KBr ที่แห้ง ในอัตราส่วน 1:10 บด

ให้ละเอียดและเข้ากัน จากนั้นจึงอัดเม็ดโดยนำเข้าเครื่องอัด hydraulic อัดด้วยความดัน 800 psi ประมาณ 5 นาที ถ้าสารทดสอบที่เป็นของแข็งนั้นไม่ละลายในตัวทำละลายสามารถวิเคราะห์ได้โดยนำของแข็งมาแขวนลอยในตัวกลางของเหลว เกิดเป็นของผสมที่มี 2 เฟส เรียกว่า มัล (mull) มัลที่ได้ต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดที่ใช้ (ขนาดน้อยกว่า 2 ไมโครเมตร) มา 2-5 กรัม ผสมกับน้ำมันไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก (Nujor) 1-2 หยด บดให้เข้ากัน แล้วนำสารที่บดใส่ในเซลล์เพื่อนำไปวัด

ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared) เริ่มที่เลขคลื่น 14,290-4,000 ต่อเซนติเมตร ใช้ประโยชน์ในการทำปริมาณวิเคราะห์และศึกษาโครงสร้างโมเลกุล ช่วงอินฟราเรดกลาง (mid infrared) อยู่ในช่วงเลขคลื่น 4000-666 ต่อเซนติเมตร โดยแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเลขคลื่น 4000-1300 ต่อเซนติเมตร (group frequency) เป็นการสั่นของอะตอม 2 อะตอมในโมเลกุล เลขคลื่นที่เกิดขึ้นกับหมู่ฟังก์ชัน เลขคลื่นที่อยู่ในช่วง 1300-660 ต่อเซนติเมตร (finger print) จะเป็นการยึดดึงของพันธะเดี่ยวและการสั่นของอะตอมที่มากกว่า 2 อะตอม เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พีคที่เกิดขึ้นของ C-H ที่ 2800-3000 ต่อเซนติเมตร ส่วนพีคของ  $\text{CH}_2$  จะเกิดการ deformation จะขึ้นที่ 1430 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการมีหมู่แทนที่คือคลอรีนอะตอมมาเกาะ



รูปที่ 2.5 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 1994 M.Y.A Fuad และคณะ [35] ศึกษาการใช้สารประสาน 3 ชนิดในวัสดุประกอบต่าง จากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) กับเถ้าแกลบในปริมาณ 10-40% โดยชนิดของสารประสาน ได้แก่ titanate (LICA 38) ความเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก โดยใช้ n-pentatane เป็นตัวทำละลาย เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบเป็น 30-40% ใช้สารประสาน คือ Zirconate (NZ 44) ที่ความเข้มข้น 0.5% โดย น้ำหนัก ละลายด้วย propanol และ Silane (PROSIL 2020 และ PROSIL 9234) ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.5% ตามลำดับ โดยใช้ ethanol เป็นตัวทำละลายและขึ้นรูปด้วย Brabender twin screw extruder จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ ค่า melt flow index ลดลงแต่เมื่อใช้สารประสาน PROSIL 2020 ค่า melt flow index กลับเพิ่มขึ้น มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สาร ประสานและเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ ในขณะที่ค่าการทนต่อแรงดึงที่จุดขาดไม่มีความแตกต่างอย่าง ชัดเจนเมื่อใช้สารประสานในกลุ่ม Silane แต่เมื่อใช้สารประสาน LICA 38 และ PROSIL 9234 พบว่า ช่วยการทนต่อแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้นที่ปริมาณเถ้าแกลบ 20 % จากภาพถ่าย SEM พบว่า มีการยึดติด ระหว่างเฟสดีขึ้นเมื่อใช้สารประสานและพบว่าสารประสานยังช่วยการกระจายตัวของเถ้าแกลบใน PP ได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้สารประสาน

ปี 1999 H. Juvaste และคณะ [8] ศึกษาการใช้ Aminosilane เป็นสารประสานระหว่าง Cyclopentadienyl บนพื้นผิวของซิลิกาในขั้นแรกผู้วิจัยใช้วิธี Atomic layer chemical vapor deposition ในการปรับปรุง modify ผิวของซิลิกาโดยใช้ Aminopropyl dimethylethoxysilane (APDMES) จากปฏิกิริยา Saturated gas-solid และ แล้วจึงทำการ Immobilised  $\text{Me}_2\text{Si}(\text{C}_5\text{Me}_5\text{H})\text{Cl}$  และ  $\text{MeHSi}(\text{C}_5\text{Me}_5\text{H})\text{Cl}$  จากปฏิกิริยา Liquid phase โดยใช้ n-BuLi ทำให้เกิดปฏิกิริยาของ Amine และได้ by product คือ Lithiated ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ Silica - o - Li และ Silica - Bu บนพื้นผิว และพบว่าอุณหภูมิของการเผามีผลต่อการ modified พื้นผิวของซิลิกา คือที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียสให้ผลดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของซิลิกา คือเกิดสารประกอบ  $\text{Me}_2\text{Si}(\text{C}_5\text{Me}_5\text{H})\text{Cl}$  ที่พื้นผิวซิลิกา

ปี 2002. W. Chiang และคณะ [9] ศึกษาการปรับแต่งพื้นผิว LDPE ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้เทคนิคพลาสมาจากก๊าซอาร์กอน (Argon, Ar) ช่วยในการกราฟท์ และใช้รังสียูวีเพื่อให้ เกิดปฏิกิริยา Polymerization เป็น PLDPE ผล FTIR พบว่ามีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) เพื่อยืนยันการ เกิดเป็น Ma-g-LDPE และมีการเติมสารหน่วงการคิดไฟ (FR 44-94S) สารหล่อลื่น สาร antioxidant สาร coupling agent เพื่อพัฒนาสมบัติการหน่วงการคิดไฟ พบว่า ค่าการหน่วงการคิดไฟเพิ่มขึ้น เมื่อ เพิ่มปริมาณ (FR 44-94S) มากขึ้น แต่จะทำให้ค่าการยึดดึงและค่าความแข็งแรงลดลงเนื่องจากวัสดุที่ เตรียมได้มีความแข็งแรงประเพิ่มขึ้น ความเป็น plasticizer ลดลง และผลจากการกราฟท์ Maleic

anhydride ทำให้สมบัติเชิงกลได้แก่ Tensile Strength Impact Strength และ Young Modulus ของ PLDPE เพิ่มขึ้น

ปี 2003 P. Sae-oui และคณะ[13] ใช้ Silica เป็นสารเสริมแรงในยาง โดยใช้ Silane 2 ชนิด คือ bis-(3-triethoxysilane)propyl tetrasulfane (Si-69) และ 3 thiocyanatopropyl triethoxy silane (Si-264) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงในกระบวนการวัลคาไนซ์เซชัน แบบต่างๆ ดังนี้ conventional vulcanization (CV), semi-efficient vulcanization(semi-EV), และ efficient vulcanization (EV) พบว่า silane ไม่เพียงช่วยพัฒนากระบวนการทำให้เกิดสารประกอบ (Compound Processability)เท่านั้น ยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แกยาง จากกระบวนการ vulcanization และพบว่า silane ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ silica ที่บริเวณผิวหน้าได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจาก silane มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและโครงสร้างโปร่ง และพบว่า Si-264 สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเติมแต่ง ได้ดีกว่า Si-69 ทำให้กระบวนการการผลิตและกระบวนการ curing ดีขึ้นและสำหรับกระบวนการ CV และ semi-EV Si-264 มีประสิทธิภาพเสริมแรงดีกว่า Si-69 ซึ่งอาจเกิดจากผลของการผสมระหว่างยางกับสารเติมแต่ง และการกระจายตัวของสารเติมแต่งดีกว่า เมื่อใช้ Si-264 แทน Si-69 ส่วนระบบ EV ให้ผลการทดลองในทางตรงกันข้าม เช่น การใช้ Si-69 ให้การเสริมแรงดีกว่า Si-264

ในปี 2004 T.J. Keener และคณะ[14] เตรียมวัสดุประกอบแต่ง ระหว่าง Polyolefin ได้แก่ PP และ PE วัสดุเสริมแรง คือ พืชที่เป็นเส้นใย ได้แก่ ฝ้ายและปอสารที่ใช้เป็นตัวสารประสาน คือ Maleic anhydride และ Peroxide คณะผู้วิจัยผสมกับ PP: วัสดุเสริม ในอัตราส่วน 30% ขนาดเส้นใยยาว 6.25 มิลลิเมตร ใช้สารประสานในปริมาณ 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหัวคู่ ที่อุณหภูมิ 200°C ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยการทำการผสม PP กับ Maleic anhydride ก่อน และผสมวัสดุเสริมแรงในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์และขึ้นรูปสารประกอบที่อุณหภูมิ 230 °C ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหัวคู่แบบหัวตาย (die) 2 หัว และตัดชิ้นงาน เป็นแบบเม็ดยกจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบสมบัติกายภาพ พบว่า วัสดุประกอบแต่งที่ได้มีสมบัติเชิงกลดี และมีการหา acid number เพื่อบอกปริมาณ Maleic anhydride ที่อยู่ในพอลิเมอร์ ซึ่งปริมาณที่เหมาะสม คือ 3% wt และ พบว่า สารที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ได้ถึง 60% และทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติกายได้แรงยึดดึง สมบัติการรับแรงกระแทกแบบ Charpy Impact และคุณลักษณะชิ้นงานจากภาพถ่าย SEM

ในปี 2004 H.S. Yang และคณะ[26] ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุ Lignocellulosic เป็นสารเสริมแรงในวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ โดยใช้ PP เป็นเมทริกซ์และผงเกลบเป็นวัสดุเสริมแรงโดยใช้ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก คณะผู้วิจัยได้ทดสอบสมบัติการดึงยึด ณ อุณหภูมิการทดสอบ 6 ระดับ ได้แก่ -30, 0, 20, 50, 80 และ 110°C ด้วยความเร็วของ Crosshead 5



ระดับ ได้แก่ 2, 10, 100, 500 และ 1500 มม./นาทิจ ผลการวิจัยพบว่า สมบัติการดึงยึดของวัสดุ ประกอบแต่ละลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น มอดูลัสการดึงยึดสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณผงแคลบ การทนต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณผงแคลบเพิ่มขึ้น การดึงด้วยอัตราเร็วของ Crosshead speed สูงทำให้วัสดุประกอบแต่ละมีพฤติกรรมเปราะมากขึ้น ส่วนการเกิด Plastic deformation พบเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้น

ในปี 2004 H. Yang และคณะ[10] ศึกษาความเป็นไปได้และศักยภาพของการนำยางรถและ ฟางข้าว เป็นวัสดุประกอบแต่ละเพื่อเป็นฉนวนในการก่อสร้าง โดยใช้ Polyurethane เป็นสารประสาน และทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติการตัดโค้ง การยึดดึง การดูดซับเสียง (Sound Absorption) การ ดูดซับน้ำและการบวมน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ ไม้เปรียบเทียบ (Control board จากสถาบัน International Organization for Standardization, 1972) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณฟางข้าว มอดูลัสการ ดึงยึดเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับเสียงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิก ฟีนบอร์ดที่ทำจากไม้ และคอนกรีต ผลการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ พบว่า สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำได้มากกว่า 68% เมื่อเปรียบเทียบกับไม้เปรียบเทียบ สามารถนำไปใช้แทนไม้ได้ เช่น ใช้ในการก่อสร้าง การ นำไปทำเป็นฉนวนเพื่อป้องกันการแผดเผา การผุเน่าเปื่อย ลดการกระแทกจากการชน สามารถ นำไปใช้กับงานที่มีการตัดโค้งวัสดุได้

ปี 2005 M. Bengtsson และคณะ[11] ศึกษาการเกิด crosslink ในวัสดุประกอบแต่ละ เพื่อ พัฒนาสมบัติเชิงกล จากการเติม vinyltrimethoxy silane ในปริมาณที่แตกต่างกับ PE กับผงไม้ เนื้ออ่อน ขึ้นรูปสารประกอบโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหัวคู่ และศึกษาผลของการเติม silane ต่อความยากง่ายของกระบวนการขึ้นรูป พบว่า การที่เติม silane ทำให้กระบวนการขึ้นรูปเกิดได้ยาก กว่าที่ปริมาณ silane สูง แล้วนำชิ้นงานไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและที่ห้องอบไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและมีความชื้นสูง เพื่อศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการเกิด crosslink การเกิดเจลและ การบวมน้ำ (swelling) จากการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและความชื้นสูง จะเกิด crosslink ได้มากกว่าที่อุณหภูมิห้อง ที่ปริมาณความเข้มข้นของ silane อย่างน้อย 4% ภายใน ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ในการทดสอบความแข็งและเหนียวของชิ้นขึ้นรูปวัสดุประกอบแต่ละ PE/ไม้ เนื้ออ่อนที่ผสม silane ในปริมาณ 2-3% พบว่ามีความเหนียวสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการเติม silane และ การทดสอบการตัดโค้ง พบว่า ชิ้นวัสดุประกอบแต่ละ PE/ไม้เนื้ออ่อน ที่มีการเติม silane จะมีต่ำกว่ากว่าไม่เติม เนื่องจาก ความมีผลึกต่ำของ PE และปัญหาที่พบ คือ เมื่อเพิ่มปริมาณ silane มากเกินไป จะทำให้ผิวของชิ้นวัสดุประกอบแต่ละ PE/ไม้เนื้ออ่อนเกิดปัญหา Edge tearing

ในปี 2005 M. Hashimoto และคณะ[12] ศึกษาและทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งระหว่าง HDPE กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เพื่อทำ bone repair material และเปรียบเทียบระหว่างการใช้ออนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ [(methacryloxy)propyl]trimethoxysilane ช่วยในการ treat เป็นสารประสานเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยตัวเติมแต่ง (filler)  $\text{TiO}_2$  ที่มีขนาดอนุภาค 535 นาโนเมตร ในปริมาณ 40 % โดยปริมาตรเนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปทำ bone repair material และอัดความดันอากาศและให้ความร้อนกับชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปที่ความดัน 2.5 MPa และ 5.8 MPa แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ชิ้นงานที่ไม่มีการใช้สารประสานมีค่า young's modulus ขึ้นกับค่าความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานอย่างเดียวกันแต่ชิ้นงานที่มีการใช้สารประสานมีค่า young's modulus เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารประสานและเพิ่มความดันตั้งแต่ 5 MPa ขึ้นไป แต่ค่า young's modulus ลดลงเมื่อเพิ่มความดันมากกว่า 7.5 MPa การวิเคราะห์ด้วย FT-IR การดูคลื่นสเปกตรัมของหมู่คาร์บอนซิลของสารประสานและหมู่คาร์บอนิลของ HDPE การดูคลื่นแสงของอิเทอร์จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ตัวประสานกับ HDPE และจากภาพถ่าย SEM บริเวณที่มีการยึดพบว่า ชิ้นงานที่มีการใช้ตัวประสานจะมี HDPE อยู่ แสดงว่า มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง HDPE กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$

ในปี 2006 S. Sun และคณะ[15] การทำวัสดุประกอบแต่ง PVC กับอนุภาคของ  $\text{SiO}_2$  โดยใช้ dimethyl dichlorosilane (DMCS) และ  $\gamma$ -methylacryloxypropyl trimethoxy silane (KH570) ในการปรับแต่งพื้นผิวของ  $\text{SiO}_2$  ก่อนทำการผสมกับ PVC ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ของ PVC/ $\text{SiO}_2$  การตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาที่ interface การกระจายตัวของใน  $\text{SiO}_2$  ใน PVC/ $\text{SiO}_2$  พบว่า การปรับแต่งพื้นผิวของ  $\text{SiO}_2$  ด้วยสารประสานทั้ง 2 ชนิด จะเพิ่มความแข็งแรงและเหนียวให้กับวัสดุประกอบแต่งคือ KH570 > DMCS > UTS ตามลำดับ การกระจายตัวของ  $\text{SiO}_2$  ใน PVC ก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ค่าการทดสอบการยึดจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประสานที่ใช้ในการปรับแต่งพื้นผิว  $\text{SiO}_2$  ค่าการทดสอบการกระแทกได้มากที่สุดคือเมื่ออัตราส่วนอนุภาคของ  $\text{SiO}_2$  กับ PVC คือ 4:100 และการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว พบว่า การปรับแต่งพื้นผิวด้วย KH570 มีความแข็งแรงกว่าการปรับแต่งพื้นผิวด้วย DMCS และ UTS ตามลำดับ

ในปี 2006 Z. Yongsheng และคณะ[36] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกจาก PVC และผงไม้ปรับแต่งพื้นผิวด้วย silane และศึกษาผลของการเติม Organomodified montmorillonite (OMMT) ต่อการหน่วงการติดไฟและการลดปริมาณควันไฟ พบว่าเมื่อใช้ผงไม้ที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่ความเข้มข้น 1.5 phr เติมใน PVC พบว่า ค่าการทนต่อแรงกระแทกและค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 14.8% และ 18.5% ตามลำดับ ตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาได้จาก FT-IR และเมื่อเติม 0.5% OMMT ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล เพิ่ม Interfacial Compatibility ระหว่างเฟสด้วย และค่าการทนต่อแรงกระแทก เพิ่มขึ้นเป็น 20 % และค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอีก 9% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ silane และ OMMT พบว่า เกิด weak interfacial layer และพบว่าการเติม

OMMT ปริมาณน้อยมีการกระจายตัวได้ดี ตรวจสอบได้จาก X-ray Photoelectron Spectroscopy ช่วยเพิ่มค่าการหน่วงการติดไฟและลดปริมาณควันได้ดีกว่าที่ปริมาณสูง

L. M. Matuana และคณะ[37] ศึกษาบทบาทของความเป็นกรด-เบสที่พื้นผิวของเมตริกซ์คือ PVC และfiller คือเยื่อกระดาษหนังสือพิมพ์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารประสานชนิดต่างๆ งานวิจัยนี้ใช้สารประสาน(Coupling agents) ต่างๆ 4 ชนิดได้แก่  $\gamma$ -Aminopropyltriethoxysilane, Dichlorodiethylsilane, Phthalic anhydride และ Maleated polypropylene โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คณะผู้วิจัยได้เตรียมของผสม 2 ระบบคือ PVC อย่างเดียว และPVC ผสมเยื่อกระดาษ 45 phr โดยวัสดุผสมระบบหลังนี้จะแยกเป็นใส่และไม่ใส่สารประสานที่ผิวเยื่อกระดาษ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าสมบัติของการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่างPVCและเยื่อกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยากรดเบสระหว่างผิวของPVCและผิวของเยื่อกระดาษเกิดดีมาก แต่ปัจจัยความเป็นกรดเบสไม่เกี่ยวข้องกับมอดูลัสแรงดึง, ความเครียดที่จุดจํานน และสมบัติการกระแทกของวัสดุผสม การปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างPVCและเยื่อกระดาษ มีผลดีต่อค่าแรงดึงของวัสดุผสม แต่มีผลเสียต่อความเครียดที่จุดจํานนและสมบัติการกระแทก Aminosilane เป็นตัวประสานที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะในวัสดุผสมระหว่างPVCและเยื่อกระดาษ และยังเป็นสารสำคัญที่ช่วยปรับปรุงการแรงดึงของวัสดุผสม ส่วนสารประสานอื่นๆ ได้แก่ Dichlorodiethylsilane, Phthalic anhydrideและ Maleated polypropylene พบว่าด้อยประสิทธิภาพและให้ผลคล้ายกับวัสดุผสมที่ไม่มีการเคลือบเยื่อกระดาษด้วยสารประสาน ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR spectroscopy แสดงให้เห็นว่า Aminosilane เป็นสารที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากชิ้นงานที่มีการเติมaminosilaneในเยื่อกระดาษ มีการทำปฏิกิริยากับPVCเกิดเป็นพันธะเคมี

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลและอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารประสานต่อสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ผลิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) กับวัสดุเสริม 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ เถ้าแกลบและผงไม้เต็ง โดยมีขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบดังขั้นตอนต่อไปนี้

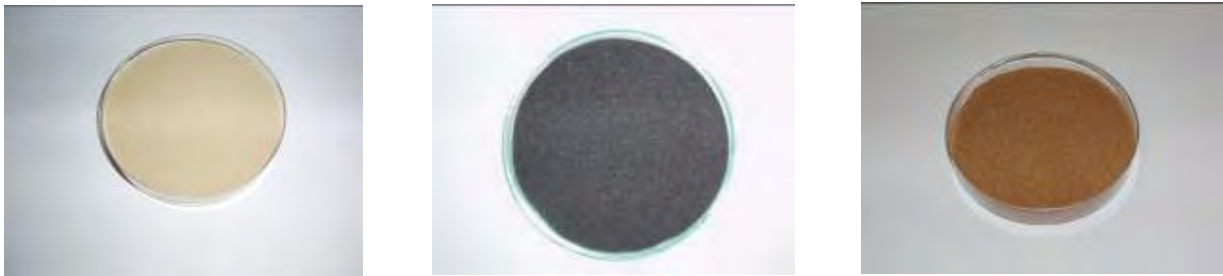
#### 3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ ใช้เกรด K 66 ผลิตโดยบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหนาแน่น 0.57 กรัม/มิลลิลิตร มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 157 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ เกรด K 66

3.1.2 วัสดุเสริม ได้แก่ แกลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ได้จากโรงสีข้าว มีลักษณะเป็นเมล็ด เถ้าแกลบดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) ได้จากโรงไฟฟ้า และผงไม้เต็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ค) ได้จากโรงเลื่อยไม้ลือชาทิมเบอร์ การบดละเอียดวัสดุเสริมใช้ เครื่อง Vibration ball mill (Chuo Kakouki Co.,Ltd.) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) การบดใช้เวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการคัดแยกขนาดของผงแกลบที่บดแล้วโดยใช้เครื่อง Sieve analyzer (Retsch) ดังแสดง ในรูปที่ 3.3 (ข) ขนาดอนุภาค 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ผงแกลบ (ก) ผงเถ้าแกลบ (ข) และผงไม้เต็ง (ค)

3.1.3 สารประสาน เลือกใช้กลุ่มอะมิโนไซเลน เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับ พอลิไวนิลคลอไรด์ และเหมาะกับวัสดุเสริมที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แกลบและเถ้าแกลบ สารประสานที่เลือกใช้ ได้แก่ N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane นำเข้าจาก บริษัท Dow Corning จำกัด โดยบริษัท Connell.Bros.Co.(Thailand),Ltd. โดยมีสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

- i) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 222
- ii) ของเหลวใส
- iii) pH อยู่ในช่วง 3.0-4.0
- iv) ความหนืดเท่ากับ 5 ตร.มิลลิเมตร/วินาที
- v) จุดวาบไฟเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส
- vi) ค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.03
- vii) Reflective Index 1.445
- viii) เก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส

3.1.4 น้ำกลั่น ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารประสาน

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

- i) เครื่องบด (Vibration Ball mill)
- ii) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค (Sieve analyzer)
- iii) เตาอบ (Oven)
- iv) บีกเกอร์ (Beaker)
- v) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
- vi) แท่งแก้วคน (Stirring rod)
- vii) Cylinder
- viii) Magnetic Stirrer
- ix) ถาดอะลูมิเนียม
- x) เครื่องชั่ง
- xi) เครื่องผสมแบบร่อน (Dry blending)
- xii) เครื่องขึ้นรูป (Hydraulic press)
- xiii) แม่พิมพ์ (Compression molding)
- xiv) อุปกรณ์การตัดชิ้นงาน
- xv) เครื่องทดสอบเชิงกล Universal Testing Machine (INSTRON 5567).
- xvi) เครื่องทดสอบแรงกระแทก Impact Testing Machine.
- xvii) เครื่องวัด dynamic mechanical analyzer (NETZSCH model DMA242)
- xviii) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)  
โดยใช้เครื่อง JEOL รุ่น JSM-5410LV

### 3.3 ขั้นตอนการทำวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมวัสดุเสริม (Fillers)

การเตรียมผงแคลสที่ใช้ในงานวิจัยโดย บดหยาบแคลสที่ได้จากโรงสีข้าวการบดละเอียดโดยใช้เครื่องบด Vibration Ball mill ดังรูปที่ 3.3 (ก) ระยะเวลาในการบดละเอียดประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นแยกขนาดผงแคลสด้วยเครื่องคัดขนาดอนุภาค (Sieve analyzer) ดังรูปที่ 3.3 (ข) ที่ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ด้วยตะแกรงร่อน (Sieve tray) ขนาด Mesh 325, 200, 150, 80 และ 60 ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคดังกล่าว ตามลำดับตามลำดับ จากนั้นนำแคลสแต่ละขนาด ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง การเตรียมผงไม้ มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการเตรียมผงแคลส แต่การบดละเอียดใช้เวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง ขึ้นกับขนาดของผงไม้ที่ต้องการ ส่วนการเตรียมผงเถ้าแคลสใช้เวลาบดราว 6-8 ชั่วโมง เนื่องจาก เถ้าแคลสมีความแข็งเปราะมากกว่าผงแคลสและผงไม้



(ก) เครื่องบดละเอียด (Vibration ball mill)



(ข) เครื่องคัดขนาดอนุภาค (Sieve analyzer)

รูปที่ 3.3 (ก) เครื่องบดละเอียดและ (ข) เครื่องคัดขนาดอนุภาค

### 3.3.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ใช้ชนิด K 66 มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหนาแน่น 0.52 กรัม/มิลลิลิตร ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 157 ไมครอน ผลิตโดยบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด(มหาชน)

### 3.3.3 สารประสาน (Coupling agent)

สารเบต้าอะมิโนเอทิล แกมมาอะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane, Z-6020) เป็นสารประสานกลุ่ม อะมิโนไซเลน ที่ได้รับการอนุเคราะห์ จากบริษัท คอนเนลล์ บราเดอร์ส (ประเทศไทย) จำกัด แสดงดังรูปที่ 3.4 การเตรียมสารประสานที่มีความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0% ตามลำดับ ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ใส่สารที่เตรียมในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร แล้วนำไปกวนโดยใช้เครื่องกวน (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ระหว่างสารประสานกับน้ำกลั่น จนได้เป็นสารละลายไซเลนอล (Silanol) แล้วนำวัสดุเสริมแต่ละขนาดอนุภาค คือ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ในสัดส่วนดังต่อไปนี้ วัสดุเสริมปริมาณ 20 phr คือ อัตราส่วนระหว่าง PVC : วัสดุเสริม เท่ากับ 86.15 : 13.85 กรัมต่อน้ำหนักทั้งหมด 100 กรัม วัสดุเสริมปริมาณ 60 phr คือ อัตราส่วนระหว่าง PVC : วัสดุเสริม เท่ากับ 67.462 : 32.538 กรัมต่อน้ำหนักทั้งหมด 100 กรัม มาผสมกับสารละลายที่เตรียมไว้ในปริมาณมากเกินพอ (Excess) คนให้ทั่วเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Condensation ระหว่างสารประสานกับวัสดุเสริม แสดงดังรูปที่ 3.5 หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งใน

เตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 สารประสาน (Z-6020)



รูปที่ 3.5 การเคลือบวัสดุเสริมด้วยสาร  
ประสาน



### 3.3.4 การผสมแห้ง PVC กับวัสดุเสริม

ผสมแห้ง PVC กับวัสดุเสริมแต่ละขนาดอนุภาคที่เตรียมไว้แล้วโดยการนำวัสดุเสริมที่ปรับแต่งผิวด้วยสารประสานที่ความเข้มข้น 0.2%-1.0% มาผสมแห้งกับ PVC ในเครื่องผสมแห้งระบบปิด ในอัตราส่วนวัสดุเสริม 20 และ 60 phr ด้วยเครื่องผสมแห้งแสดงดังรูปที่ 3.6 โดยสัดส่วนของวัสดุเสริมที่ใช้ คือ 20 phr คือน้ำหนักของวัสดุเสริมเท่ากับ 0.16620 กิโลกรัมต่อน้ำหนัก PVC เท่ากับ 1.0338 กิโลกรัม และ 60 phr คือน้ำหนักของวัสดุเสริมเท่ากับ 0.390456 กิโลกรัมต่อน้ำหนัก PVC เท่ากับ 0.809544 กิโลกรัม ตามลำดับ แล้วจึงทำการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคโดยใช้สารประสานในกลุ่มอะมิโนซิลิโคน คือ N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane ในปริมาณความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0% ตามลำดับ โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย



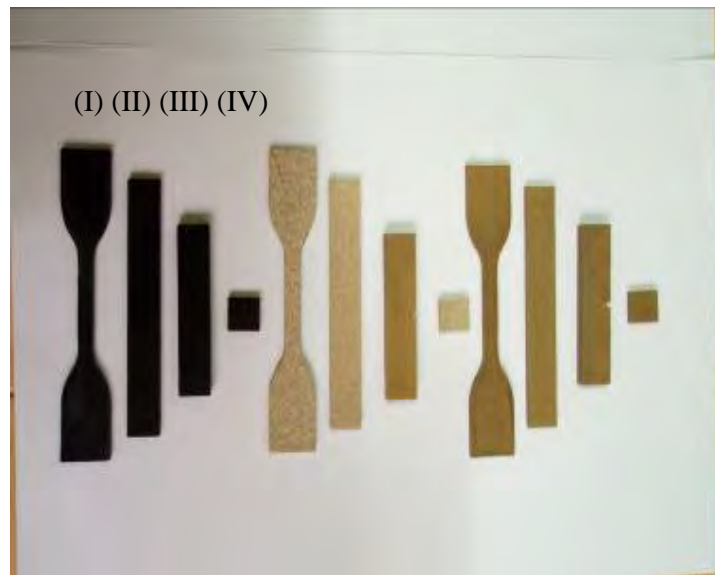
รูปที่ 3.6 เครื่องผสมแห้ง(Dry Blender)

### 3.3.5 การเตรียมชิ้นงานไม้พลาสติก PVC/วัสดุเสริมเพื่อการทดสอบ

จากขั้นตอนการผสมแห้งผง PVC กับวัสดุเสริมทั้ง 3 ชนิดที่ขนาดและปริมาณต่างๆแล้ว นำมาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบโดยเครื่อง Hydraulic press (LAB TECH Engineering Company Ltd.) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามรูปทรงและขนาดตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละชนิดกำหนด ได้แก่ การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile property) ตามมาตรฐาน ASTM D638-IV การทดสอบการทนต่อการโค้งงอ (Flexural property) ตามมาตรฐาน ASTM D 790 ขนาดของชิ้นงาน คือ  $12.7 \times 96 \times 3$  มม. การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact property) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ขนาดของชิ้นงาน คือ  $12 \times 64 \times 6$  มม. และการทดสอบการทนต่อแรงอัด (Compression property) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ขนาดของชิ้นงาน คือ  $12.7 \times 12.7 \times 3$  มม.ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 3.8 จากซ้ายไปขวา คือ ชิ้นงานในการทดสอบการทนต่อแรงดึง ชิ้นงานในการทดสอบการทนต่อการโค้งงอ ชิ้นงานในการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก และชิ้นงานในการทดสอบการทนต่อการกดอัด ตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ  $190^{\circ}\text{C}$  ความดัน  $70 \text{ Kg/cm}^2$



รูปที่ 3.7 เครื่อง Hydraulic press



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปเพื่อทดสอบ ดังนี้

- (I) การทดสอบแรงดึง(Tensile property)
- (II) การทดสอบแรงดัดโค้ง(Flexural property)
- (III) การทดสอบแรงกระแทก(Impact property)
- (IV) การทดสอบแรงกด(Compression property)

### 3.4 การทดสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

หลังจากการเคลือบผงวัสดุเสริมด้วยสารประสาน นำไปเตรียมทดสอบหมู่ฟังก์ชันโดยอัดเป็นเม็ดKBr(KBr disk) โดยผสมตัวอย่างกับผง KBr ที่แห้ง ในอัตราส่วน 1:10 บดให้ละเอียดและเข้ากัน อัดเม็ดโดยนำเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิก อัดด้วยความดัน 800 psi ประมาณ 5 นาที นำมาทดสอบด้วยเครื่อง Perkin Elmer FT-IR Spectrometer ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากการเกิดปฏิกิริยาของสารประสานกับวัสดุเสริมในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก

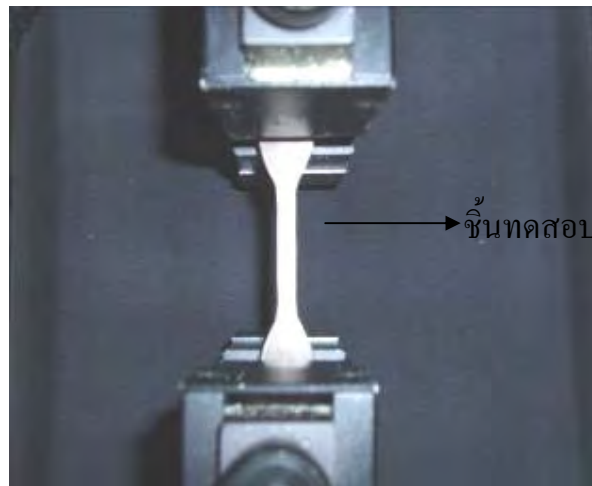


รูปที่ 3.9 เครื่อง Perkin Elmer FT-IR Spectrometer

### 3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.5.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile property)

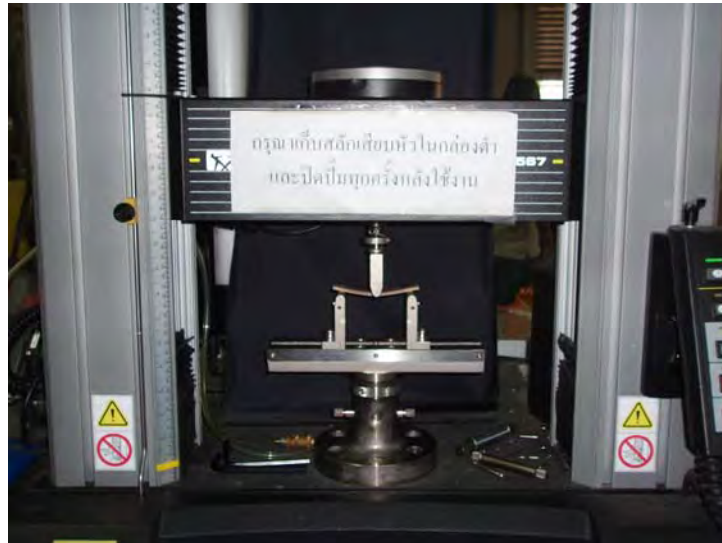
นำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบการทนต่อแรงดึง โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Model 5567) ขนาด Load cell 30 kN ตามวิธีทดสอบที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D 638-IV ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการทดสอบ 1.2 มม./นาที ทดสอบ 5-10 ตัวอย่าง ทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานขาด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 แสดงชิ้นงานขณะทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานขณะทดสอบแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

#### 3.5.2 การทดสอบการแรงดัดโค้ง(Flexural property)

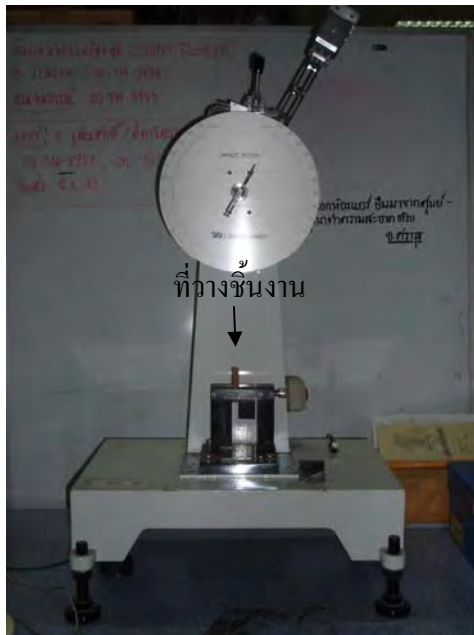
นำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบการทนต่อการดัดโค้งแบบ 3-point bending โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Model 5567) ขนาด Load cell 1 kN ตามวิธีทดสอบที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D 790 ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการทดสอบ 1.2 มม./นาที ทดสอบ 5-7 ตัวอย่าง ทดสอบจนเครื่องหยุดที่ Sensivity 80 % จนชิ้นงานโค้งและหัก แสดงดังในรูปที่ 3.11



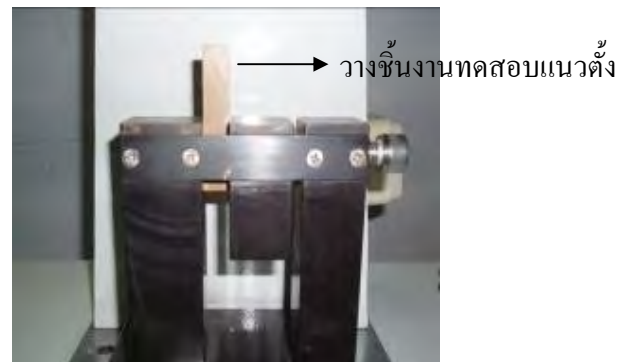
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานขณะทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3-point bending  
ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

### 3.5.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact property)

นำชิ้นงานทดสอบไปทำการบากชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง Notching Machine เป็นมุม 45 องศา ลึก 0.25 มม. นำชิ้นงานที่บากแล้วมาทดสอบการทนต่อแรงกระแทก เพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานหัก โดยใช้เครื่อง Impact tester (Yasuda 258PC) ขนาดลูกตุ้ม 60 N ตามวิธีทดสอบที่กำหนดใน ASTM D 256 ทดสอบ 5-7 ตัวอย่าง ทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก ดังรูปที่ 3.12 แสดงเครื่อง Impact tester และรูปที่ 3.13 แสดงการวางชิ้นงานทดสอบ



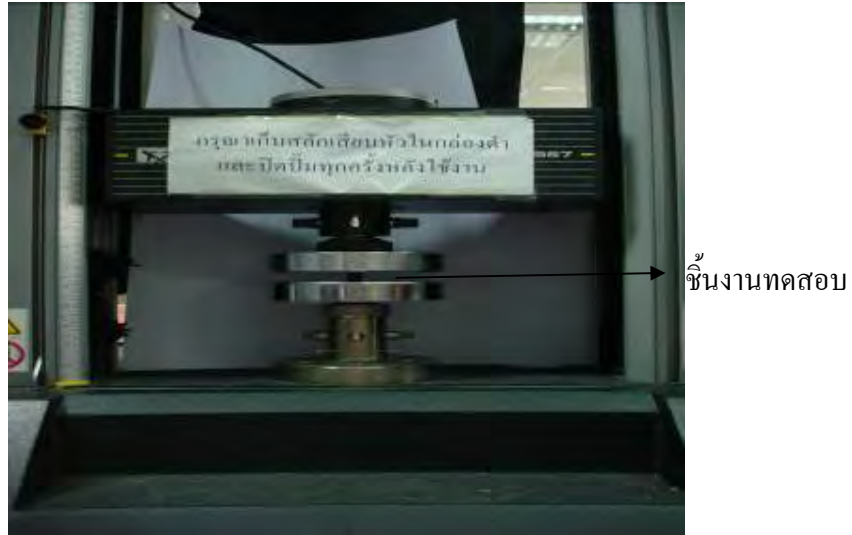
รูปที่ 3.12 เครื่อง Impact tester



รูปที่ 3.13 แสดงการวางชิ้นงานทดสอบ  
การทนต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Impact tester

#### 3.5.4 การทดสอบการกดอัด (Compression property)

นำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบการทนต่อการกดอัด โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Model 5567) ขนาด Load cell 30 kN ตามวิธีทดสอบที่กำหนดใน ASTM D 695 ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการทดสอบ 1.2 มม./นาที ทดสอบ 5-7 ตัวอย่าง การทดสอบการทนต่อการกดอัด แสดงดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการทดสอบการทนต่อการกดอัด

### 3.6 การตรวจสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของชิ้นงาน

การวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกในระดับจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยใช้เครื่อง JEOL model รุ่น JSM-5410LV Scanning ที่ระดับอัตราเร่งของอิเล็กตรอน (Electron concentration) 15 kV ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ในการเตรียมชิ้นงานไม้พลาสติกPVC/วัสดุเสริม โดยจุ่มชิ้นงานไม้พลาสติกในไนโตรเจนเหลวแล้วหักให้ได้พื้นผิวที่สม่ำเสมอ แล้วเคลือบผิวที่แตกด้วยทองเพื่อเป็นสื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กตรอนจากกล้อง



รูปที่ 3.15 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



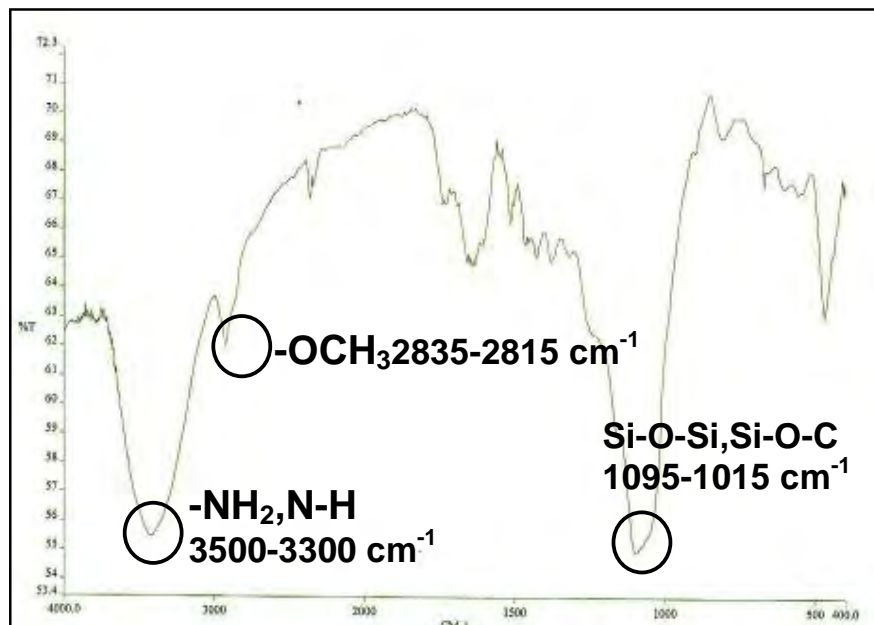
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารประสาน(Coupling agents) ต่อผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ผลิตจากPVC โดยในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย โดยเริ่มตั้งแต่จากการตรวจสอบการเกิดพันธะของสารประสานบนพื้นผิวระหว่างPVCกับวัสดุเสริมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ผงแคลบ ผงแก้วแคลบและผงไม้เต็ง โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy )

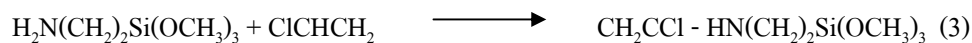
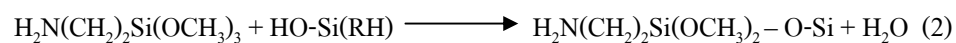
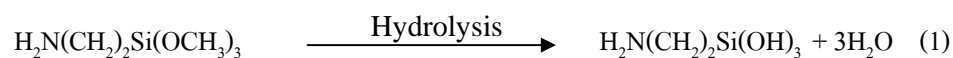
#### 4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy

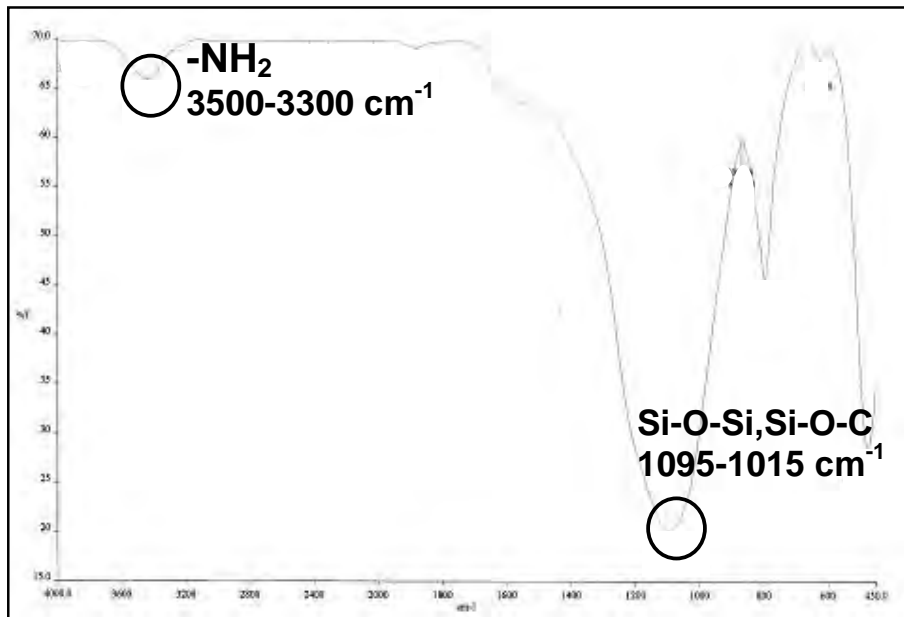
เมื่อพิจารณา Infrared absorbance spectrum ของผงแคลบที่ถูกปรับแต่งพื้นผิวและด้วยสารประสาน N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา คือ สารประสานเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส(Hydrolysis)กับน้ำ ดังปฏิกิริยาที่ (1) กลายเป็นสารประกอบไฮเลนอล(Silanol) ประกอบด้วยหมู่ -OH จากนั้นก็จะเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์กับวัสดุเสริมที่หมู่ไฮดรอกซิล(-OH) ของวัสดุเสริมเช่นกัน เช่นในผงแคลบจะประกอบด้วยหมู่ Si-OH ในผงไม้เต็งประกอบด้วย -C-OH



รูปที่ 4.1 FT-IR ของPVC/ผงเคลือบปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน

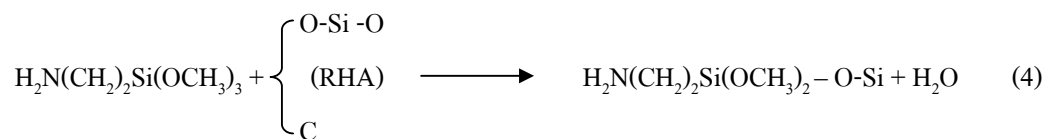
จากรูปที่ 4.1 พบว่า มีสเปกตรัมที่แตกต่างกันเกิดขึ้น โดยผงเคลือบมีการดูดกลืนแสงของหมู่ Si-OH ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1012\text{ cm}^{-1}$ . และพบว่ามีเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งของความยาวคลื่นประมาณ  $1095\text{-}1015\text{ cm}^{-1}$ . ซึ่งเป็นตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง หมู่ -Si-OH ของผงเคลือบกับหมู่ -Si(OH)<sub>3</sub> ของสารประสาน และยังพบว่ามีเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นประมาณ  $2835\text{-}2815\text{ cm}^{-1}$ . เป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของหมู่เมทอกซี(-OCH<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยากับเคลือบ ดังปฏิกิริยาที่ (2) และการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ  $3500\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$ . เป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของหมู่อะมิโน(-NH<sub>2</sub>) และหมู่ N-H ดังปฏิกิริยาที่ (3) ซึ่งเป็นหมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยากับPVCด้วยพันธะโควาเลนต์เช่นกัน มีผลทำให้วัสดุเสริมเกิดการยึดติดกันได้ดีกับPVC

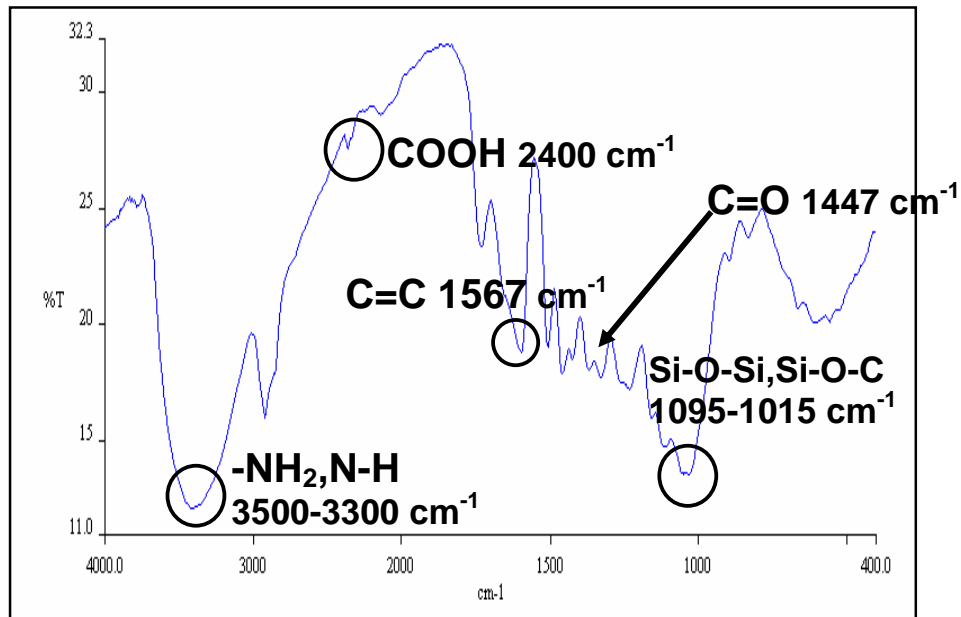




รูปที่ 4.2 FT-IR ของ PVC/ผงเถ้าเคลือบปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน

พิจารณารูปที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันของการเกิดปฏิกิริยาของสารประสานในไม้พลาสติก PVC/เถ้าเคลือบ เนื่องจากในเถ้าเคลือบถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้องค์ประกอบ เช่น เซลลูโลส หายไป จึงไม่พบหมู่ฟังก์ชันจำพวกไฮดรอกซิล จากรูป พบว่า มีสเปกตรัมที่เกิดขึ้น ที่ความยาวคลื่น ประมาณ  $1095-1015 \text{ cm}^{-1}$ . ซึ่งเป็นตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง หมู่  $\text{Si}(\text{OH})_3$  ของสารประสานกับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{C}$  ในเถ้าเคลือบดังสมการที่ (4) และพบตำแหน่งการดูดกลืนแสงของหมู่อะมิโนที่ความยาวคลื่นประมาณ  $3500-3300 \text{ cm}^{-1}$ . เพื่อแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประสานกับ PVC ด้วยพันธะโควาเลนต์มีผลทำให้วัสดุเสริมเกิดการยึดเกาะได้ดีกับ PVC ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (3)





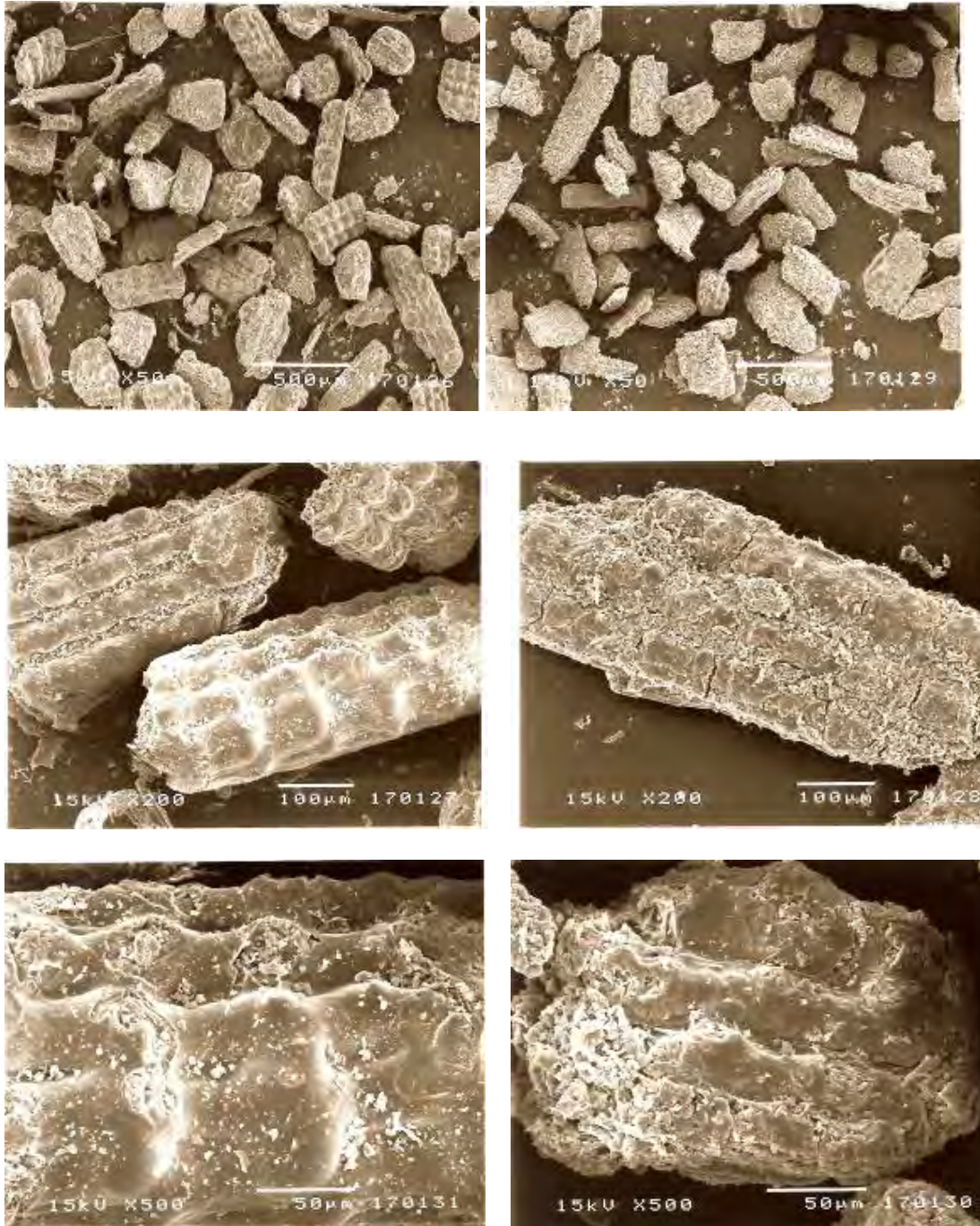
รูปที่ 4.3 FT-IR ของPVC/ผงไม้เต็งที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน

จากรูปที่ 4.3 พบว่า มีลักษณะสเปกตรัมที่เกิดขึ้น ที่ตำแหน่งของความยาวคลื่นประมาณ  $1095-1015\text{ cm}^{-1}$ . ซึ่งเป็นตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง หมู่ -OH ของผงไม้กับหมู่  $\text{Si}(\text{OH})_3$  ของสารประสาน ดังสมการที่ (5) และพบว่า การดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอกซิลิก(COOH) มีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นประมาณ  $2400\text{ cm}^{-1}$ . การดูดกลืนแสงของหมู่(C=O) ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1447\text{ cm}^{-1}$ . ซึ่งเป็นองค์ประกอบของไม้ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารประสานแล้วเกิดเป็นแอมโมเนียมที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ . เป็นตำแหน่งเดียวกับการดูดกลืนแสงของหมู่อะมิโน(-NH<sub>2</sub>) เพื่อเป็นการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประสานกับPVCเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์มีผลทำให้วัสดุเสริมเกิดการยึดเกาะได้ดีกับPVC ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

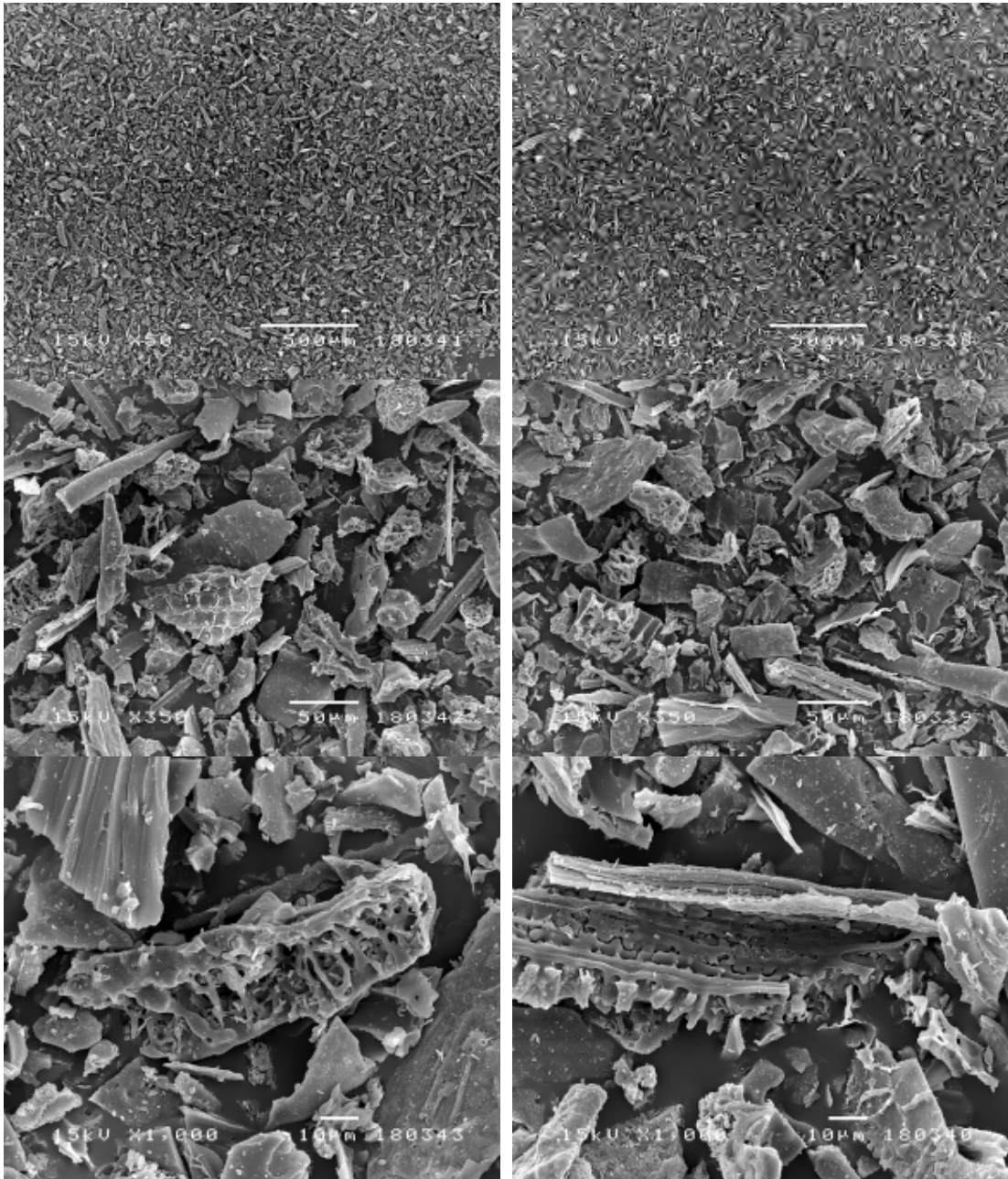


#### 4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาของชิ้นงาน

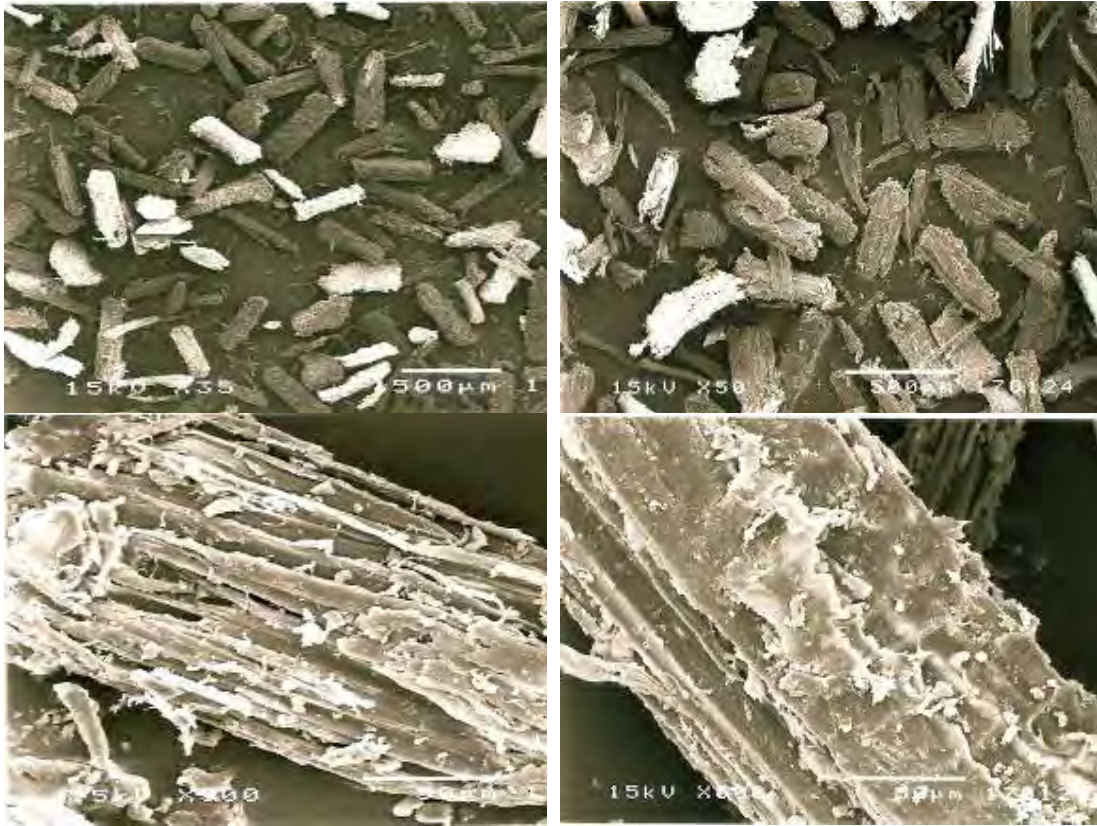
การใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคของวัสดุเสริมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติของไม้พลาสติกที่เตรียมได้ และเพื่อเป็นการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PVC กับวัสดุเสริม นอกจากจะตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากเทคนิค FTIR แล้ว การวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกในระดับจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้สารประสานในการปรับแต่งพื้นผิวของวัสดุเสริม ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ไม่มีการใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิว เช่น จากการทดสอบแรงกระแทก พบว่าต้องใช้พลังงานมากขึ้นทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักออกจากกัน ซึ่งหมายถึง มีการส่งผ่านแรงได้ดีจาก PVC ไปยังวัสดุเสริมซึ่งเป็นเฟสที่แข็งแรงกว่า และพบว่า มอดูลัส ค่าการทนต่อแรง และค่าการยึดดึงของแต่ละการทดสอบมีค่าสูงขึ้น หมายถึงชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้นและเหนียวเพิ่มขึ้น พิจารณาจากภาพถ่าย SEM พบว่า มีการยึดติดระหว่าง PVC กับวัสดุเสริม ช่องว่างระหว่างสองเฟสลดลงมาอย่างเห็นได้ชัดเจนและพบว่ามีกระจายตัวของวัสดุเสริมในชิ้นงาน เป็นต้น



รูปที่ 4.4a แสดงภาพการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคแกลบ



รูปที่ 4.4b แสดงภาพการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคไม้เคลือบ

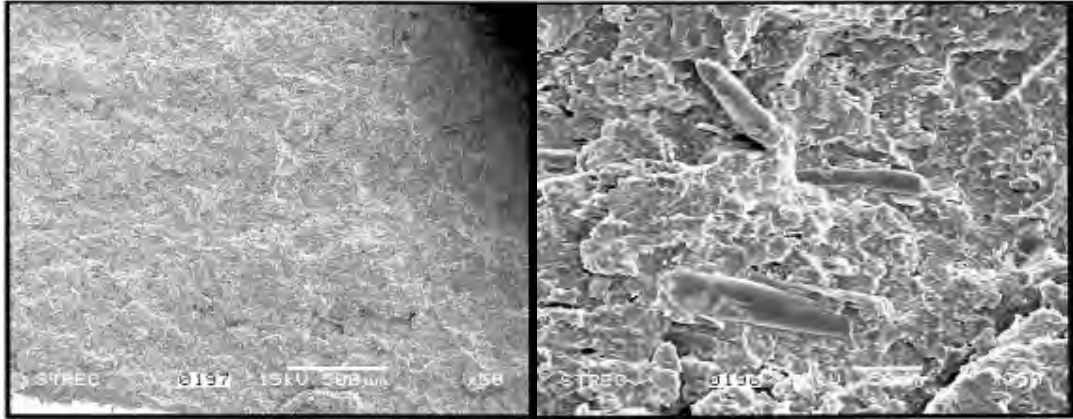


รูปที่ 4.4c แสดงภาพการปรับแต่งพื้นผิวนุภาคไม้เต็ง

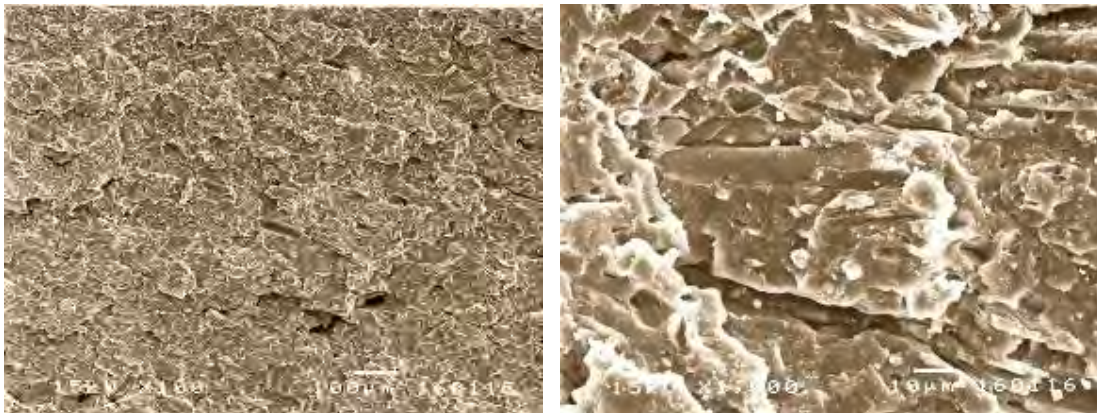
จากรูปที่ 4.4a-4.4c แสดงภาพถ่ายจาก SEM การปรับแต่งพื้นผิวนุภาคของวัสดุเสริม 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ เถ้าแกลบและผงไม้เต็ง ความเข้มข้นของสารประสาน 0.2และ1.0% เปรียบเทียบระหว่างอนุภาคที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิว พบว่า มีความแตกต่างกัน คือ ผิวนุภาคของวัสดุเสริมมีความเรียบเนียนมากขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบมีความเป็นรูพรุนสูงจากรูปที่ 4.4b พบว่า พื้นผิวของเถ้าแกลบถูกสารประสานเคลือบอย่างเห็นได้ชัดคือปริมาณรูพรุนลดลง แสดงถึงความเปลี่ยนแปลงหลังจากมีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน



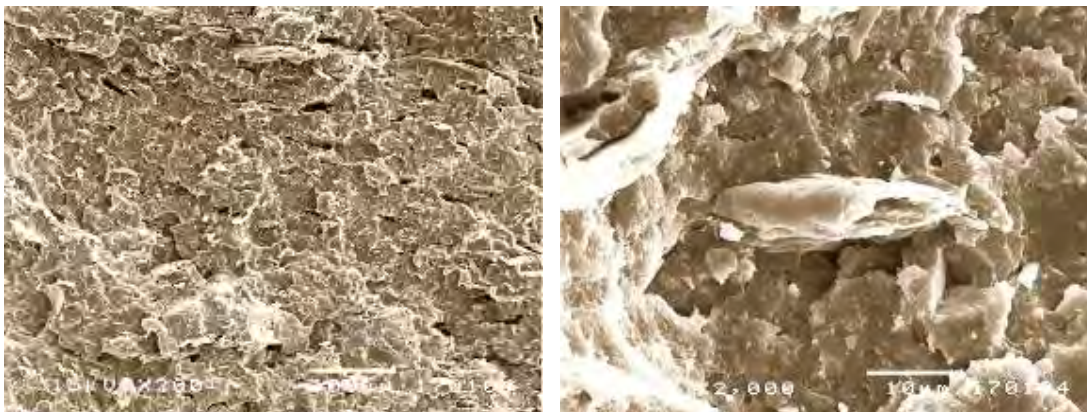
จากรูปที่ 4.4ก-4.4ง แสดงภาพถ่ายจากSEMของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/แคลบ ความเข้มข้นของสารประสาน 0.2 และ 1.0% ที่ขนาด 45 และ 250 ไมครอน ปริมาณวัสดุเสริม 20 และ 60 phr เปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน จากภาพถ่ายSEM พิจารณาจากภาพกว้าง พบว่า เมื่อปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน พื้นผิวของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความเรียบ เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น การยึดติดกันระหว่างPVCกับแคลบดีขึ้น สังเกตได้จาก ช่องว่างระหว่างสองเฟสลดลงแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของสารประสานในวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกดังสมการที่ 2



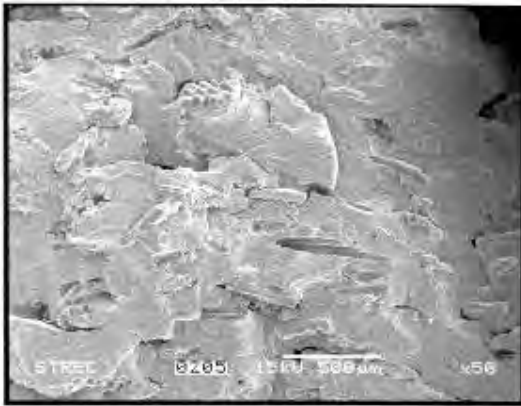
รูปที่ 4.4ก แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแคลบ ขนาด 45 $\mu$ m, 20 phr (Untreated)



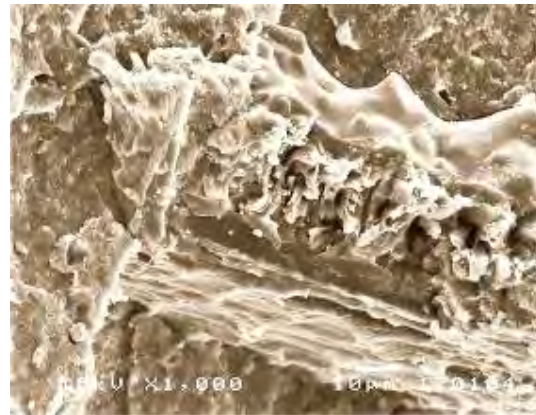
รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแคลบ ขนาด 45 $\mu$ m , 0.2%, 20 phr (treated)



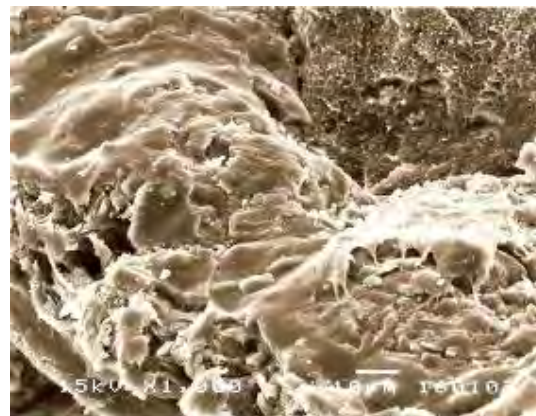
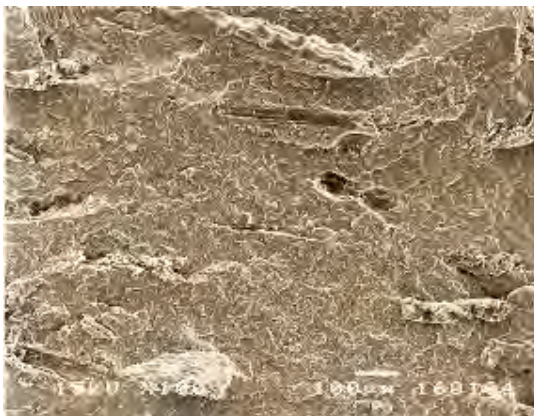
รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแคลบ ขนาด 45 $\mu$ m, 1.0%, 20 phr (treated)



รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 250μm, 20 phr(Untreated)

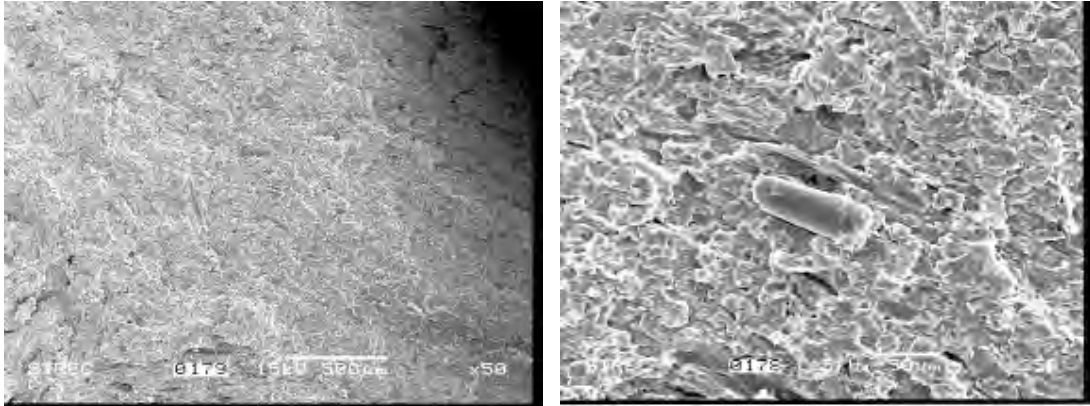


รูปที่ 4.4ข แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 250μm, 0.2%, 20 phr(treated)

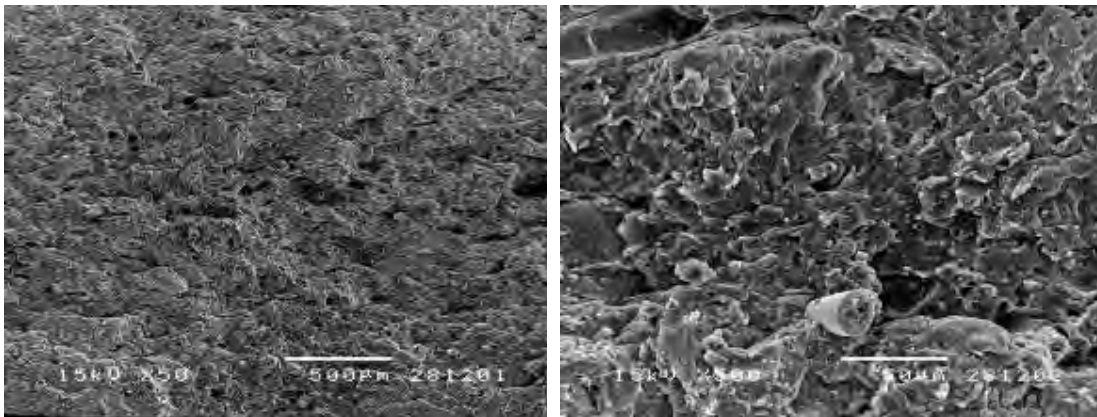


รูปที่ 4.4ง แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 250μm, 1.0%, 20 phr(treated)

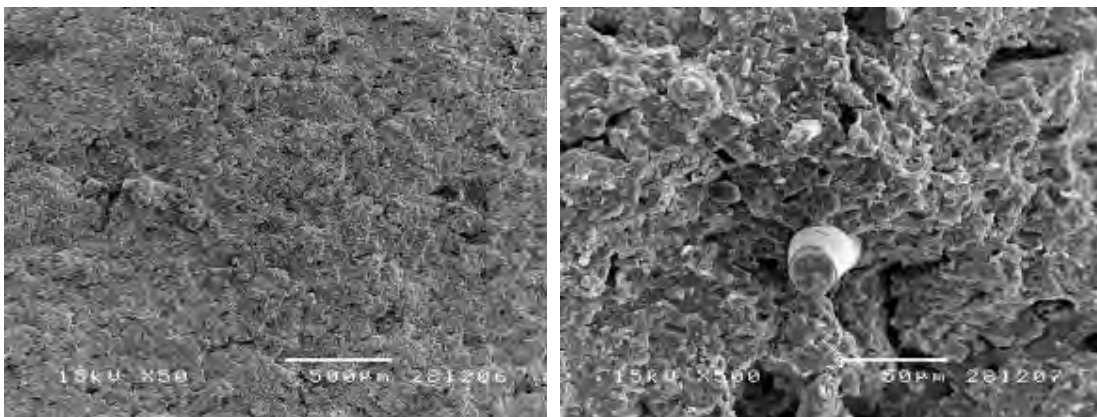
เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบจาก 20 เป็น 60 phr พบว่า มีปริมาณอนุภาคแกลบที่สังเกตได้ชัดเจน และมีการกระจายตัวของอนุภาคแกลบดีขึ้น



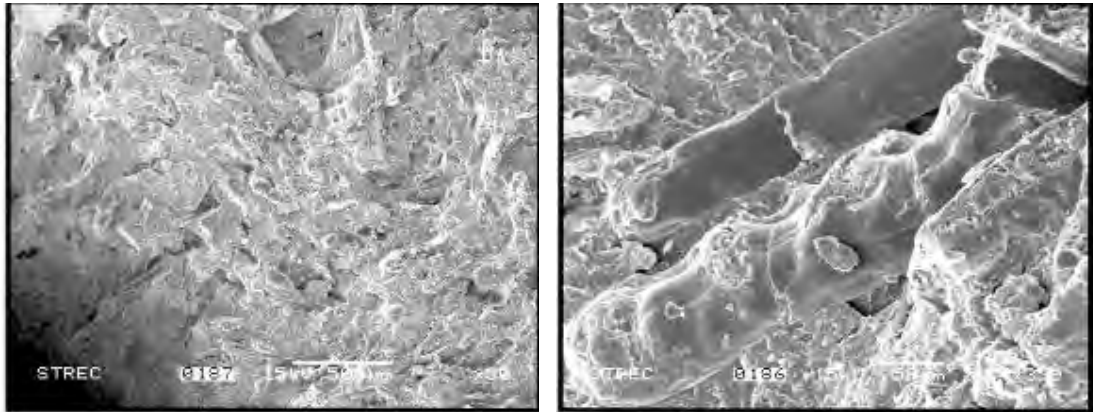
รูปที่ 4.4จ แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 45µm, 60 phr(Untreated)



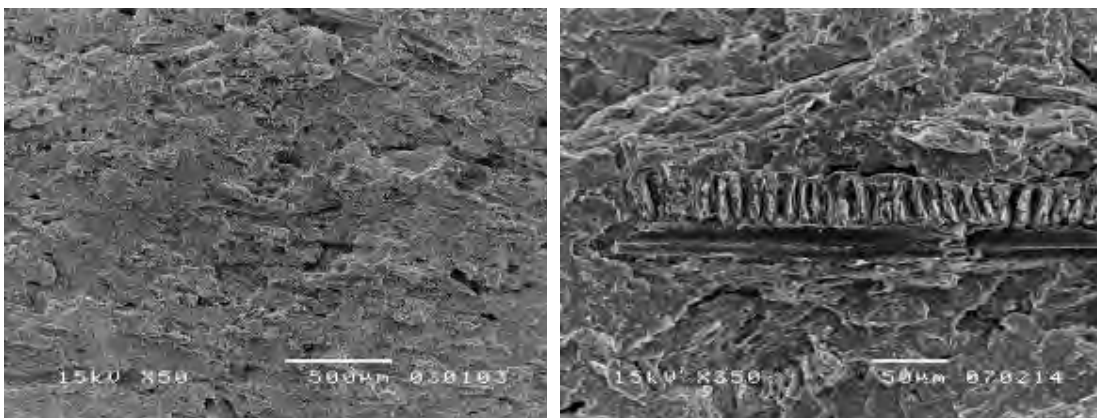
รูปที่ 4.4ฉ แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 45µm,0.2%, 60 phr(treated)



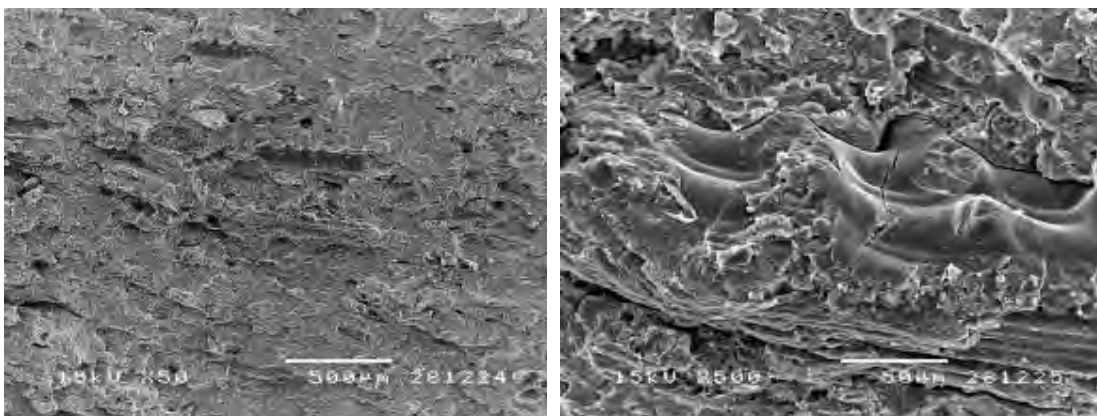
รูปที่ 4.4ช แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 45µm,1.0%, 60 phr(treated)



รูปที่ 4.4ซ แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 250 $\mu$ m, 60 phr(Untreated)

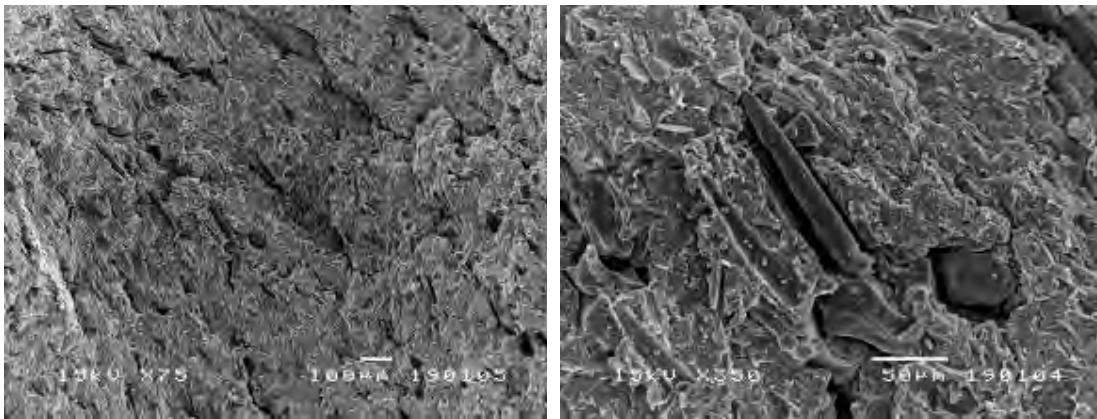


รูปที่ 4.4ฉ แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 250 $\mu$ m, 0.2%, 60 phr(treated)

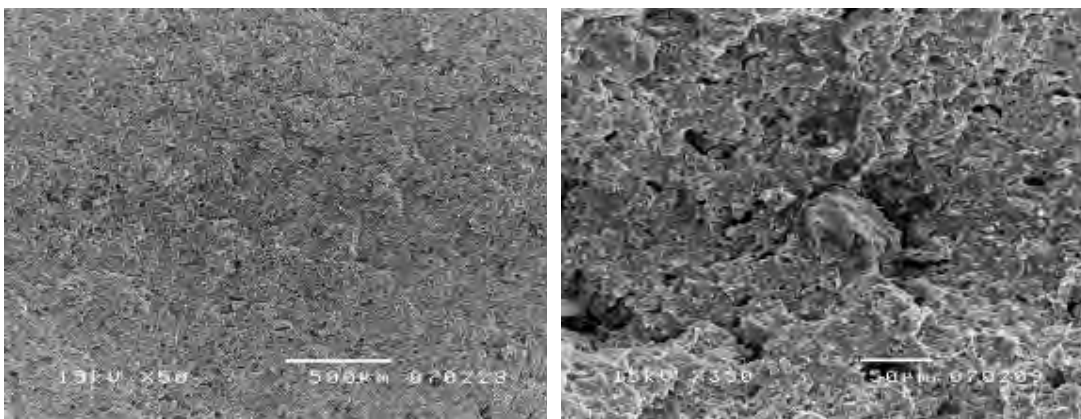


รูปที่ 4.4ญ แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ ขนาด 250 $\mu$ m, 1.0%, 60 phr(treated)

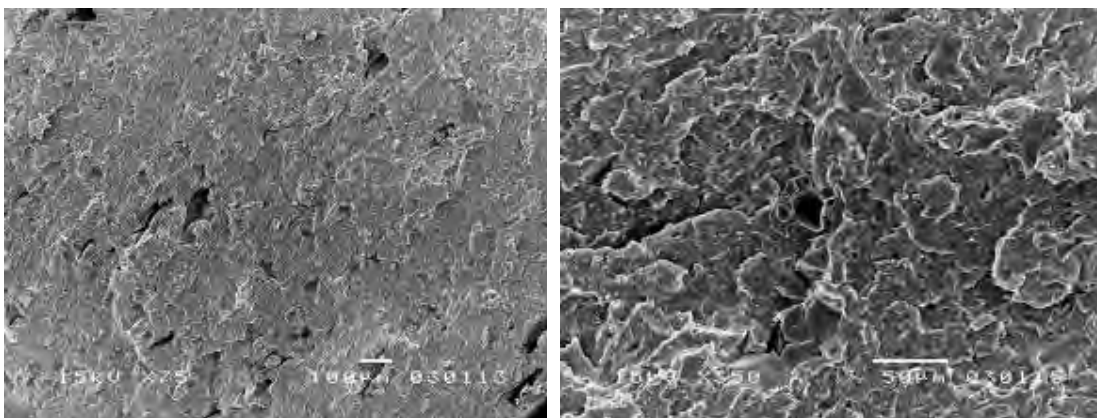
จากรูปที่ 4.4ก-4.4น แสดงภาพถ่ายจากSEMของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ถั่วแกลบ ความเข้มข้นของสารประสาน 0.2 และ 1.0% ที่ขนาด 45 และ 250 ไมครอน ปริมาณวัสดุเสริม 20และ60 phr เปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน จากภาพถ่ายSEMพิจารณาจากภาพกว้าง พบว่า เมื่อปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน พื้นผิวของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความเรียบ เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น การยึดติดกันระหว่างPVCกับถั่วแกลบดีขึ้นสังเกตจากช่องว่างระหว่างทั้งสองเฟสลดลงแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของสารประสานในวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกตั้งสมาการที่ 4และมีการกระจายตัวของอนุภาคถั่วแกลบในเนื้อของPVCดีขึ้น



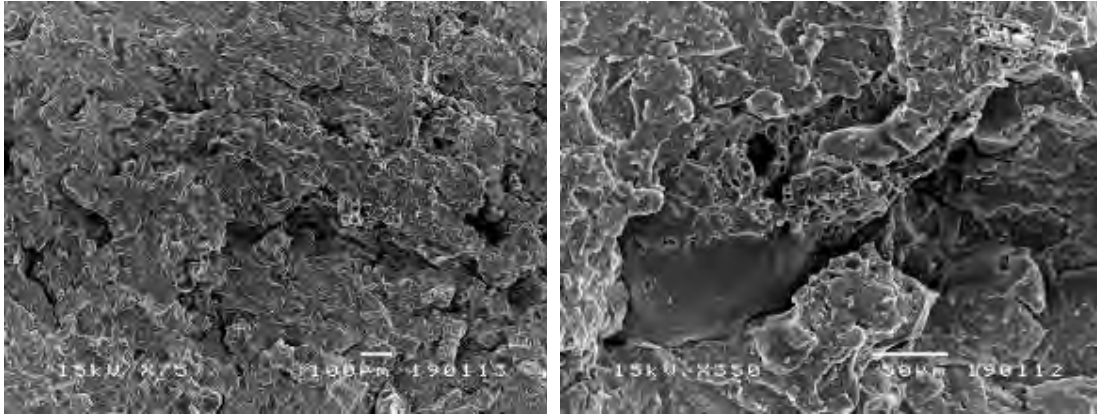
รูปที่ 4.4ก แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของเถ้าแกลบ ขนาด 45µm, 20 phr(Untreated)



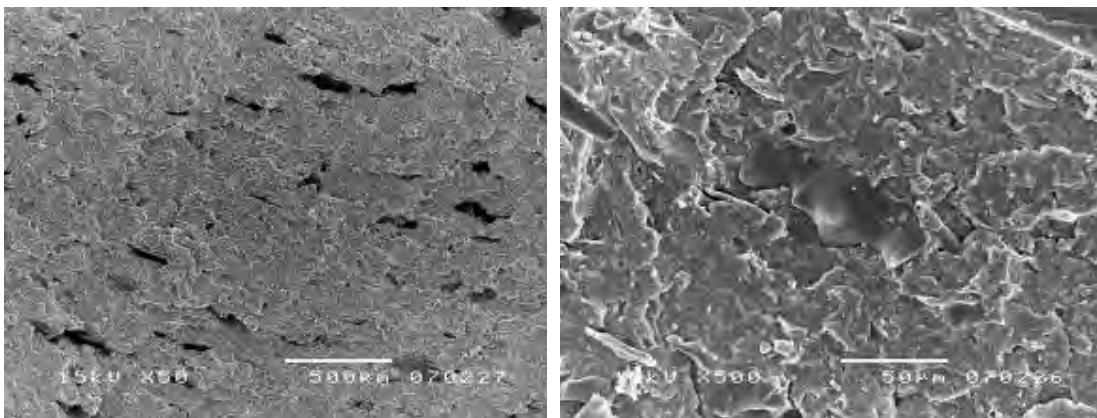
รูปที่ 4.4ข แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของเถ้าแกลบขนาด 45µm,0.2%, 20 phr(treated)



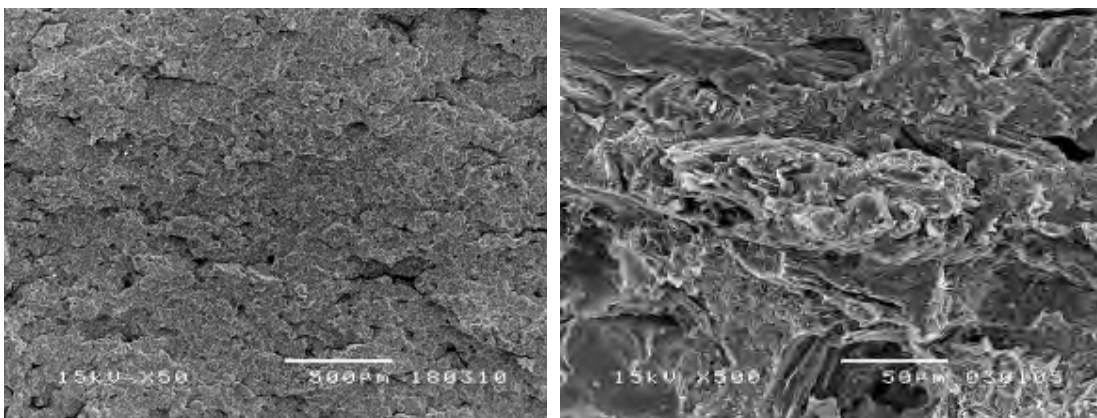
รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของเถ้าแกลบ ขนาด 45µm,1.0%, 20 phr(treated)



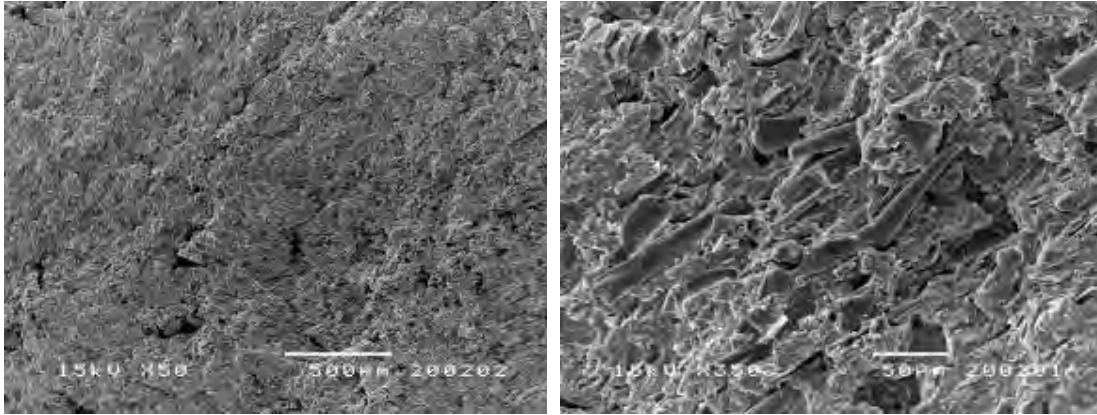
รูปที่ 4.4ก แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของเปลือกไข่ ขนาด 250 $\mu$ m, 20 phr(Untreated)



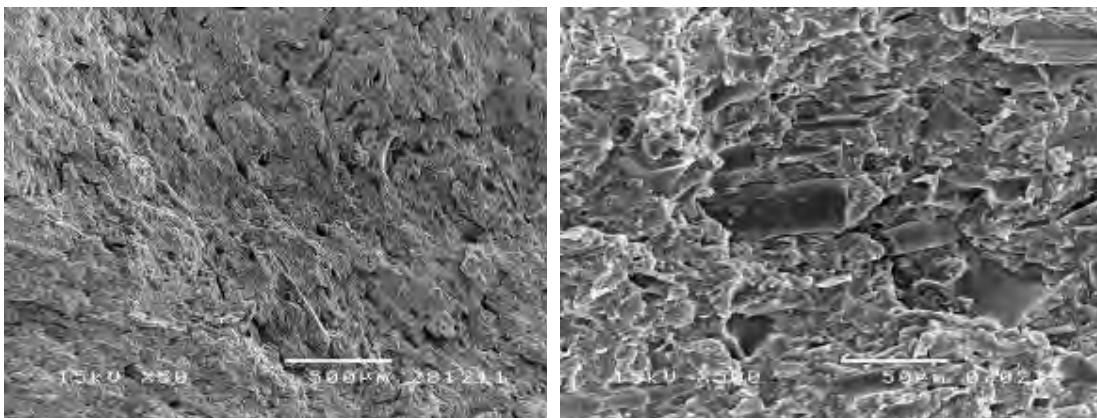
รูปที่ 4.4ข แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของเปลือกไข่ ขนาด 250 $\mu$ m, 0.2%, 20 phr(treated)



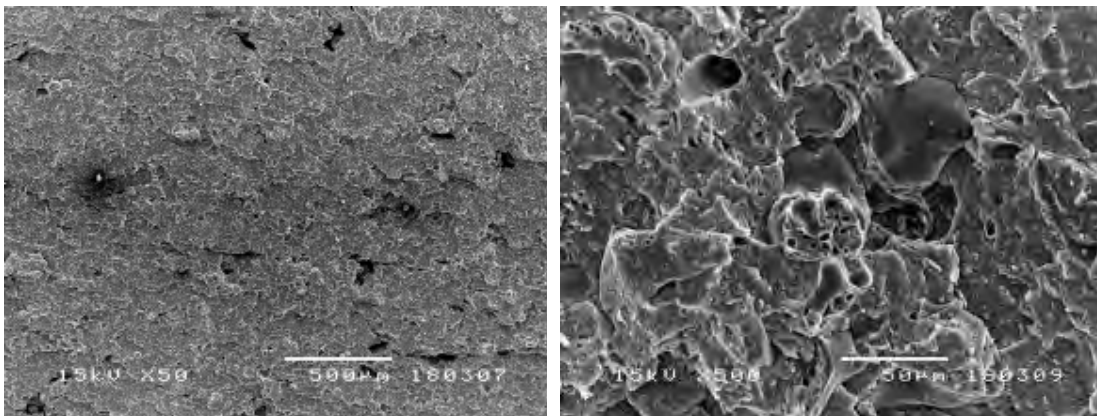
รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของเปลือกไข่ ขนาด 250 $\mu$ m, 1.0%, 20 phr(treated)



รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการกระจายตัวของเส้นแกลบ ขนาด 45µm, 60 phr(Untreated)

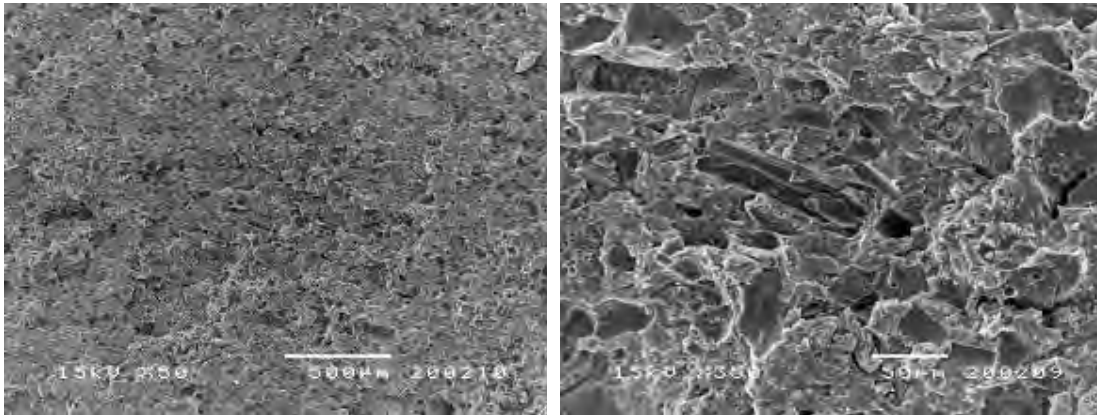


รูปที่ 4.4ต แสดงภาพการกระจายตัวของเส้นแกลบ ขนาด 45 µm,0.2%, 60 phr(treated)

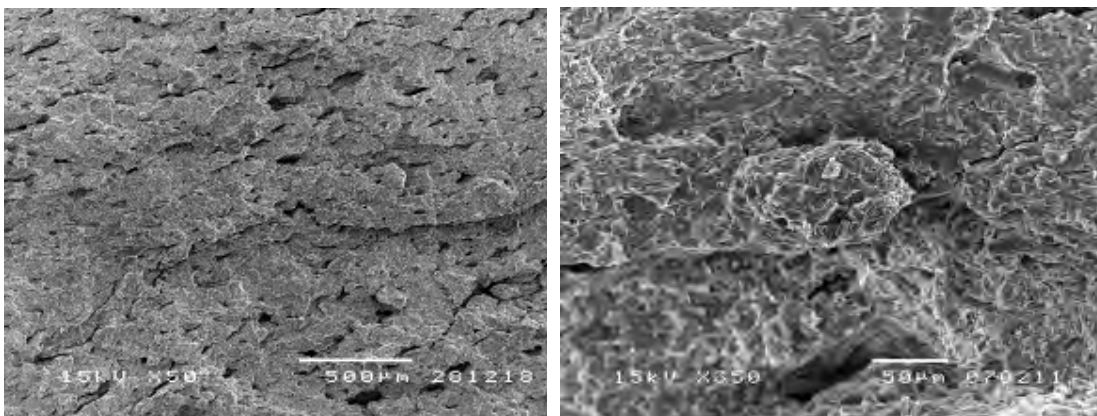


รูปที่ 4.4ด แสดงภาพการกระจายตัวของเส้นแกลบ ขนาด 45µm,1.0%, 60 phr(treated)

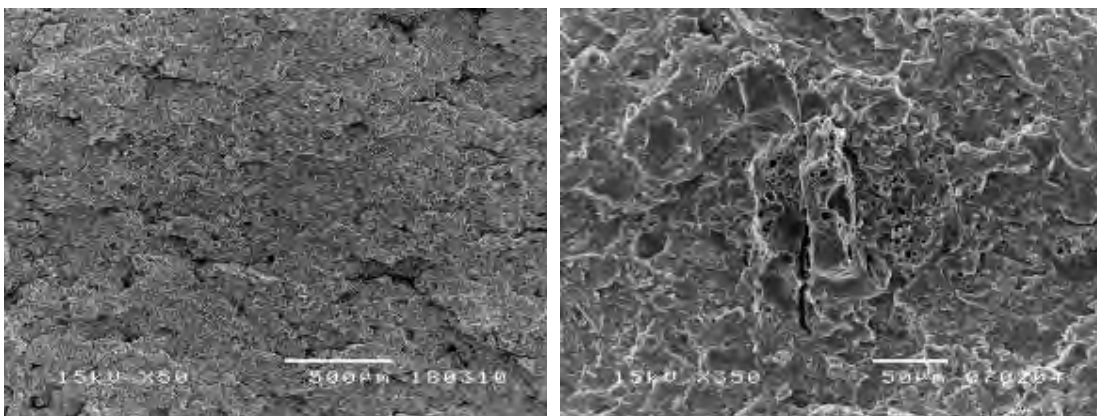




รูปที่ 4.4ท แสดงภาพการกระจายตัวของเถ้าแคลบ ขนาด 250µm, 60 phr(Untreated)

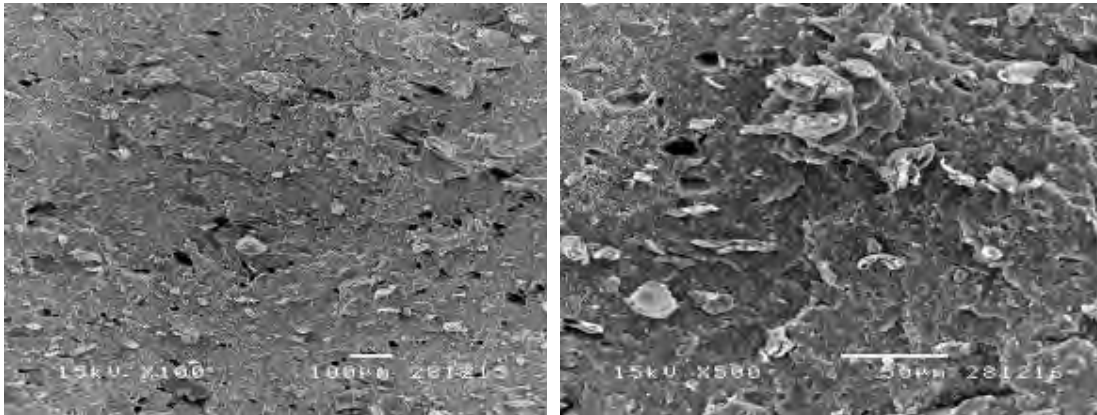


รูปที่ 4.4ข แสดงภาพการกระจายตัวของเถ้าแคลบ ขนาด 250µm,0.2%, 60 phr(treated)

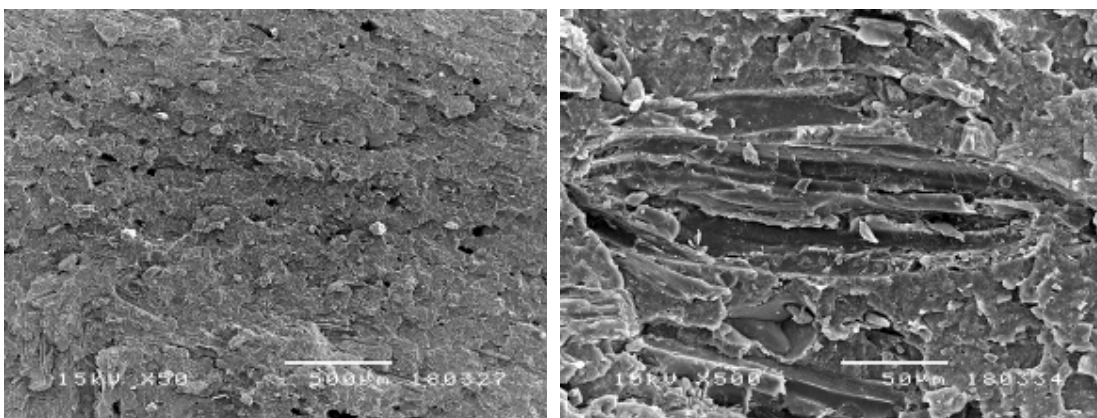


รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการกระจายตัวของเถ้าแคลบ ขนาด 250µm,1.0%, 60 phr(treated)

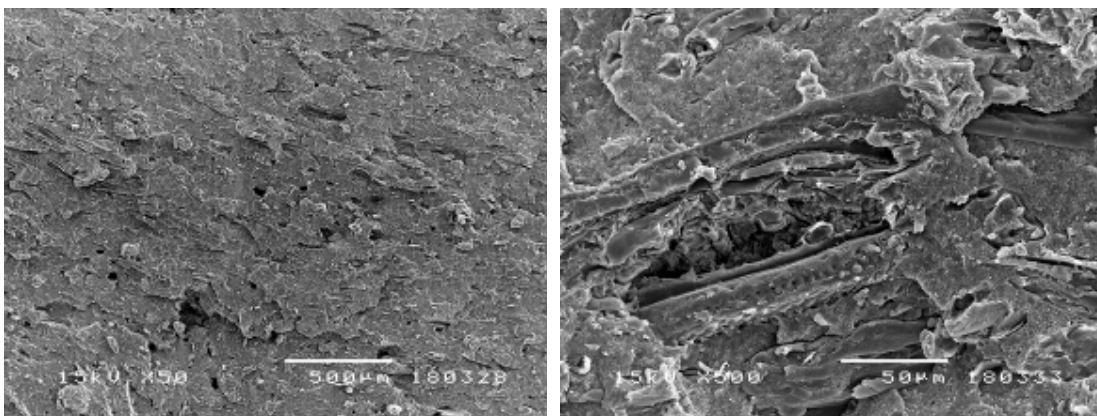
จากรูปที่ 4.4บ-4.4ค แสดงภาพถ่ายจากSEMของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ไม้เต็ง ความเข้มข้นของสารประสาน 0.2 และ 1.0% ที่ขนาด 75 และ 250 ไมครอน ปริมาณวัสดุเสริม 20 และ 60 phr เปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน จากภาพถ่ายSEMพิจารณาพบว่า เมื่อปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน การยึดติดกันระหว่างPVCกับเส้นใยไม้เต็งขึ้นสังเกตจากช่องว่างระหว่างทั้งสองเฟสลดลงแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของสารประสานในวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกดังสมการที่ 5 และมีการกระจายตัวของอนุภาคไม้เต็งในเนื้อของPVCดีขึ้นแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณผงไม้มากขึ้น



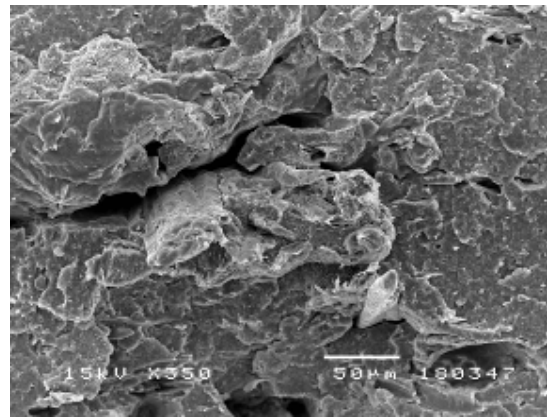
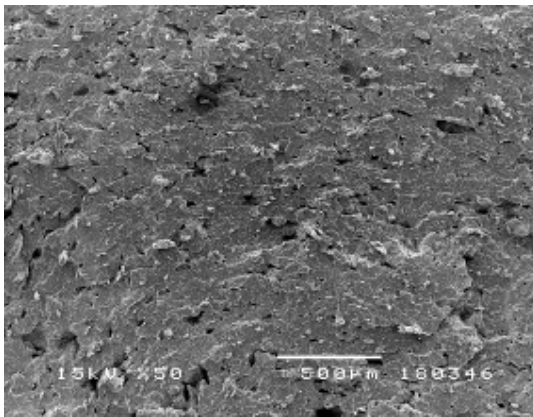
รูปที่ 4.4บ แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 75µm, 20 phr(Untreated)



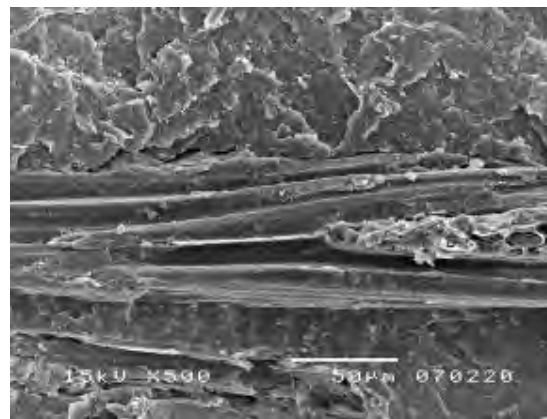
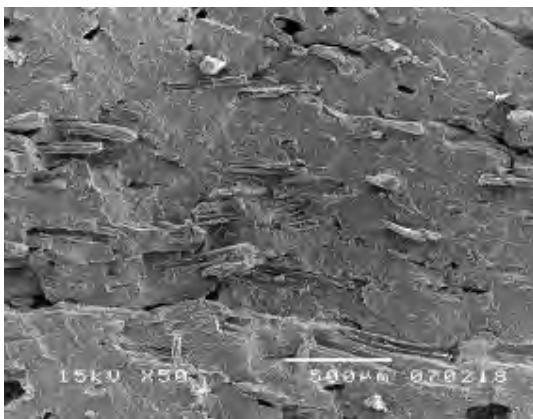
รูปที่ 4.4ป แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 75µm,0.2%, 20 phr(treated)



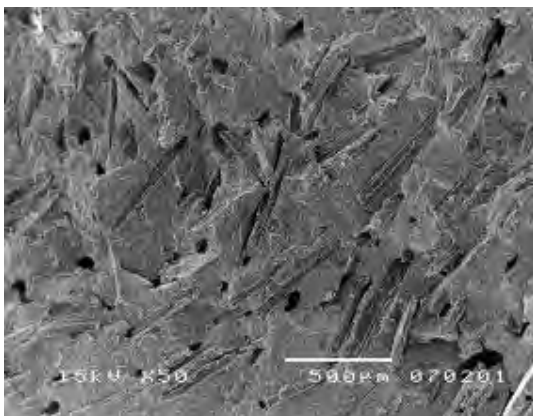
รูปที่ 4.4ผ แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 75µm,1.0%, 20 phr(treated)



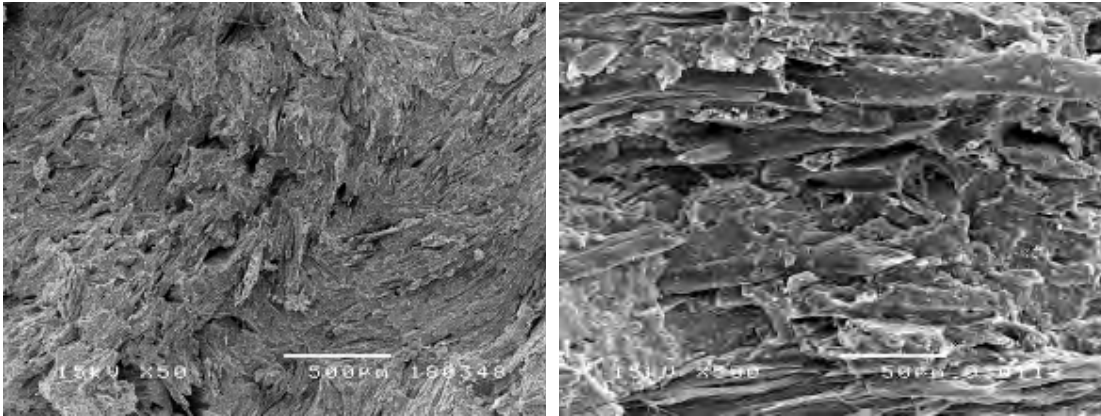
รูปที่ 4.4ฟ แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 250μm, 20 phr(Untreated)



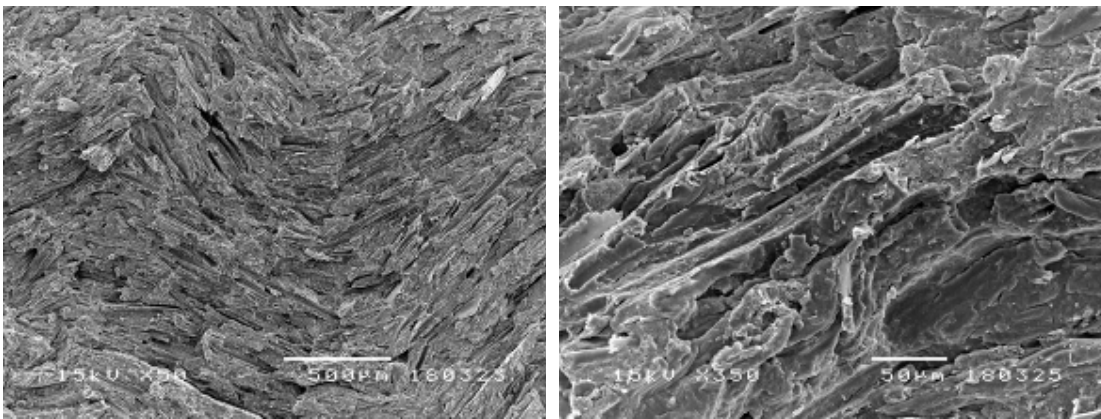
รูปที่ 4.4พ แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 250μm,0.2%, 20 phr(treated)



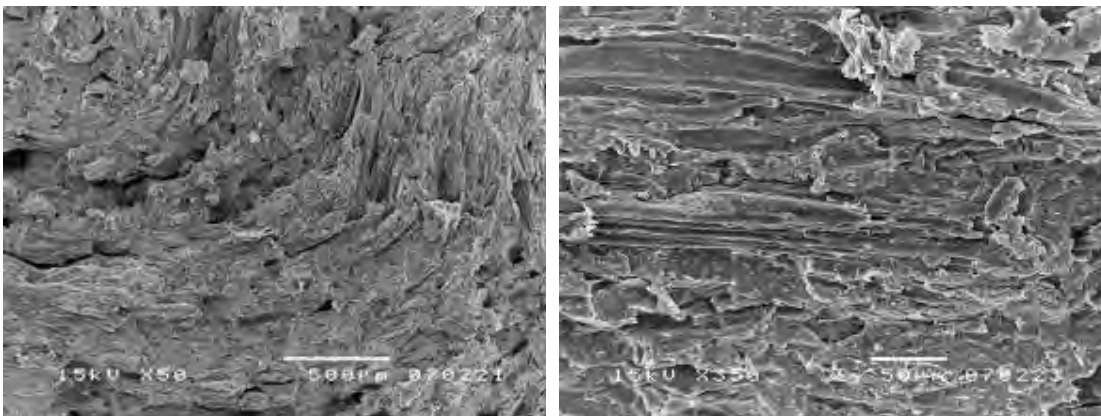
รูปที่ 4.4ค แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 250μm,1.0%, 20 phr(treated)



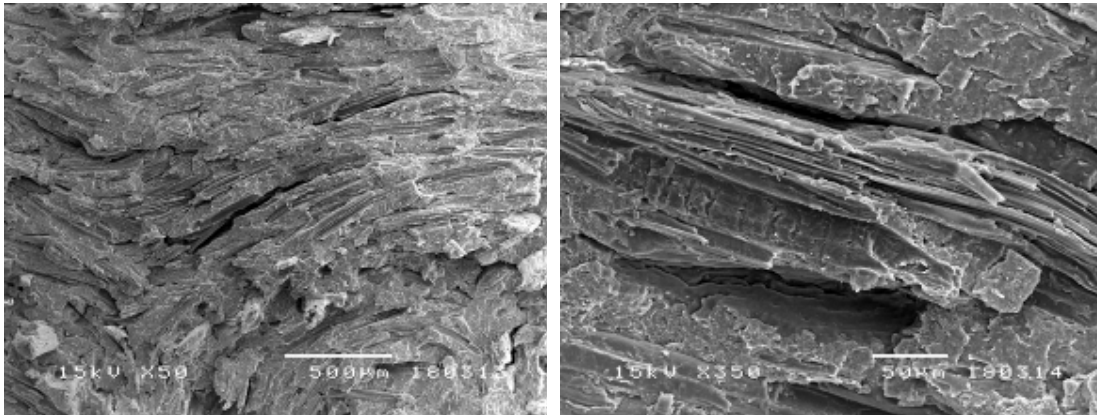
รูปที่ 4.4ก แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 75µm, 60 phr(Untreated)



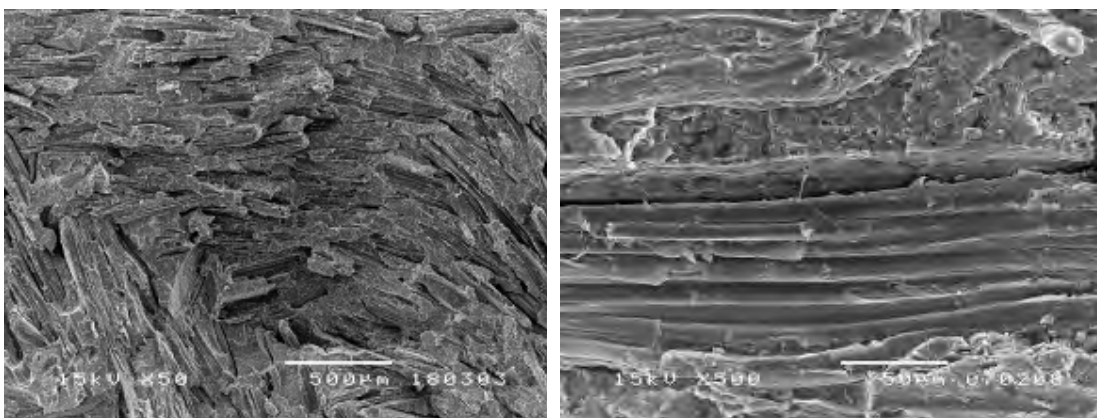
รูปที่ 4.4ม แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 75µm,0.2%, 60 phr(treated)



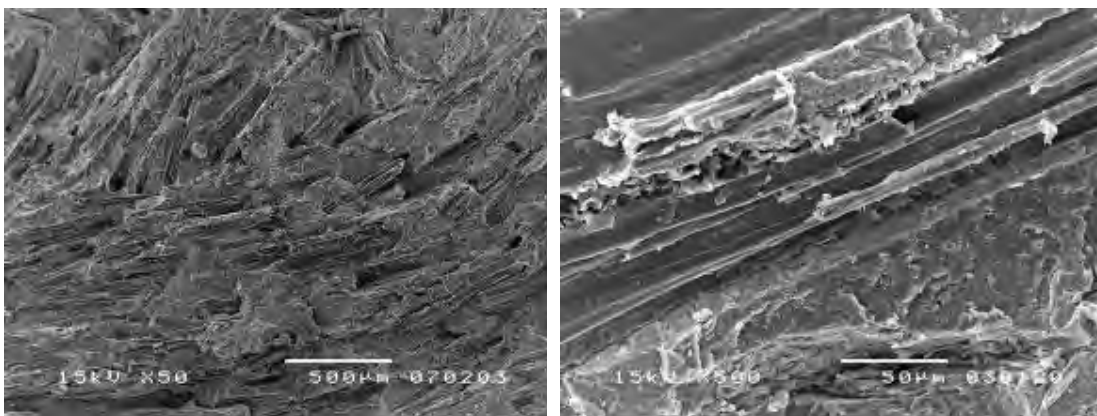
รูปที่ 4.4ย แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 75µm,1.0%, 60 phr(treated)



รูปที่ 4.4ร แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 250µm, 60 phr(Untreated)



รูปที่ 4.4ล แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 250µm,0.2%, 60 phr(treated)



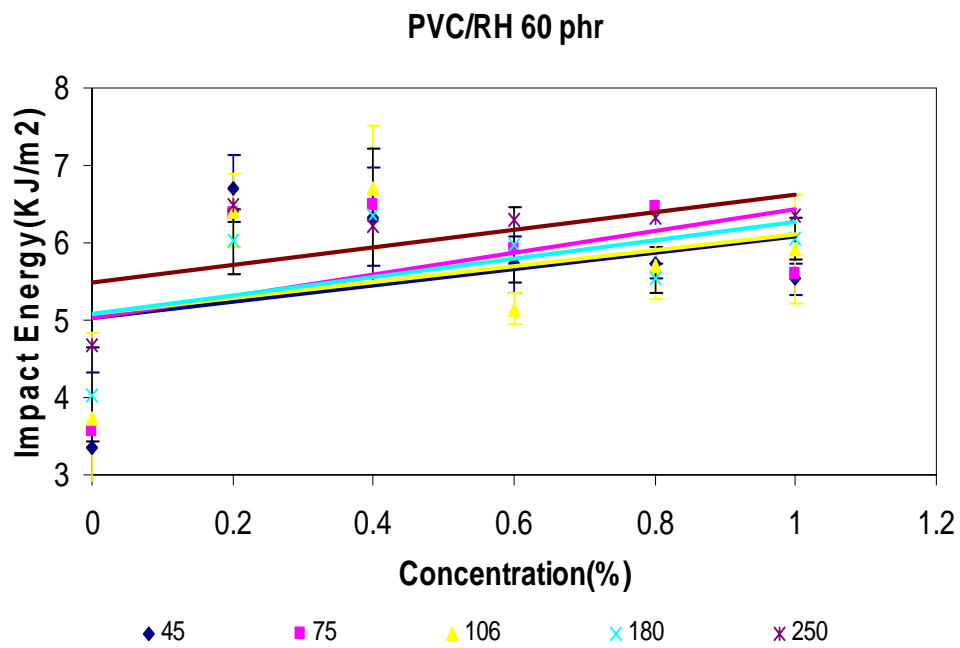
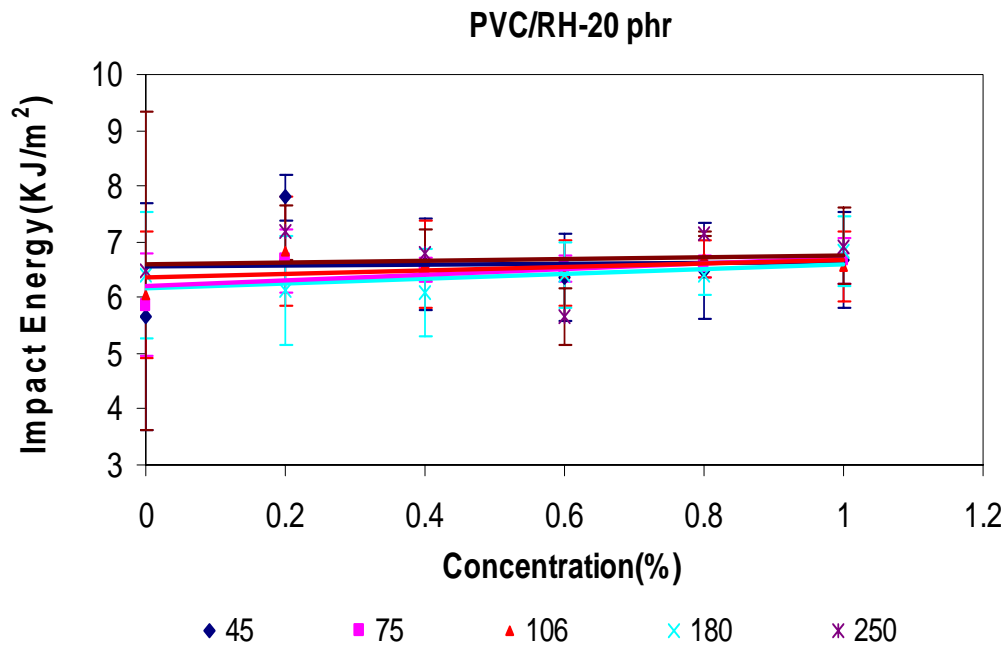
รูปที่ 4.4ว แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาด 250µm,1.0%, 60 phr(treated)

### 4.3 สมบัติการทนต่อแรงกระแทก (Impact property)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทนต่อแรงกระแทกแบบ Izod คือ เป็นการทดสอบแบบที่มีกรรบอกขึ้นงานเพื่อนำมาทดสอบแรงกระแทก เพื่อเปรียบเทียบการทนต่อแรงกระแทกและพลังงานที่ใช้ในการกระแทกผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงแคลบ PVC/ผงเถ้าแคลบและPVC/ไม้เต็งที่มีขนาดอนุภาค 45, 75, 106, 180, และ 250 ไมครอน โดยปริมาณของวัสดุเสริมที่เดิม คือ 20 และ 60 phr และศึกษาผลของสารประสานที่มีต่อการทนต่อแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกในปริมาณความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0% จนขึ้นงานแตกหัก

จากรูป 4.5 เมื่อทำการปรับแต่งพื้นผิวแคลบที่ปริมาณการเติมแคลบ 20 phr พบว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทนต่อแรงกระแทกได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ถูกปรับแต่งพื้นผิวราว 8.93 % และที่ปริมาณการเติมผงแคลบ 60 phr วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทนต่อแรงกระแทกได้ถึง 59.32% ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อปรับแต่งพื้นผิวแคลบด้วยสารประสานทำให้ช่องว่างระหว่างสองเฟสลดน้อยลง และเมื่อมีผิวสัมผัสมากขึ้นเมื่อขึ้นงานรับแรงกระแทกก็สามารถส่งผ่านแรงจากPVCไปยังผงแคลบได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ถูกปรับแต่งพื้นผิวแต่เมื่อปริมาณผงแคลบเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 phr พบว่าการทนต่อแรงกระแทกลดน้อยลงไปอีกราว 7.22% มีสาเหตุมาจากว่าแคลบเป็นวัฏภาคที่มีความแข็งเพราะแคลบมีซิลิกาและมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ การใส่ผงแคลบในวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงแคลบส่งผลให้ไม้พลาสติกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงแคลบจาก 45 ถึง 250 ไมครอน จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคแคลบไม่มีอิทธิพลต่อการทนแรงกระแทกของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก

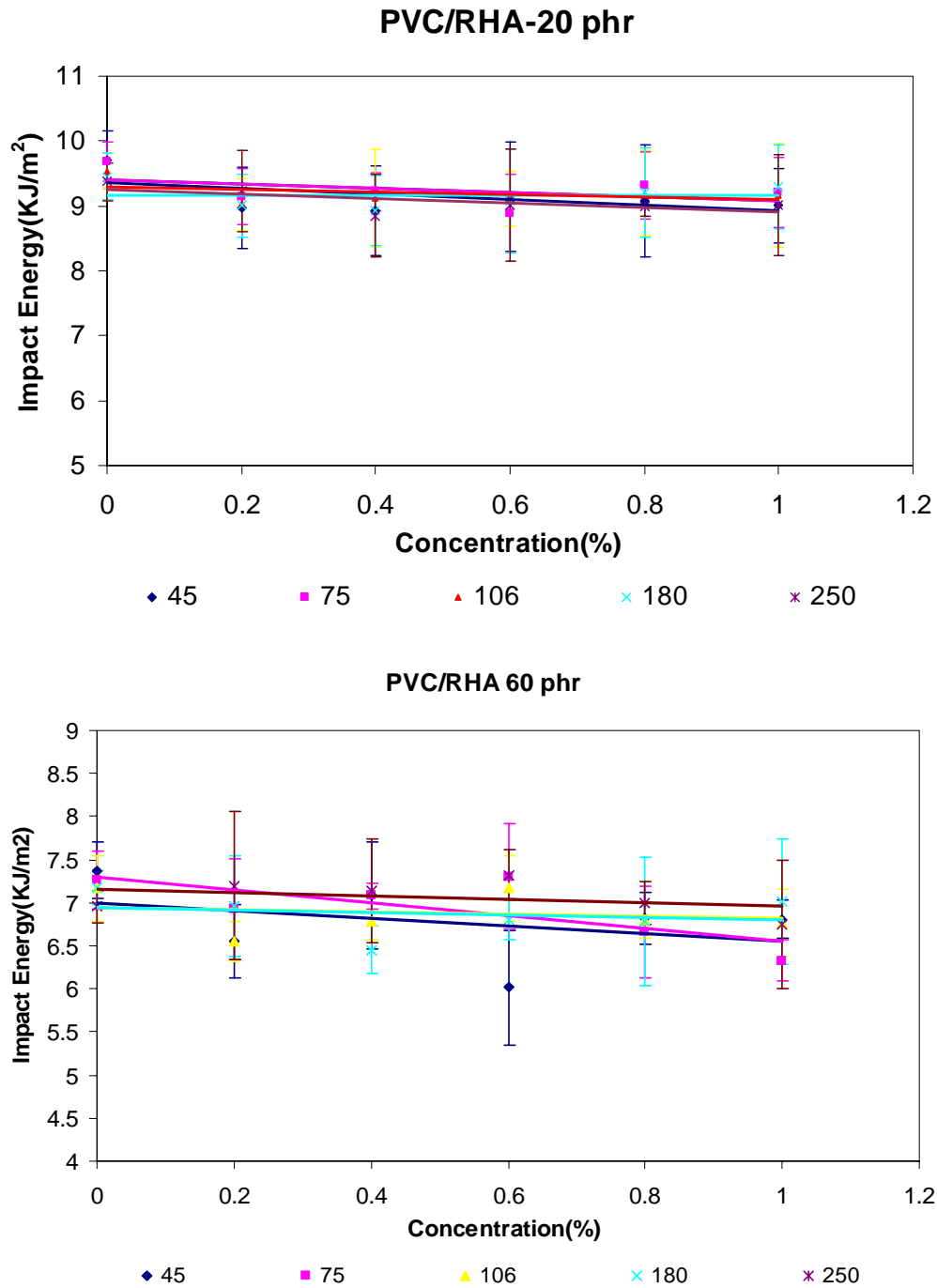


รูปที่ 4.5 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงแคลบที่ขนาดต่างๆ และที่ปริมาณ 20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%



จากรูป 4.6 เมื่อทำการปรับแต่งพื้นผิวเข้าเกลบที่ปริมาณการเติมเข้าเกลบ 20 phr พบว่า ไม้พลาสติกทนต่อแรงกระแทกลดลงราว 4.84 % และที่ปริมาณการเติมเข้าเกลบเป็น 60 phr พบว่า ไม้พลาสติกทนต่อแรงกระแทกลดลงราว 4.72 % เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมเข้าเกลบจาก 20 เป็น 60 phr ค่าการทนต่อแรงกระแทกลดลงราว 24.02 % ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อปรับแต่งพื้นผิวเข้าเกลบด้วยสารประสานทำให้ช่องว่างที่เกิดจากความแตกต่างของระหว่างสองเฟสลดน้อยลง สามารถส่งผ่านแรงจากPVCไปยังผงเข้าเกลบได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ถูกปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน แต่เข้าเกลบเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากเพราะเข้าเกลบมีเพียงซิลิกาและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความแข็งและเปราะมากขึ้นเมื่อเติมลงไปไม้พลาสติก และเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เข้าเกลบยิ่งเปราะและแตกหักได้ง่ายขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกัน 3 ระบบ ไม้พลาสติกที่เติมเข้าเกลบมีความเปราะมากที่สุด

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงเข้าเกลบจาก 45 ถึง 250 ไมครอน จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคเข้าเกลบไม่มีอิทธิพลต่อการทนแรงกระแทกของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก

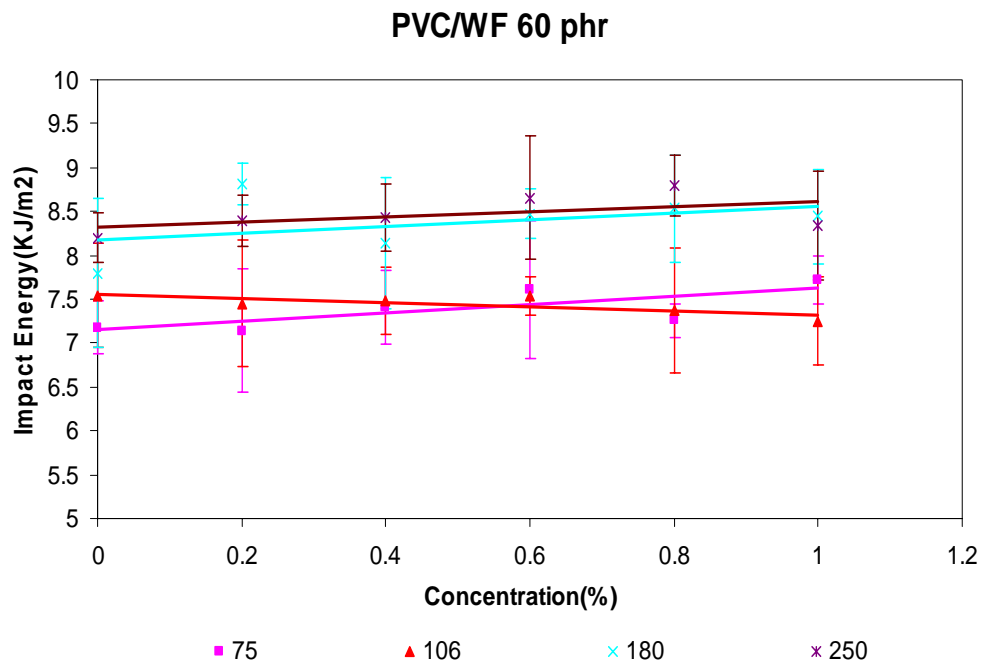
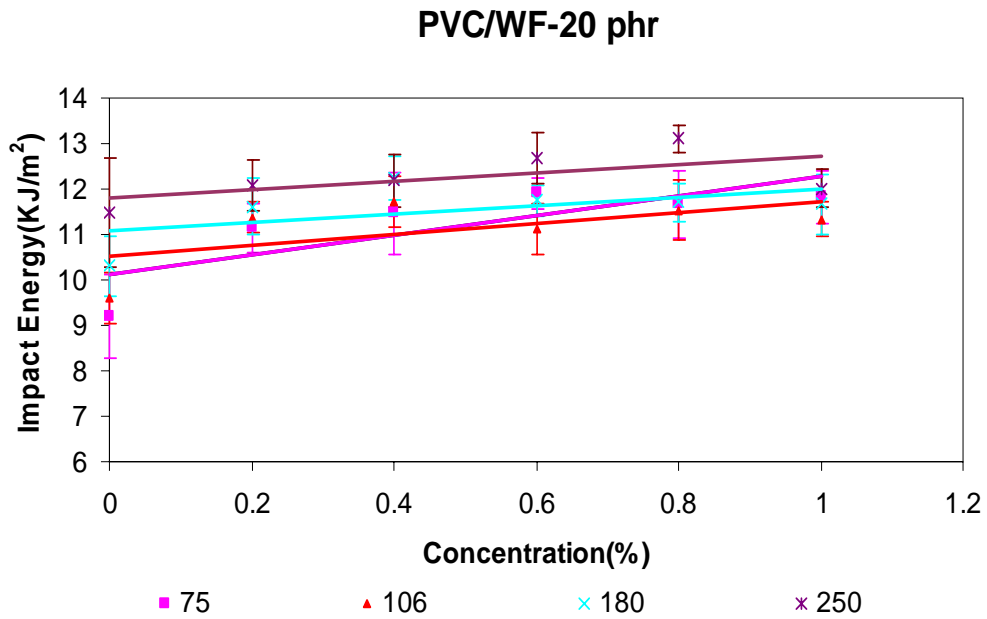


รูปที่ 4.6 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงเถ้าแกลบที่ขนาดต่างๆ และที่ปริมาณ 20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%

จากรูป 4.7 เมื่อทำการปรับแต่งพื้นผิวผงไม้เต็งที่ปริมาณการเติมผงไม้เต็ง 20 phr พบว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ถูกปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน โดยค่าการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยแล้วราว 16.86% และที่ปริมาณการเติมผงไม้เต็ง 60 phr พบว่าค่าการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 2.95% และเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้เต็งจาก 20 เป็น 60 phr พบว่า การทนต่อแรงกระแทกถดถอยลงไปอีกราว 33.05 % ทั้งนี้เนื่องจาก และเนื่องจากว่าไม้เต็งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบจำนวนมากประมาณ 40-50%[16] ช่วยลดการหดตัวของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความเปราะลดลงและมีความทนต่อแรงกระแทกมากขึ้น[21] จึงทำให้ชิ้นงานมีความเหนียวและแข็งเพิ่มมากขึ้นเพราะไม้เป็นเฟสที่มีความแข็งมากกว่าPVCอยู่แล้วประกอบกับเมื่อปรับแต่งพื้นผิวผงไม้เต็งด้วยสารประสานทำให้สามารถลดขนาดและปริมาณช่องว่างระหว่างที่เฟสให้น้อยลง

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงไม้เต็งจาก 45 ถึง 250 ไมครอน จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคผงไม้เต็งมีอิทธิพลต่อการทนแรงกระแทกของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ทั้งสองปริมาณของผงไม้ที่เติม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคไม้เต็งใหญ่ขึ้น

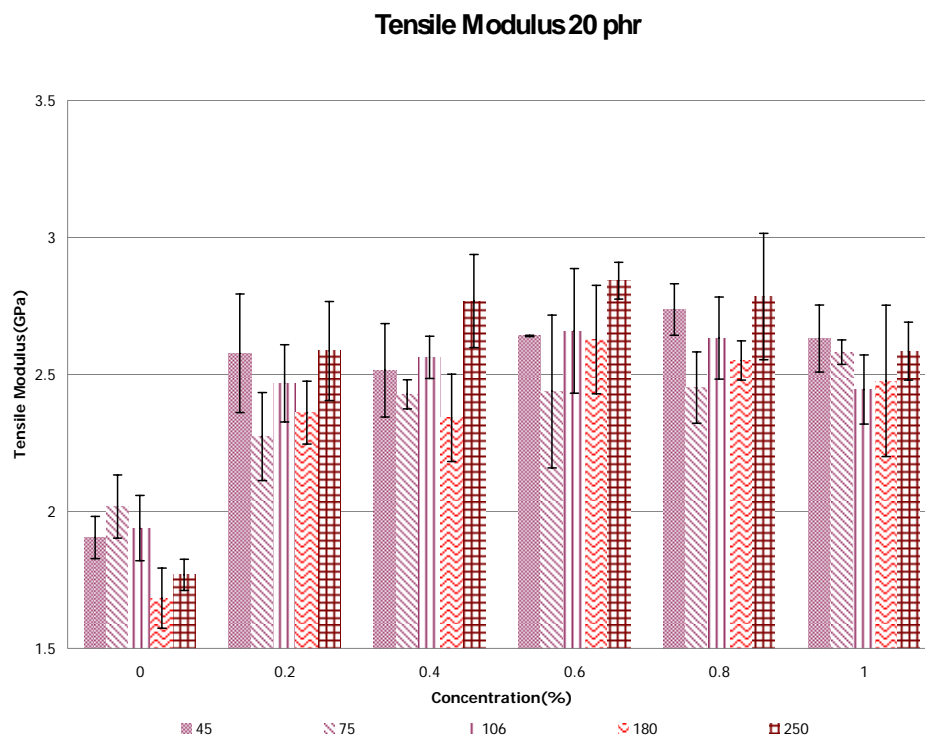
เมื่อพิจารณาวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ คือ PVC/แคลบ PVC/ถั่วแคลบ และPVC/ไม้เต็ง พบว่า วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีเมื่อมีการปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริมด้วยสารประสาน โดยสามารถเรียงตามความสามารถในการทนแรงกระแทกจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PVC/ไม้เต็ง PVC/ถั่วแคลบ และPVC/แคลบ ตามลำดับ



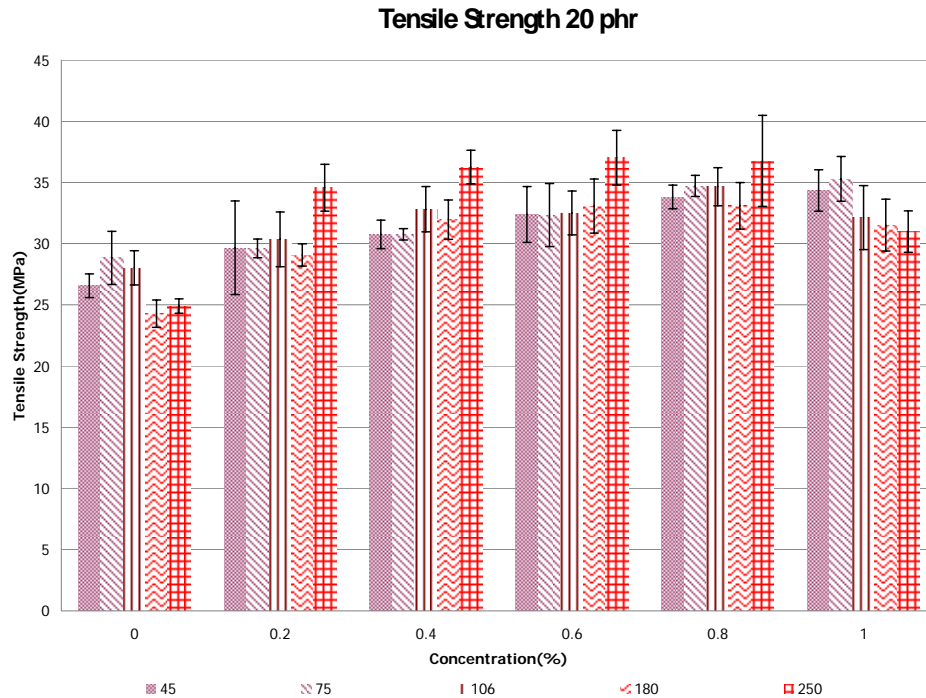
รูปที่ 4.7 Izod impact strength ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้เต็งที่ขนาดต่างๆ และที่ปริมาณ 20, 60 phr และที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%

#### 4.4 สมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile property)

การศึกษาการทนต่อแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึง(Tensile Modulus) และการทนต่อแรงดึง(Tensile Strength) ของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกจากPVCกับวัสดุเสริมทั้ง 3 ระบบ คือ PVC/แกลบ PVC/เถ้าแกลบ และPVC/ไม้เต็ง ที่มีการใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิว กับไม้ปรับแต่งพื้นผิว ในขั้นตอนการทดลองเมื่อสามารถเลือกช่วงความเข้มข้นของสารประสานที่ดีที่สุดได้แล้วพิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของวัสดุเสริมและพิจารณาผลของความแตกต่างเมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุเสริมจาก 20 phr เป็น 60 phr พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดึงและการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สารประสาน พบว่า ช่วงความเข้มข้นเหมาะสม คือ 0.4-0.8% และเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของวัสดุเสริม โดยแสดงดังกราฟต่อไปนี้



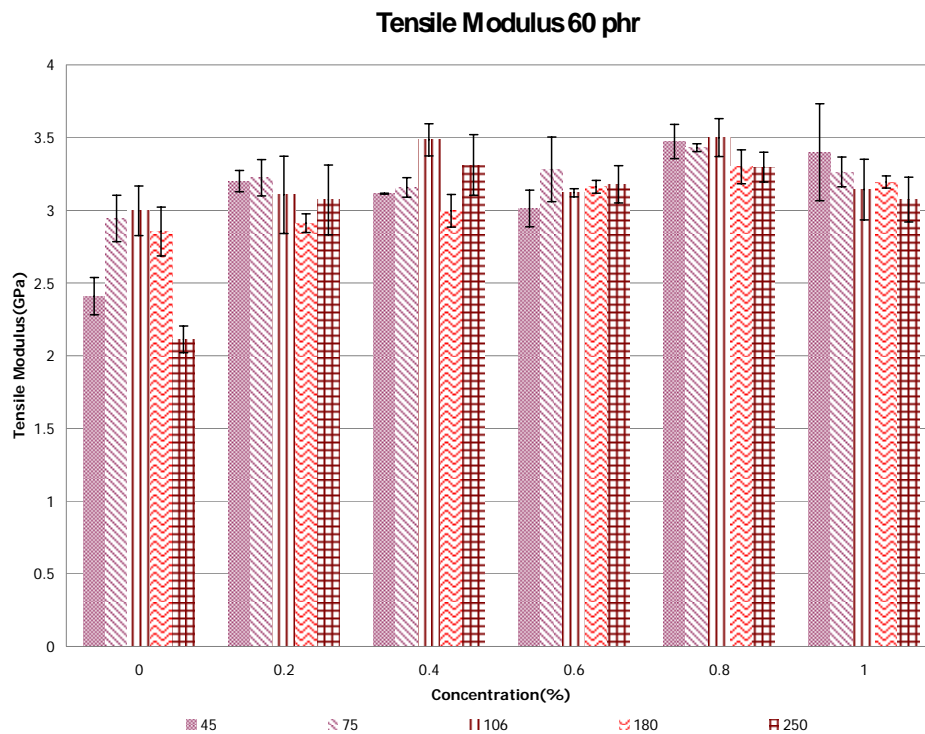
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%



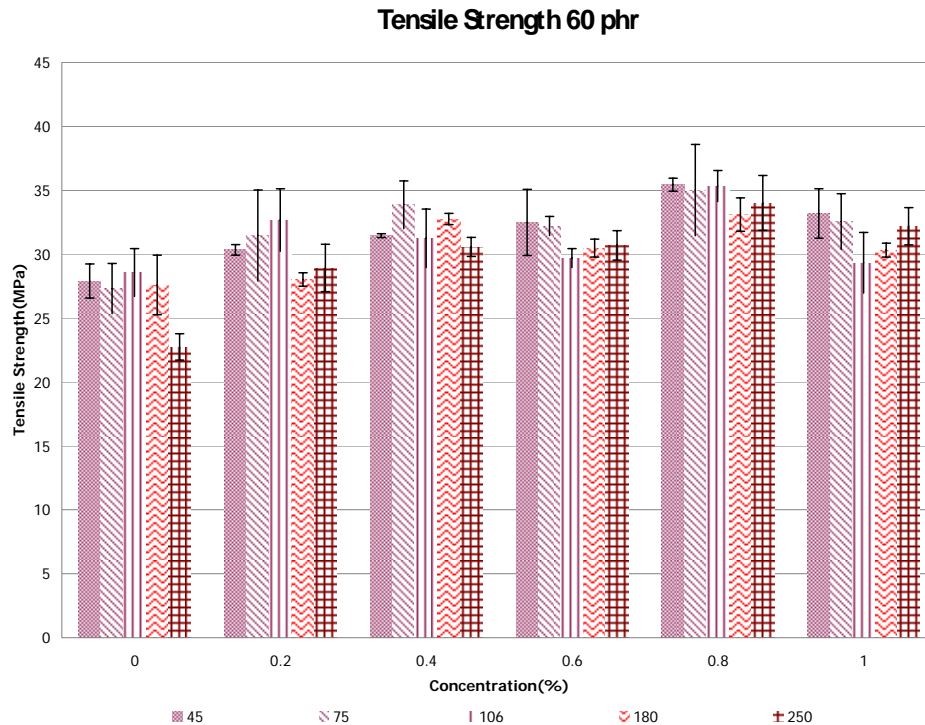
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดและปริมาณของแคลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ในปริมาณแคลบ 20 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มี การปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคแคลบด้วยสารประสาน ประมาณ 1.86 GPa ค่าทนต่อแรงดึงประมาณ 27.31 MPa และเมื่อมีการใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวแคลบ พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุ ประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน ให้ค่า มอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดราว 2.84 GPa และ 37.02 MPa ตามลำดับ มีค่า เพิ่มขึ้นราว 34.56% และจากรูปที่ 4.9 ค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นราว 26.24% จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการใช้สารประสานจะทำให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถทน ต่อแรงดึงได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการใช้สารประสาน

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบเป็น 60 phr พบว่าค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคแกลบด้วยสารประสานประมาณ 2.66 GPa ค่าทนต่อแรงดึงประมาณ 26.81 MPa เมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวแกลบพบว่า วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ความเข้มข้นเดียวกันที่ขนาด 45 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดราว 3.50 GPa และ 35.31 MPa ตามลำดับ และค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิว เพิ่มขึ้นราว 23.91 และ 24.07% ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

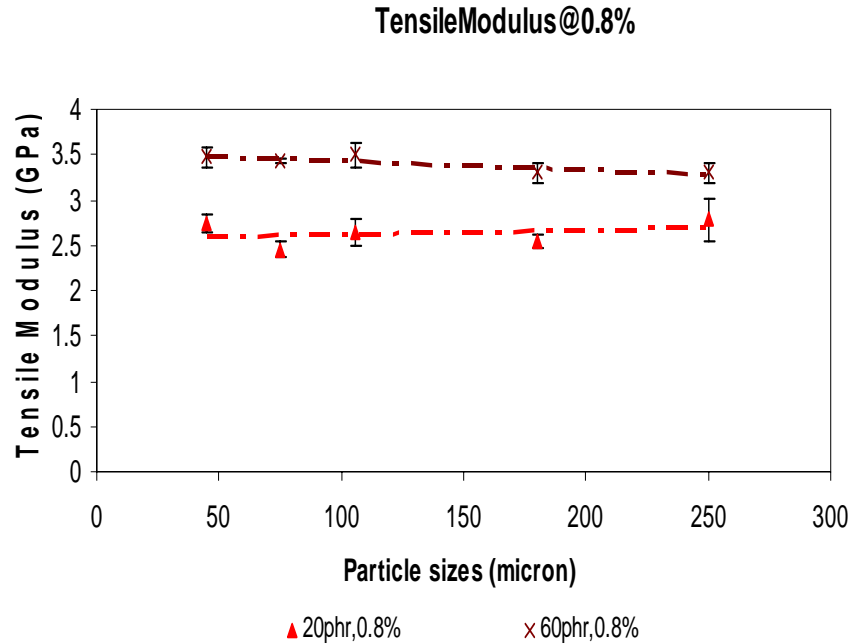


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

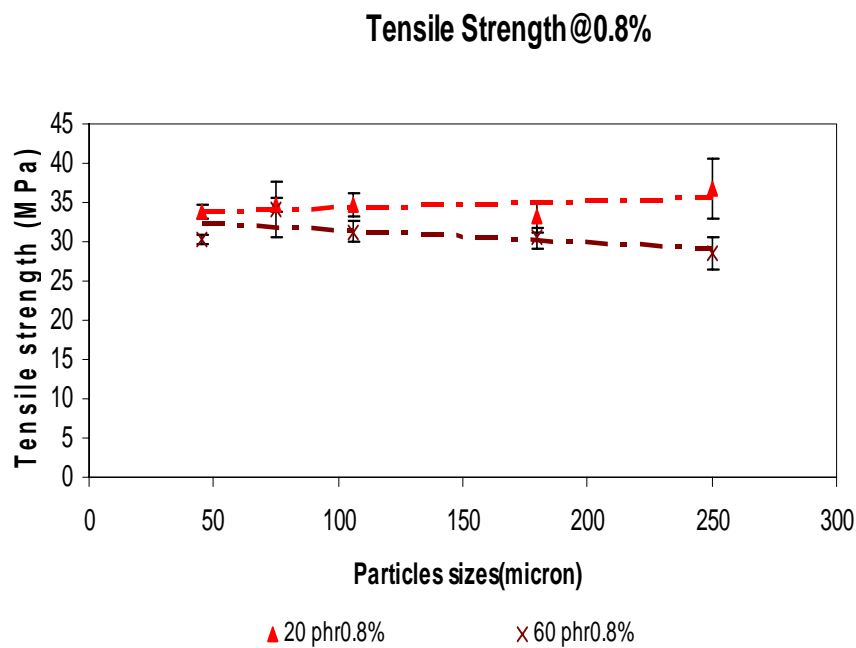
จากรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของผงแกลบที่ใส่จาก 20 เป็น 60 phr พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดึงเพิ่มขึ้น 18.80% และจากรูปที่ 4.13 ค่าการทนต่อแรงดึงลดลงราว 4.62% เนื่องจากแกลบเป็นวัสดุที่มีความแข็งเพราะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เมื่อผสมรวมกับPVCจึงทำให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ มีมอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงขึ้นแต่ค่าการทนต่อแรงดึงลดลงตามสัดส่วนของผงแกลบที่เติม นั่นแสดงถึงวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความเปราะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมแกลบมากขึ้น เป็นผลให้ไม้พลาสติกขาดง่ายยิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงแกลบจาก 45 ถึง 250 ไมครอน จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคแกลบไม่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก



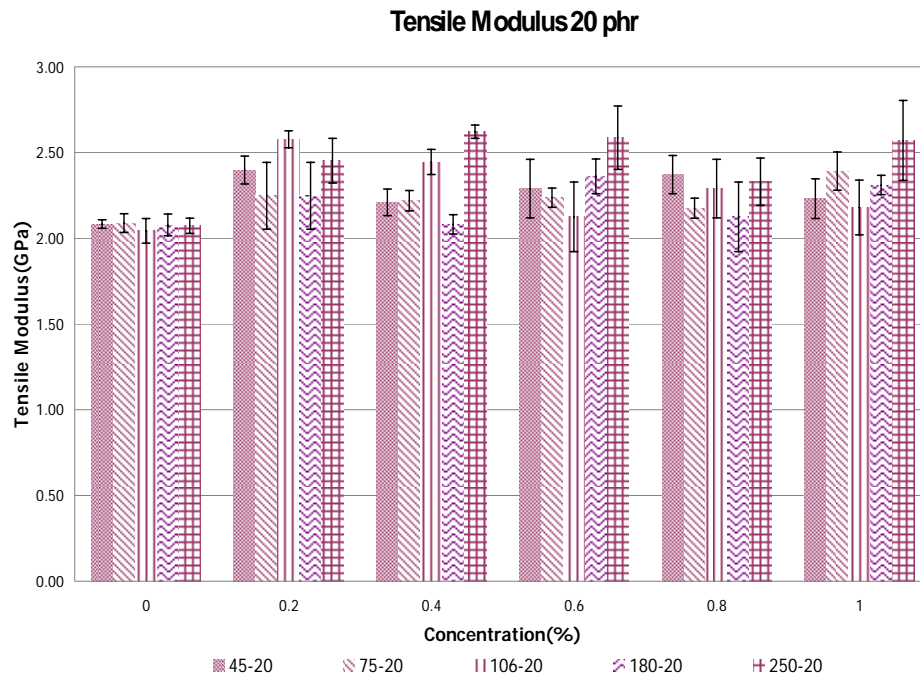


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0.6-0.8%

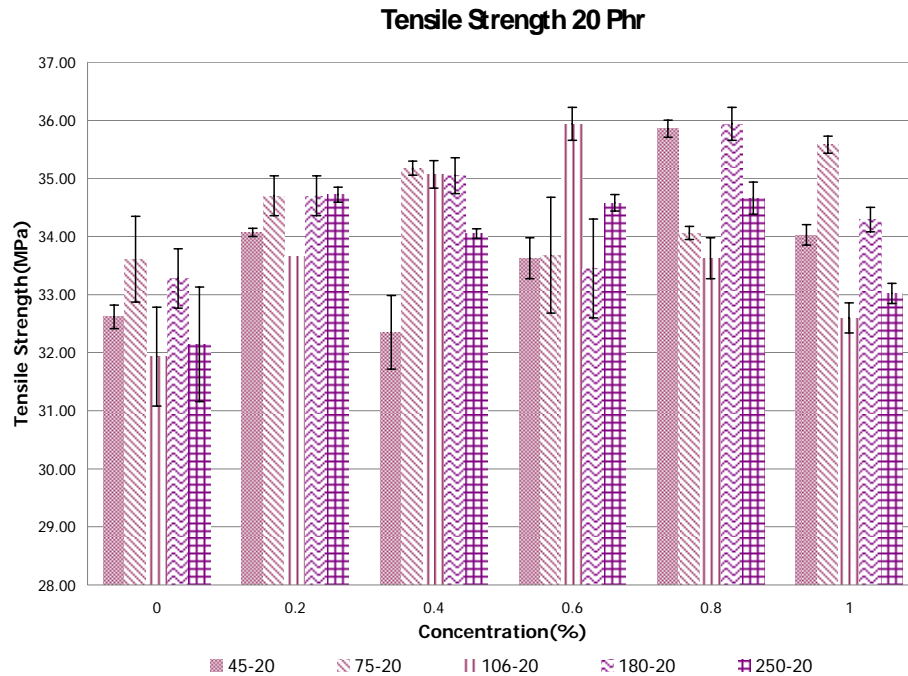


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน 0.6-0.8%

จากรูปที่ 4.14 และ 4.19 เป็นการทดสอบแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้า  
 แกลบ แสดงค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก  
 PVC/เถ้าแกลบ ในปริมาณเถ้าแกลบ 20 phr พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของที่ไม่มีการปรับแต่ง  
 พื้นผิวอนุภาคเถ้าแกลบด้วยสารประสานราว 2.07 GPa ค่าทนต่อแรงดึงราว 33.31 MPa และเมื่อใช้  
 สารประสานปรับแต่งพื้นผิวเถ้าแกลบ พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้  
 พลาสติกPVC/เถ้าแกลบที่ความเข้มข้น 0.8% ขนาด 45 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่า  
 การทนต่อแรงดึงสูงสุดราว 2.37 GPa และ 35.86 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่  
 ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงสูงเพิ่มขึ้น 12.57% และ  
 7.08% ตามลำดับ

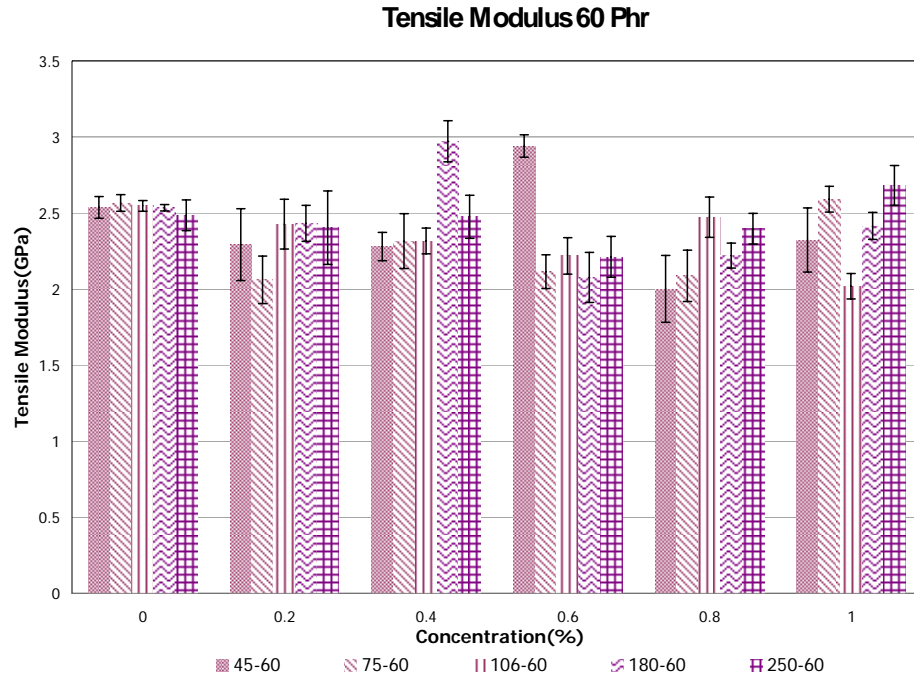


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ  
 ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

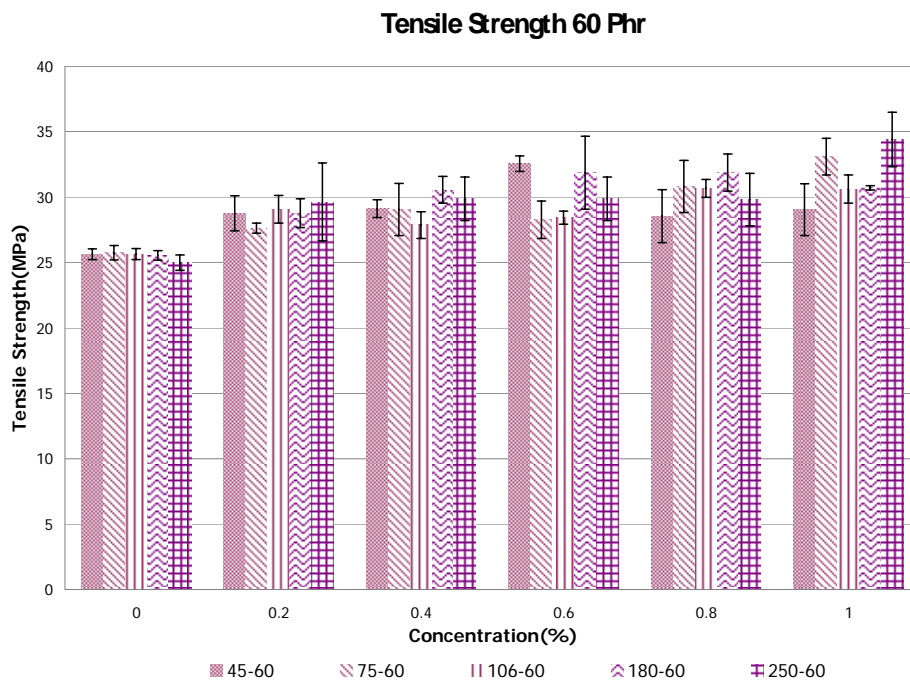


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบเป็น 60 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของที่สูตรไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคเถ้าแกลบด้วยสารประสานราว 2.53 GPa ค่าการทนต่อแรงดึงราว 25.50 MPa เมื่อมีการใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวเถ้าแกลบ พบว่า วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาดอนุภาค 45 ไมครอนให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดราว 2.94 GPa และ 32.55 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิว ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 14.74 และ 21.65% ตามลำดับ



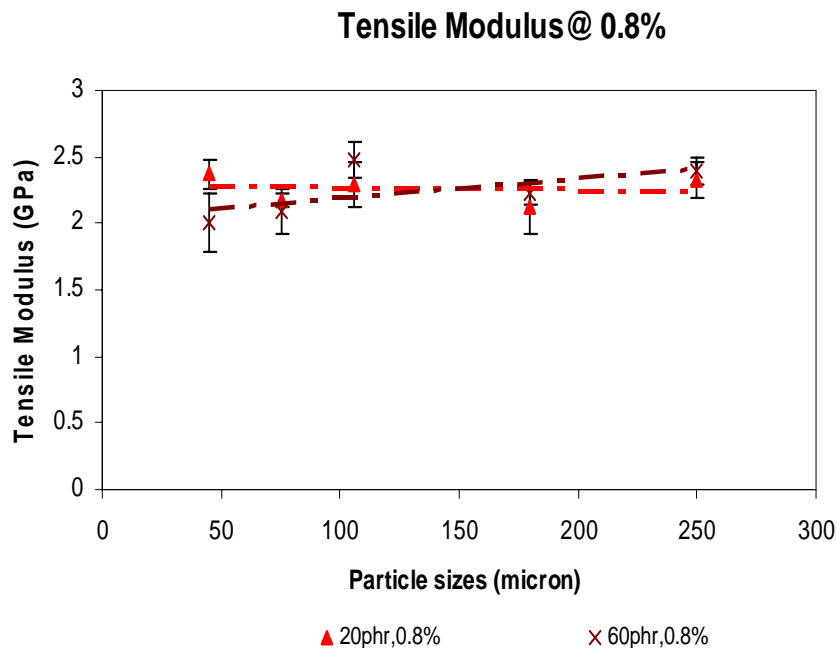
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%



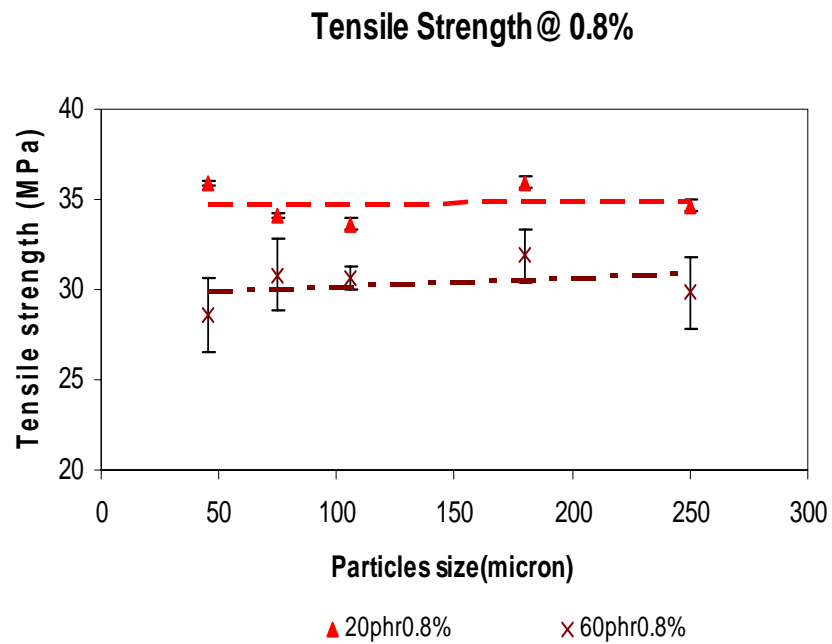
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ที่ขนาดและปริมาณของแกลบ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

จากรูปที่ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของผงเถ้าแกลบที่ใส่ในไม้พลาสติกเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 phr ที่ความเข้มข้น 0.8% พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดึงเพิ่มขึ้น 19.35% และจากรูปที่ 4.19 ค่าการทนต่อแรงดึงลดลงประมาณ 10.13% เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุที่มีความแข็งเพราะมีซิลิกาและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เกิดจากการที่ถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงทำให้ไม่มีองค์ประกอบจำพวกเซลลูโลสและเมื่อผสมรวมกับPVCจึงทำให้ไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ มีมอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงขึ้นแต่ค่าการทนต่อแรงดึงลดลงตามสัดส่วนของผงเถ้าแกลบที่เติม และผงเถ้าแกลบยังเป็นอุปสรรคขัดขวางการคลายขดและยึดของสายโซ่ PVC นั้นแสดงถึงวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความเปราะเพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงเถ้าแกลบจาก 45 ถึง 250 ไมครอน จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคเถ้าแกลบไม่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก

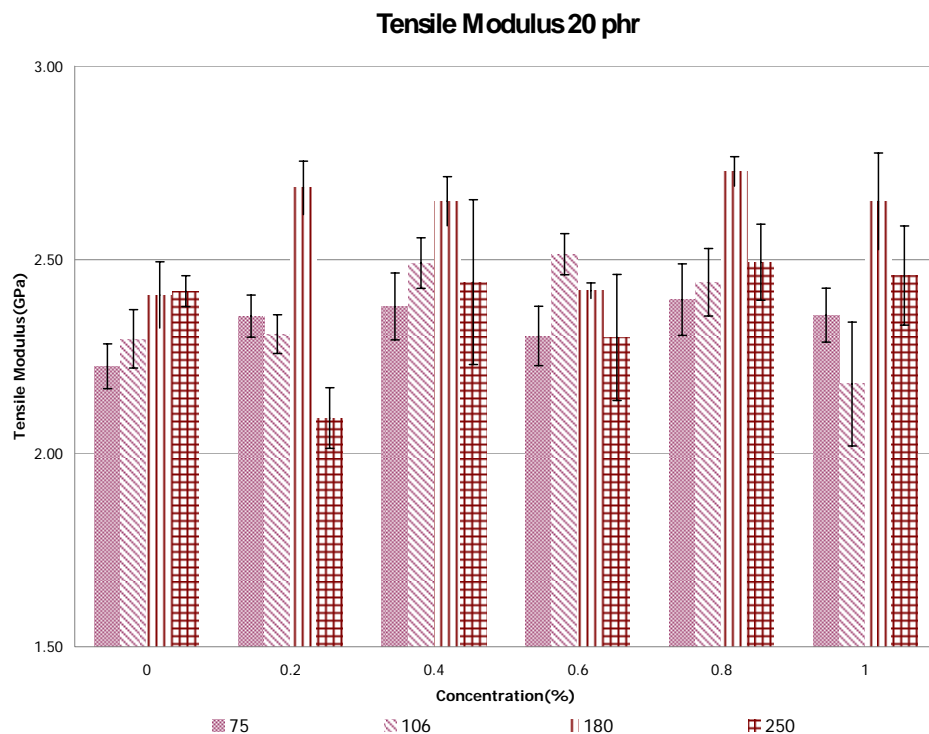


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

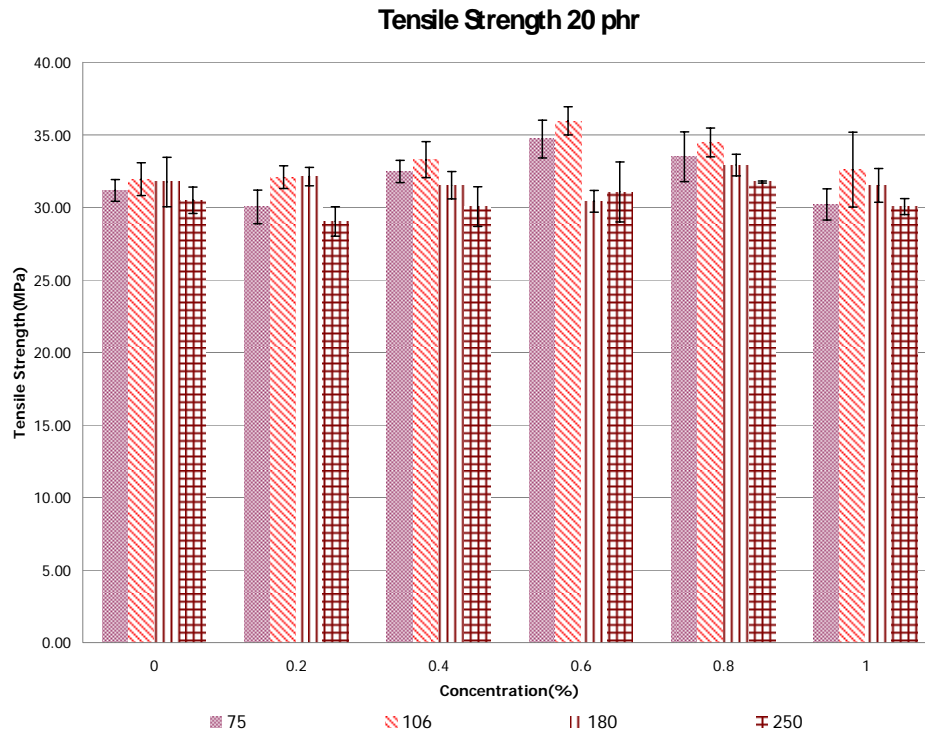


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง จากรูปที่ 4.20 แสดงค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ในปริมาณ 20 phr พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคด้วยสารประสานราว 2.30 GPa ค่าทนต่อแรงดึงราว 31.23 MPa และเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิว พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาด 106 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงสุดราว 2.51 GPa และจากรูปที่ 4.21 ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดราว 35.95 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ปรับแต่งพื้นผิว ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นราว 8.45% และ 13.15% ตามลำดับ



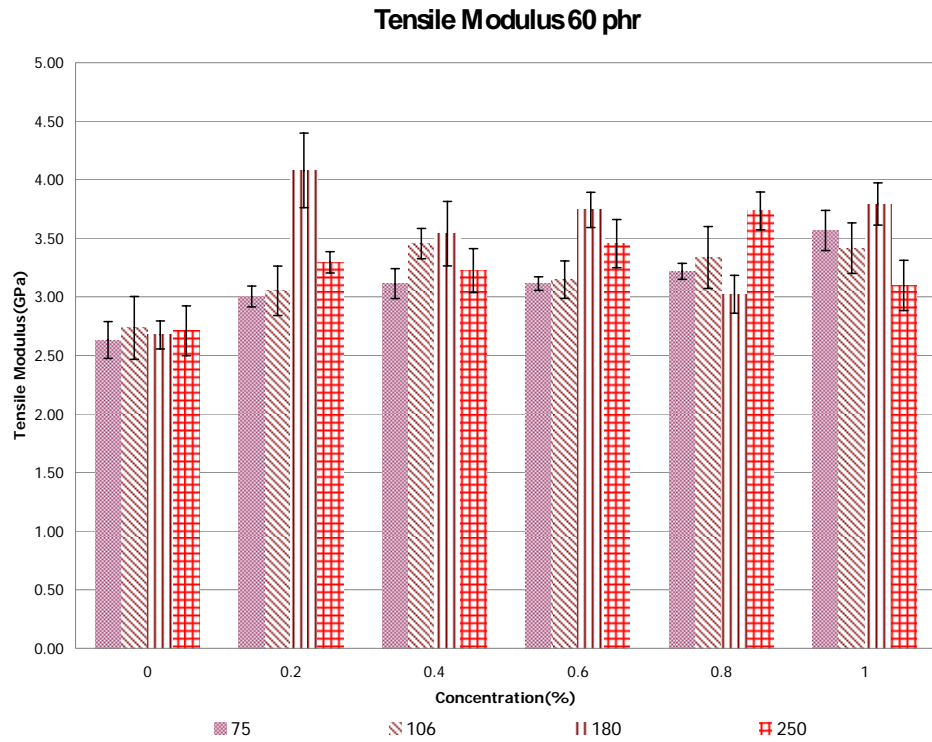
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดและปริมาณผงไม้ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%



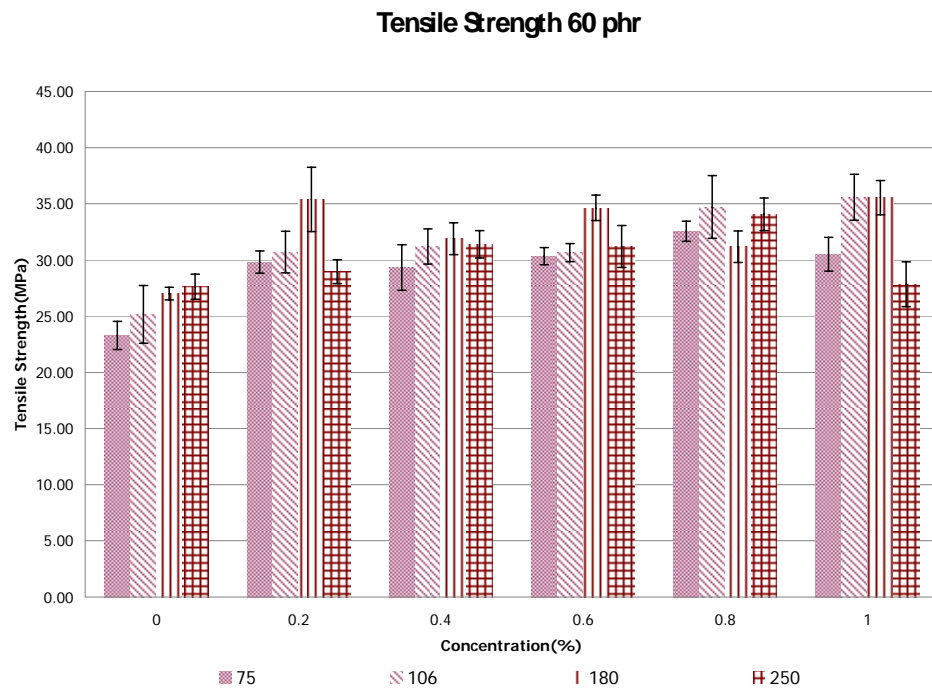
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดและปริมาณผงไม้ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%

เมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้เต็งเป็น 60 phr จากรูปที่ 4.22 พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคด้วยสารประสานราว 2.69 GPa ค่าการทนต่อแรงดึงราว 25.76 MPa เมื่อมีการใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิว พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงที่ความเข้มข้น 1.0% ขนาด 106 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงสุดราว 3.42 GPa และจากรูปที่ 4.23 ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดราว 35.56 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ปรับแต่งพื้นผิว ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงเพิ่มขึ้นราว 21.30% และ 27.57% ตามลำดับ

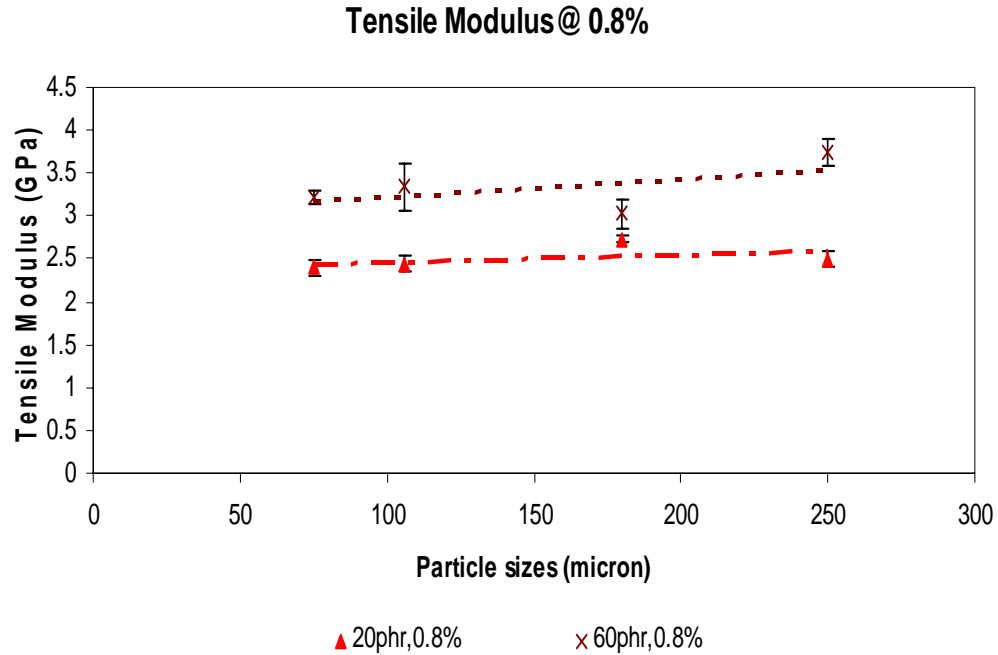




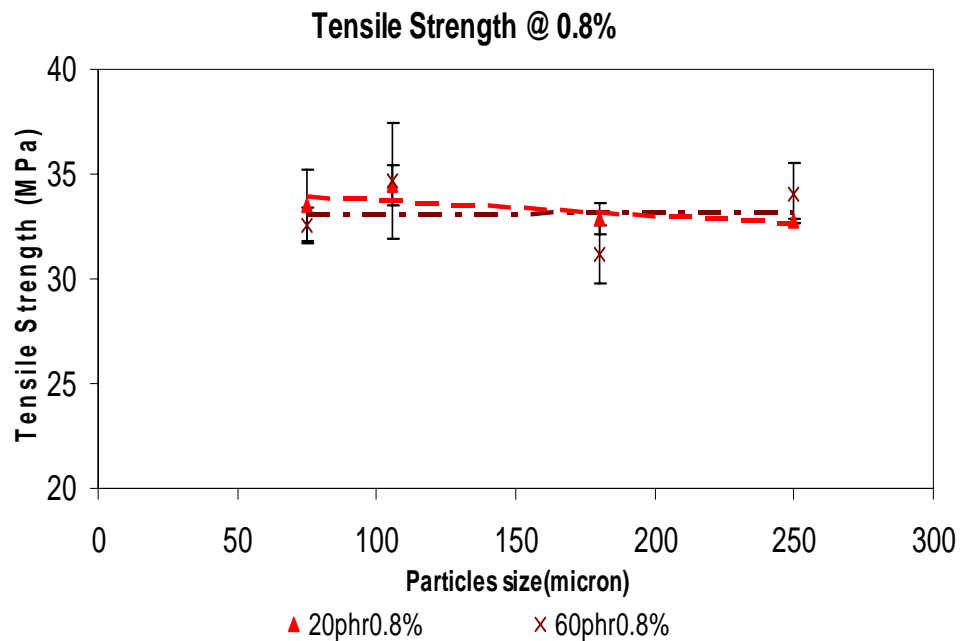
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดและปริมาณผงไม้ 60 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดและปริมาณผงไม้ 20 phr ที่ความเข้มข้นของสารประสาน0-1.0%



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 20 และ 60 phr ที่ความเข้มข้นของ สารประสาน 0.8%

จากรูปที่ 4.24 เมื่อปริมาณไม้เต็งเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 phr ที่ความเข้มข้น 0.8 % พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดึงเพิ่มขึ้น 26.22 % และจากรูปที่ 4.25 ค่าการทนต่อแรงดึงลดลงราว 1.0 % เนื่องจากเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุมีเนื้อที่เป็นไม้มากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงสายโซ่ของ PVC มีการคลายขดและยืดขยายออก อนุภาคของไม้จึงกลายเป็นเฟสที่เป็นอุปสรรค มาจำกัดการยืดคลายขดของสายโซ่ PVC ทำให้ต้องใช้แรงดึงสูงขึ้นในการยืดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก

เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคภายใต้แรงดึง พบว่า เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น แนวโน้มของมอดูลัสภายใต้แรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นของผงไม้เท่ากัน อนุภาคเล็กมีจำนวนอนุภาคกระจายตัวในเนื้อ PVC ได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้น ผงไม้ที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กจึงกลายเป็นอุปสรรคต่อการคลายขดและยืดของสายโซ่ PVC มากกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ มีผลทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงและค่าการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

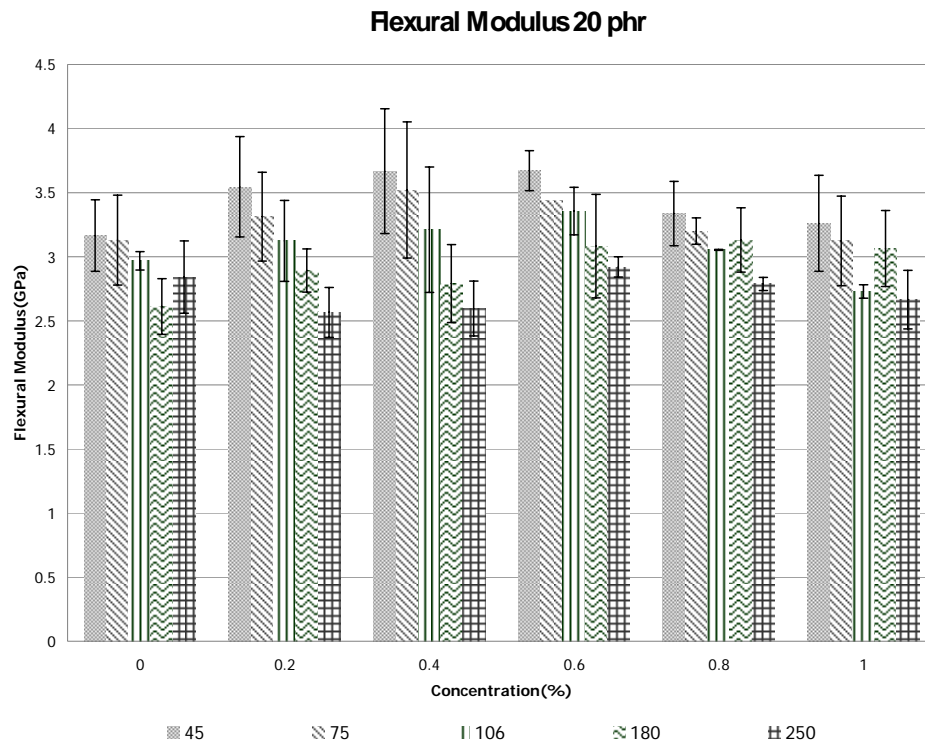
จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ คือ PVC/แกลบ PVC/เถ้าแกลบ และ PVC/ไม้เต็ง พบว่า เมื่อใช้सानประสานปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริมวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกสามารถทนต่อแรงดึงได้ดีขึ้น สามารถเรียงตามความสามารถในการทนแรงดึงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PVC/แกลบ ราว 25-30% PVC/ไม้เต็ง ราว 10-20% และ PVC/เถ้าแกลบ ราว 7-15% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบกับไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด พบว่า ไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด(วัสดุประกอบแต่ง PVC/ผงไม้) มีค่าการทนต่อแรงดึงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 25.1-48.3 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่าการทนต่อแรงดึง มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่มีขายในท้องตลาดอยู่ที่ประมาณ 30-35 MPa แสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ ที่ผลิตได้ สามารถนำไปใช้งานแทนไม้ธรรมชาติได้

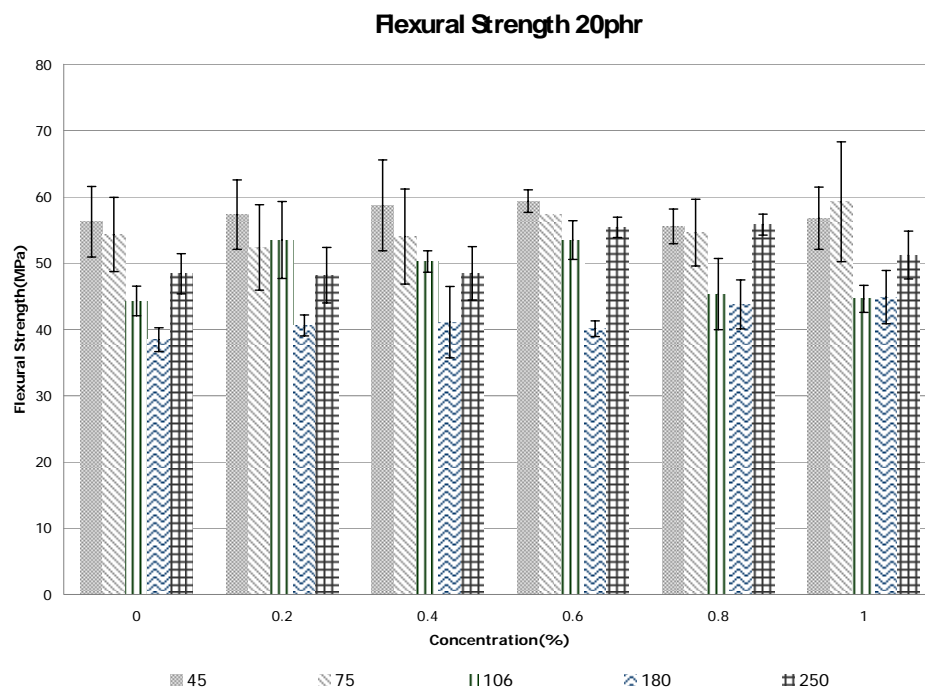
#### 4.5 สมบัติการทนต่อการโค้งงอ(Flexural property)

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารประสานที่มีต่อการทนต่อการโค้งงอเพื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง(Flexural Modulus) ค่าการทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ คือ PVC/แคลบ PVC/เส้นแคลบ และPVC/ไม้เต็ง ที่มีขนาดอนุภาคผงไม้เต็ง 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ในปริมาณ 20 และ 60 phr ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%

มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของPVCบริสุทธิ์ คือ 2.11 GPa เมื่อใส่ผงแคลบในPVC วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีระดับมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งสูงกว่าของPVCบริสุทธิ์[30] จากรูปที่ 4.27 แสดงค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ในปริมาณแคลบ 20 phr ปรับแต่งพื้นผิวแคลบด้วยสารประสาน พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาด 75 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้ง(รูปที่ 4.28)สูงสุดราว 3.44 GPa และ 57.29 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน ที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งราว 3.13 GPa และ 54.32 MPa ตามลำดับ พบว่าค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 9.20 และ 5.46% ตามลำดับ เนื่องจากผงแคลบเป็นวัสดุที่มีความแข็งเพราะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่มากทำให้การดัดโค้งยากขึ้นกว่าPVCบริสุทธิ์ ประกอบกับมีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน สามารถลดขนาดและปริมาณช่องว่างระหว่างเฟสให้น้อยลงทำให้การส่งผ่านแรงจากPVCไปยังเฟสที่แข็งกว่าคือแคลบได้มากขึ้นจึงต้องใช้แรงในการดัดโค้งมากกว่า

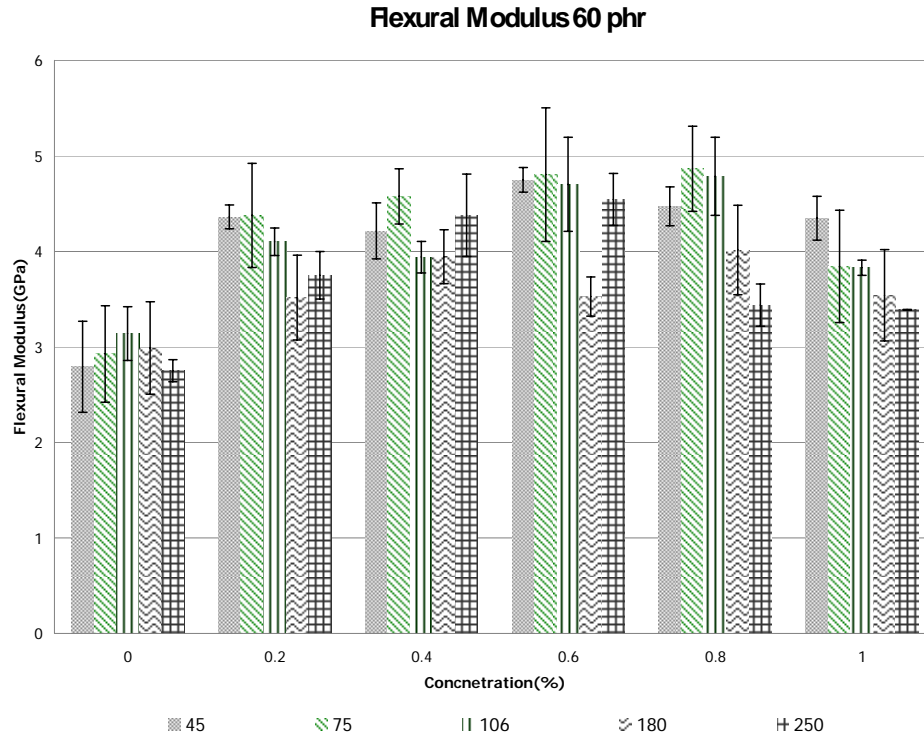


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



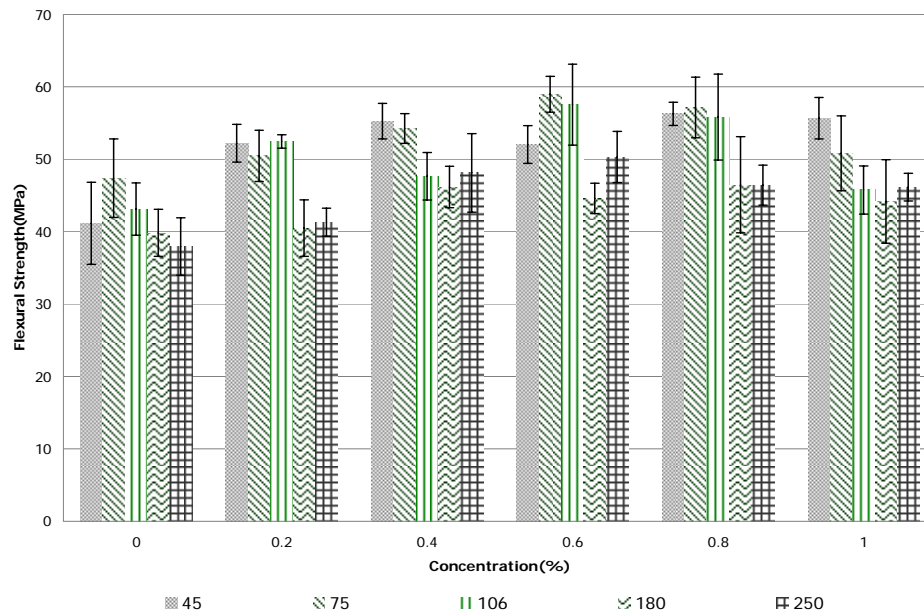
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าการทนต่อภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

เมื่อเพิ่มปริมาณของผงแคลเซียมเป็น 60 phr จากรูปที่ 4.29 ที่ความเข้มข้นและขนาดเดียวกัน พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้ง (รูปที่ 4.30) สูงสุดราว 2.92 GPa และ 47.37 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิว ด้วยสารประสานที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งราว 4.80 GPa และ 58.92 MPa ตามลำดับ พบว่าค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 64.13 และ 24.50% ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลเซียมที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลเซียม 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

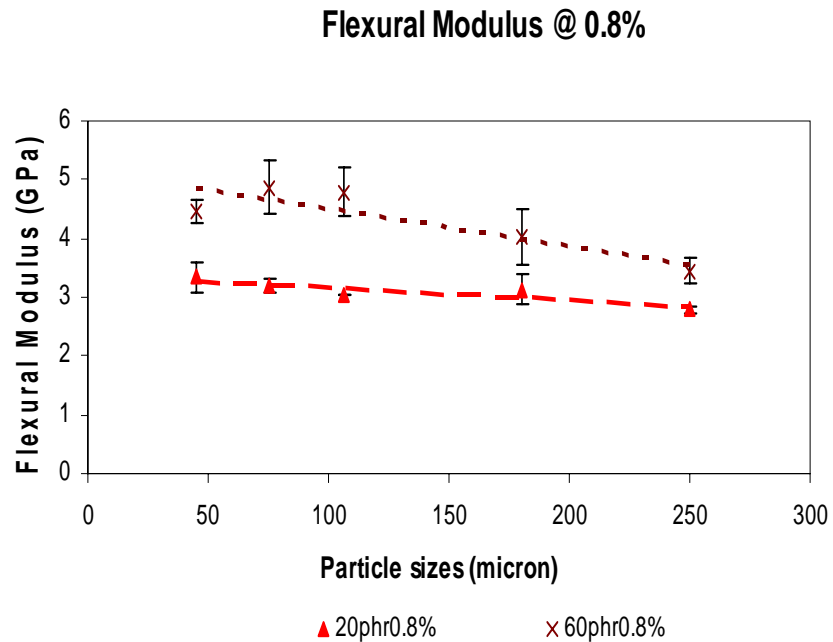
## Flexural Strength 60 phr



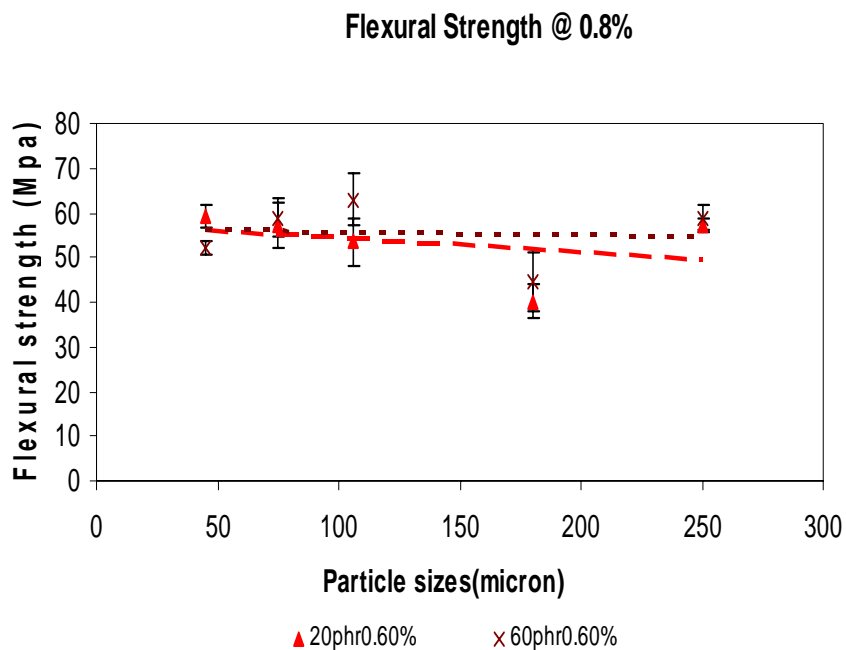
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าการทนต่อภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ แกลบที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแกลบ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

เปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นจาก 20 phr เป็น 60 phr พบว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกเพิ่มขึ้น 39.58% และค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 2.95% ดังนั้นปริมาณของผงแกลบที่เพิ่มขึ้นมีผลให้มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเติมผงแกลบในปริมาณสูงขึ้นทำให้มีเฟสที่แข็งมากกว่ามารับแรงจากการดัดโค้งผนวกกับการส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อมีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน แต่วัสดุก็มีความเปราะมากขึ้นการยึดติดจากการดัดโค้งลดลงจึงเป็นสาเหตุให้มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงแกลบมากขึ้น

ส่วนอิทธิพลของขนาดอนุภาคจะเห็นว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.31และ 4.32



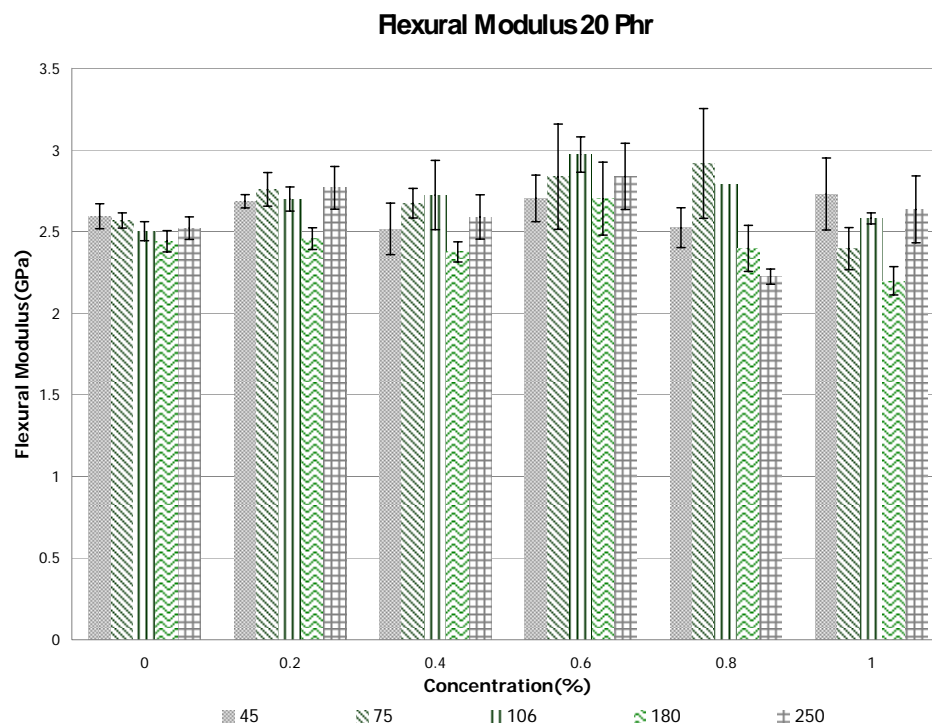
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%



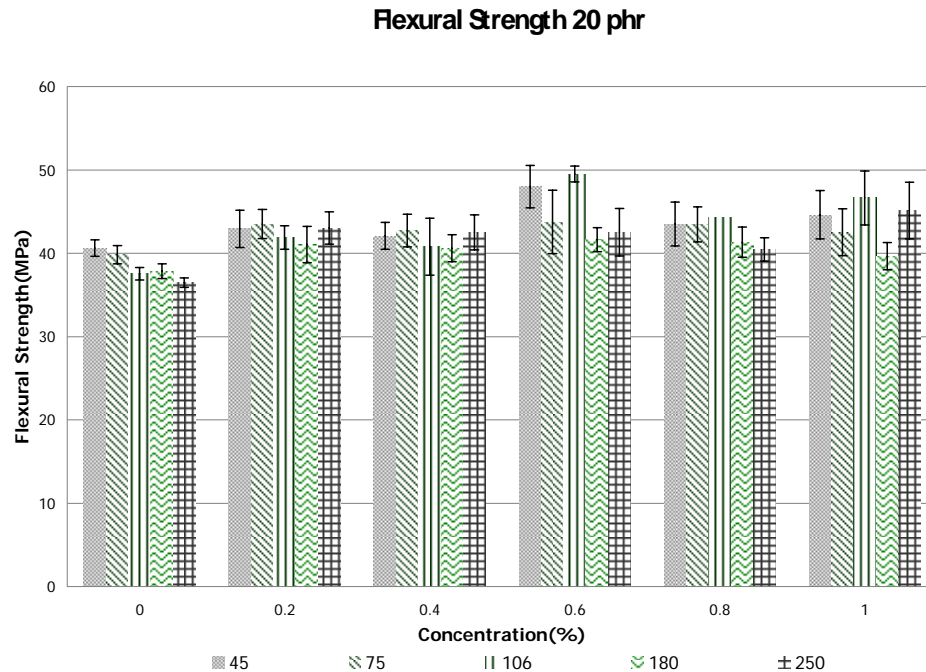
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%



จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก จากรูปที่ 4.33 แสดงค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ในปริมาณ 20 phr ปรับแต่งพื้นผิวถั่วแกลบด้วยสารประสาน พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาด 45 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้ง(รูปที่4.34) สูงสุดราว 2.70 GPa และ 48 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งราว 2.50 GPa และ 40.62 MPa ตามลำดับ พบว่าค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 4.24 และ 18.50% ตามลำดับเนื่องจากผงถั่วแกลบเป็นวัสดุที่มีความแข็งเพราะมีซิลิกาและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่มากทำให้การดัดโค้งยากขึ้นกว่าที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน และเมื่อใช้สารประสานขนาดและปริมาณช่องว่างระหว่างเฟสลดน้อยลงทำให้การส่งผ่านแรงจาก PVC ไปยังเฟสที่แข็งกว่าคือถั่วแกลบได้มากขึ้นจึงต้องใช้แรงในการดัดโค้งมากกว่า

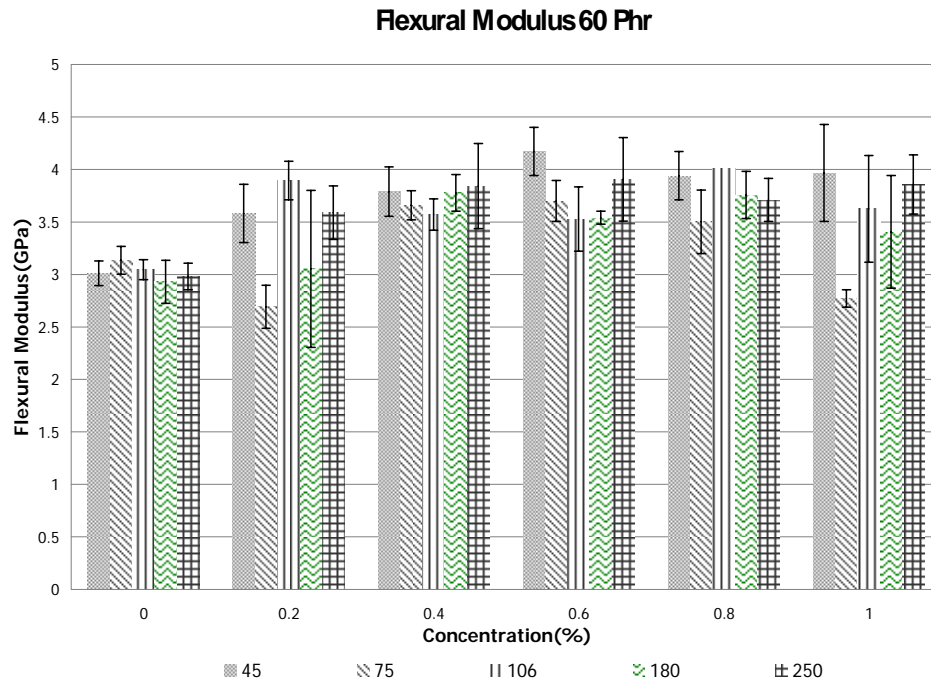


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของถั่วแกลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

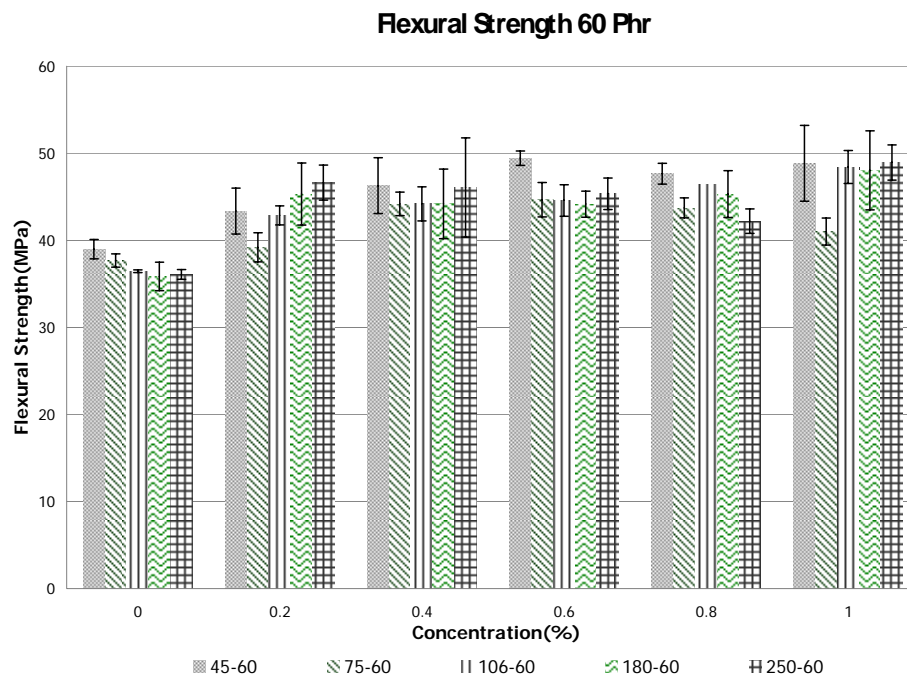


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าการทนต่อภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ ถ้ำถ่านที่ขนาดต่างๆและปริมาณของถ้ำถ่าน 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

เมื่อเพิ่มปริมาณของผงถ้ำถ่านเป็น 60 phr จากรูปที่ 4.35 ที่ความเข้มข้นและขนาดเดียวกัน พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้ง (รูปที่ 4.36) สูงสุดราว 4.17 GPa และ 49.44 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งราว 3.0 GPa และ 38.99 MPa ตามลำดับ พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 38.50 และ 26.82% ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเถ้าแกลบ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

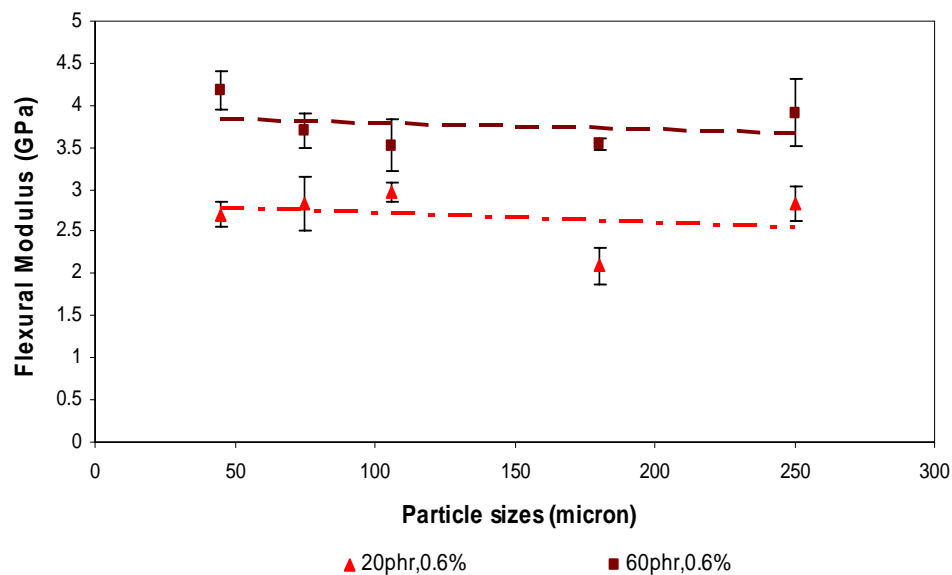


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าการทนต่อภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเถ้าแกลบ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

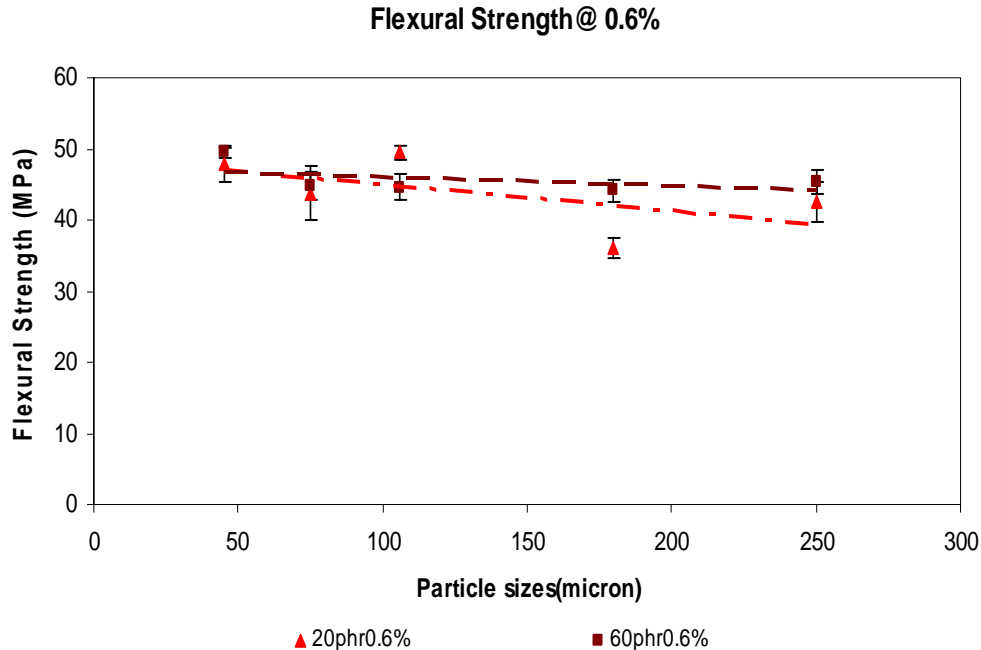
อิทธิพลของปริมาณแก้วเคลบที่เพิ่มขึ้นจาก 20 phr เป็น 60 phr พบว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกเพิ่มขึ้น 54.30% และค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 3.02% ดังนั้นปริมาณของผงแก้วเคลบที่เพิ่มขึ้นมีผลให้มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเติมผงแก้วเคลบในปริมาณสูงขึ้นไปทำให้มีเฟสที่แข็งมากกว่ามารับแรงจากการดัดโค้งผนวกกับการส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อมีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน แต่วัสดุก็มีความเปราะมากขึ้นจากรูปที่ 4.38 การยึดดึงจากการดัดโค้งลดลงจึงเป็นสาเหตุให้ มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงแก้วเคลบมากขึ้นจากรูปที่ 4.37

พิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคจะเห็นว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.37 และ 4.38

#### Flexural Modulus @ 0.6%



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แก้วเคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเคลบ20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

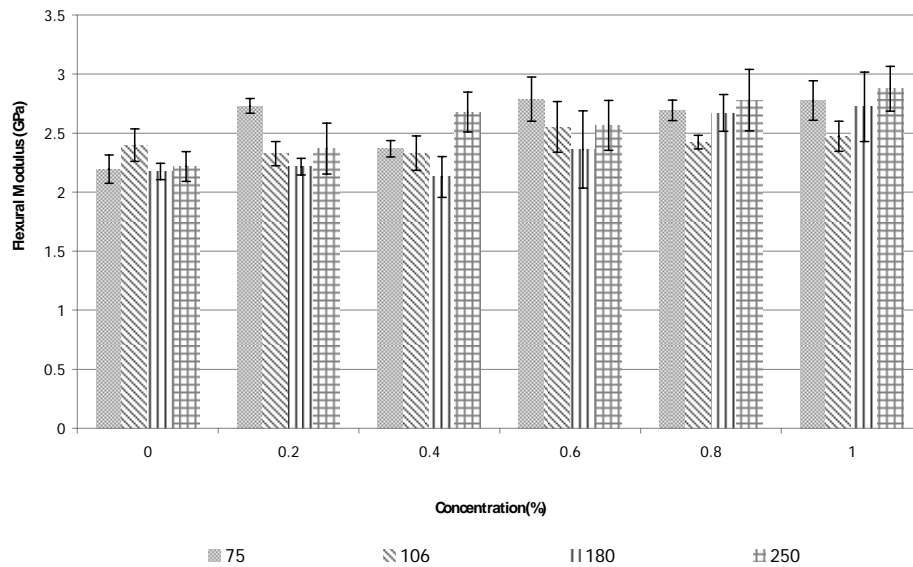


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าถ่าน ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเถ้าถ่าน 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง จากรูปที่ 4.39 แสดงค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ในปริมาณ 20 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวอนุภาคด้วยสารประสานราว 2.39 GPa และค่าทนต่อแรงดึงราว 36.98 MPa และเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิว พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งที่ความเข้มข้น 0.4% ขนาด 106 ไมครอน ให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งสูงสุดราว 2.33 GPa และจากรูปที่ 4.40 ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งสูงสุดราว 37.53 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ปรับแต่งพื้นผิว ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งมีค่าใกล้เคียงกันและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 1.48%

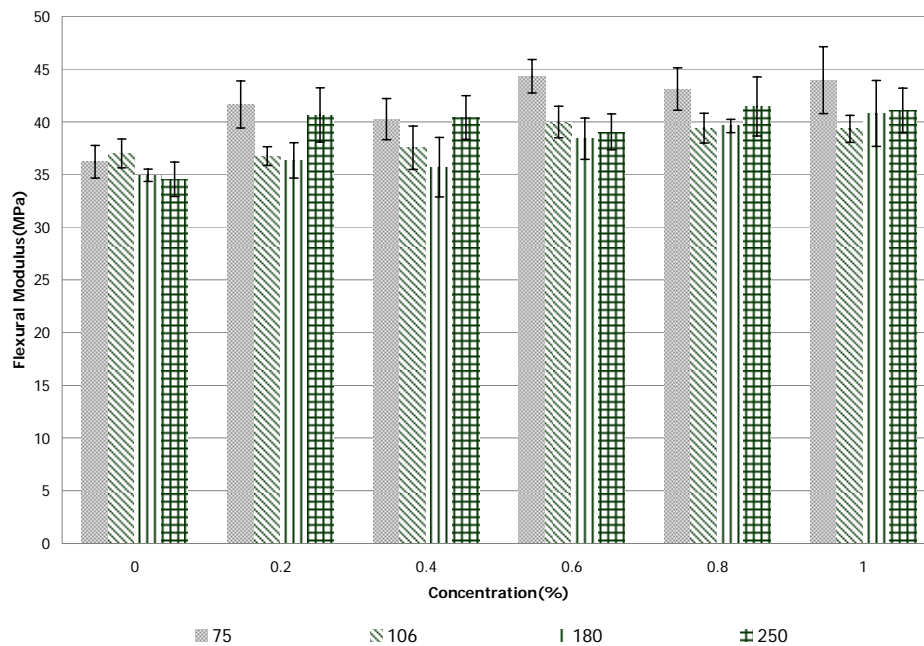
เนื่องจากไม้เต็งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ซึ่งช่วยลดการหดตัวของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความเปราะลดลง สามารถยึดตัวภายใต้แรงดัดโค้งเมื่อได้รับแรง จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งมีใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิว แต่พบว่าค่าทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าสูงกว่าเนื่องจากไม้เป็นเฟสที่แข็งกว่า PVC สามารถรับแรงดัดโค้งได้มากกว่าก่อนที่จะงานจะเกิดโค้งงอและการหัก

### Flexural Modulus 20 phr



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

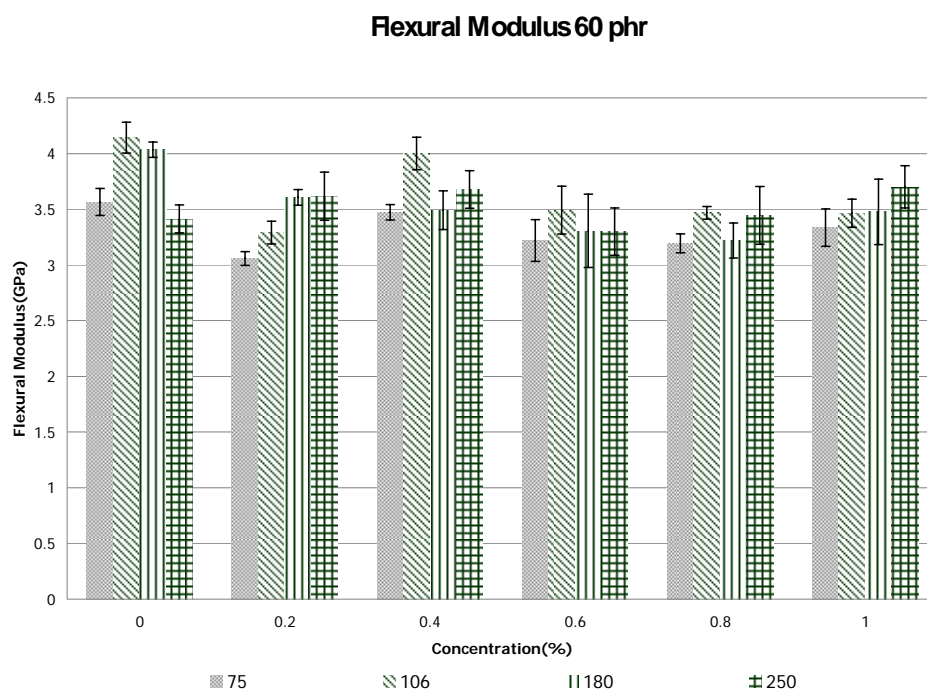
### Flexural Strength 20phr



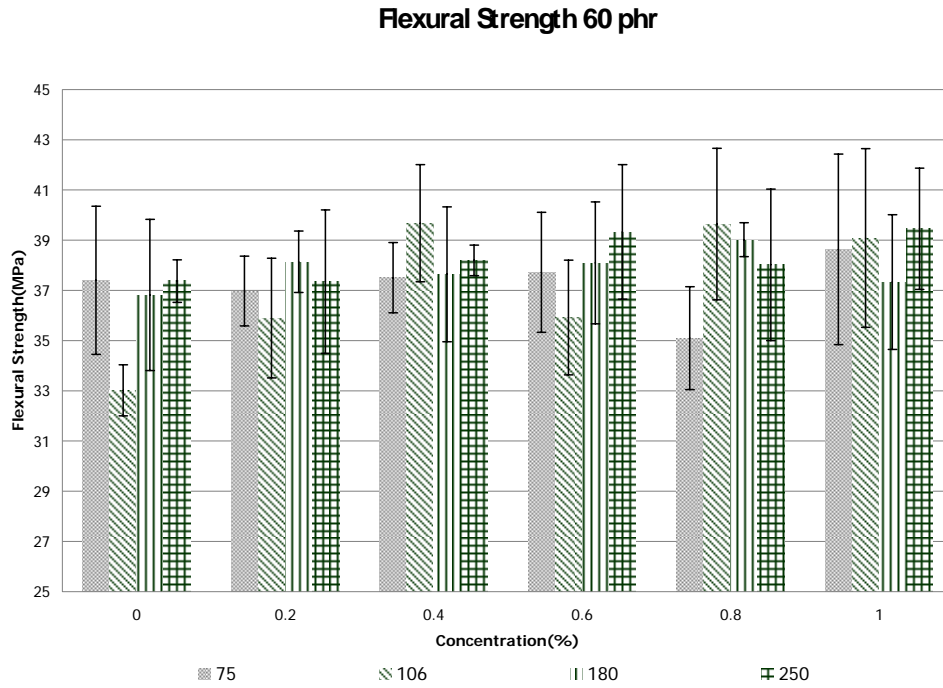
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าการทนต่อภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

เมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้เต็งเป็น 60 phr จากรูปที่ 4.41 พบว่า ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งที่ความเข้มข้นและขนาดเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกันกับที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิว จากรูปที่ 4.42 ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งราว 39.67 MPa เพิ่มขึ้นจากที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวราว 20.15% เมื่อปริมาณไม้เต็งเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 phr มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 71.72 % และค่าการทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นราว 5.70 %

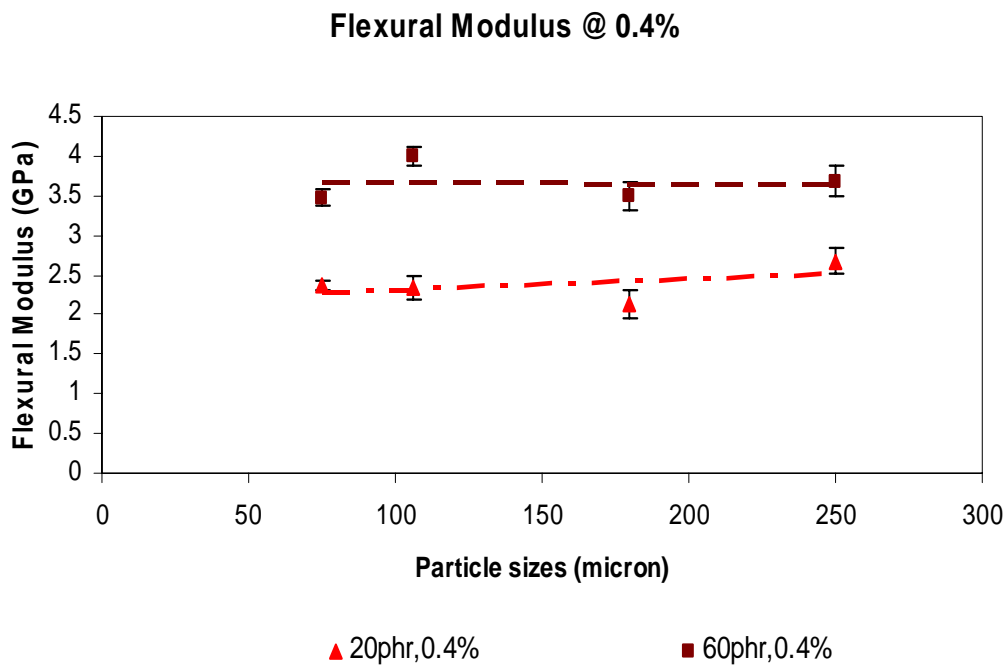
พิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคไม่มีผลต่อมอดูลัสภายใต้แรงดัดเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงค่าการทนภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็งที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็งที่ขนาดต่างๆและปริมาณของ ไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.4%



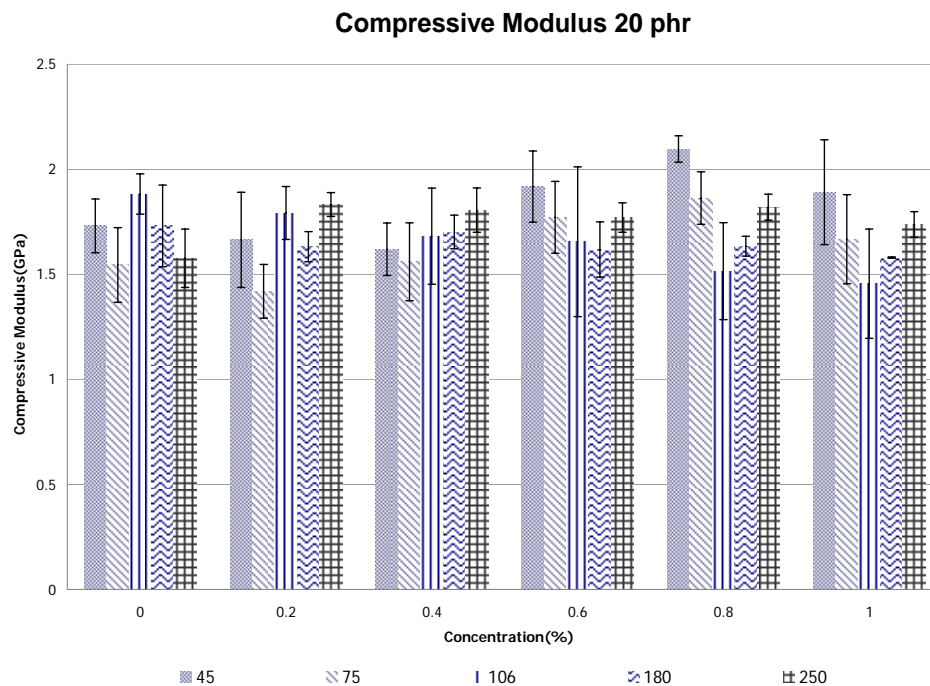
จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ คือ PVC/แกลบ PVC/ถั่วแกลบ และPVC/ไม้เต็ง พบว่า เมื่อใช้सानประสานปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริม วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกสามารถทนต่อแรงดัดโค้งได้ดีขึ้น สามารถเรียงตามความสามารถในการทนแรงดัดโค้งจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PVC/ถั่วแกลบราว 20-26% PVC/แกลบ และPVC/ไม้เต็ง ราว 20% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบกับไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด พบว่า ไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด(วัสดุประกอบแต่งPVC/ผงไม้) มีค่าการทนต่อแรงดัดโค้งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 41.3-66.0 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ พบว่าค่าการทนต่อแรงดัดโค้งของPVC/ถั่วแกลบและPVC/ถั่วแกลบ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่มีขายในท้องตลาดอยู่ที่ประมาณ 47-58 MPa แสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 2 ระบบ ที่ผลิตได้ แต่ระบบPVC/ถั่วแกลบPVC/ไม้เต็งมีค่าทนต่อแรงดัดโค้งต่ำกว่าราว 39-44 MPa

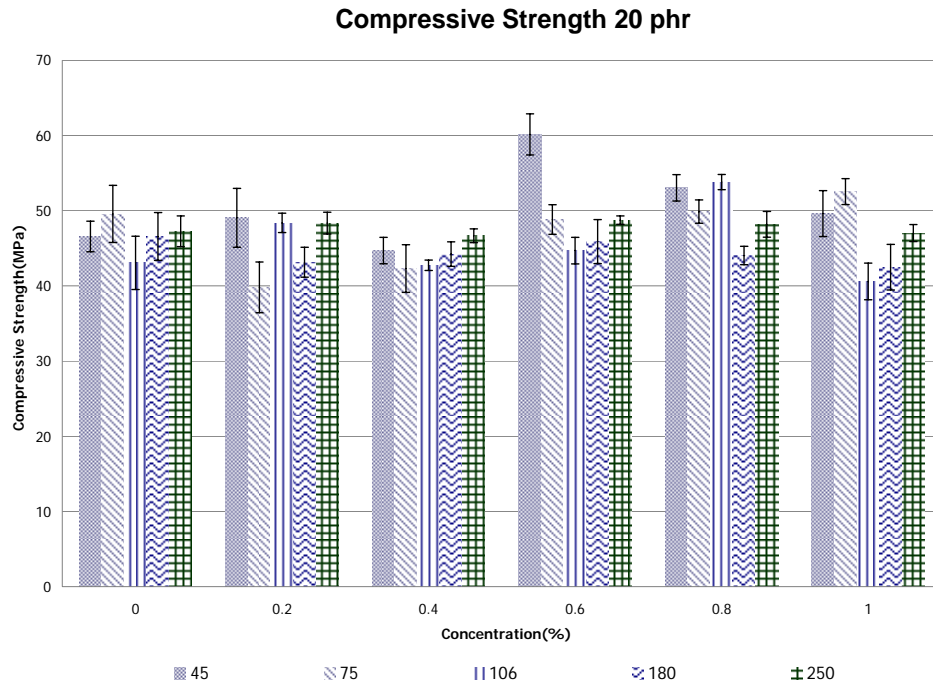
#### 4.6 สมบัติการทนต่อแรงอัด (Compression property)

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารประสานที่มีต่อการทนต่อแรงอัดทำให้สามารถเปรียบเทียบค่ามอดูลัสภายใต้แรงกด(Compressive Modulus) ค่าการทนต่อแรงกดอัด (Compressive strength) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ คือ PVC/เกลบ PVC/เถ้าเกลบ และPVC/ไม้เต็ง ที่มีขนาดอนุภาคผงเกลบ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ในปริมาณ 20 และ 60 phr ความเข้มข้นของสารประสาน 0-1.0%

การเติมเกลบทำให้ มอดูลัสภายใต้แรงกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกลบเป็นวัสดุภาคที่แข็งและช่วยรับภาระแรงกดที่ส่งผ่านมาจาก PVC ทำให้การกดอัดวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทำได้ยากขึ้น เพราะอนุภาคเกลบทำหน้าที่รับแรงกดที่มากกระทำ จากรูปที่ 4.44 แสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/เกลบ ที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาด 45 ไมครอน ปริมาณผงเกลบ 20 phr พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวราว 21.13% และค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้น 13.87% ดังรูปที่ 4.45



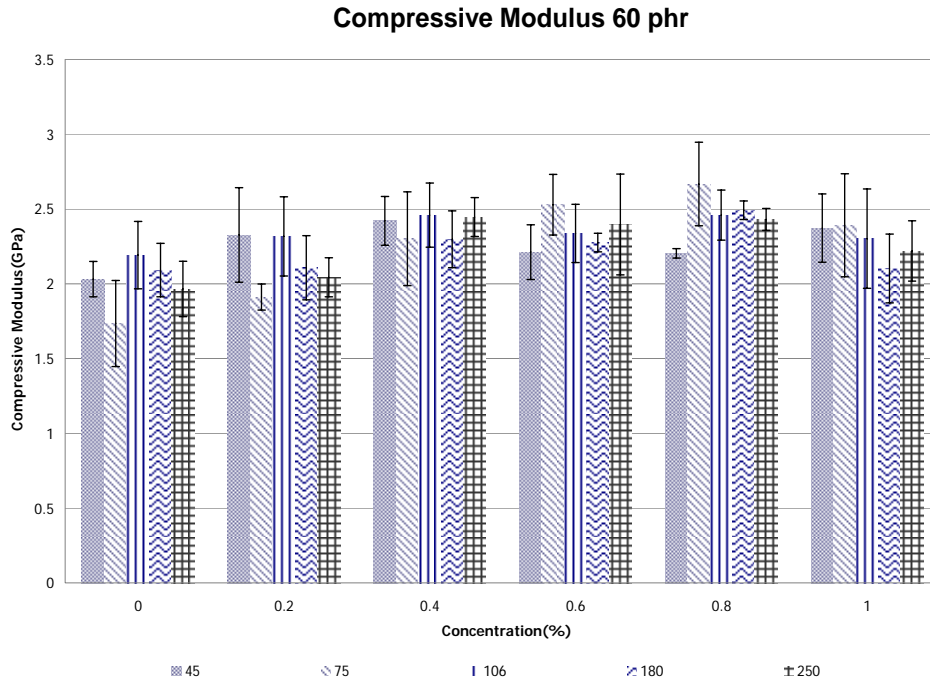
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเกลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



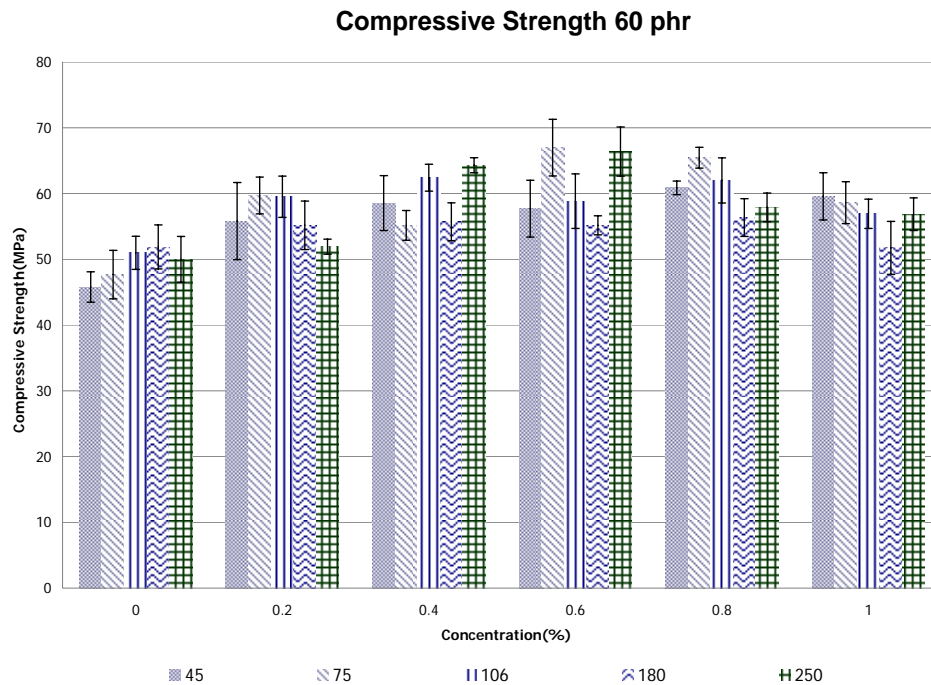
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

เมื่อเพิ่มปริมาณผงแคลบ 60 phr จากรูปที่ 4.46 พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงกดอัดที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาด 45 ไมครอน เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวราว 8.49% และจากรูปที่ 4.47 ค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้นราว 32.91 %

เมื่อเพิ่มปริมาณผงแคลบจาก 20 เป็น 60 phr มอดูลัสภายใต้แรงกดอัดเพิ่มขึ้น 5.12 % ดังรูปที่ 4.48 และค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้นราว 14.73% ดังรูปที่ 4.49 เนื่องมาจากผงแคลบที่ใส่ทำหน้าที่รับแรงกดและเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวส่งผลช่องว่างระหว่างสองเฟสลดลง และส่งผ่านแรงจากPVCไปยังผงแคลบได้มากขึ้น ทำให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าการทนต่อแรงกดอัด สูงขึ้นเมื่อปริมาณผงแคลบมากขึ้น ทำให้การยุบตัวของไม้พลาสติกลดลง

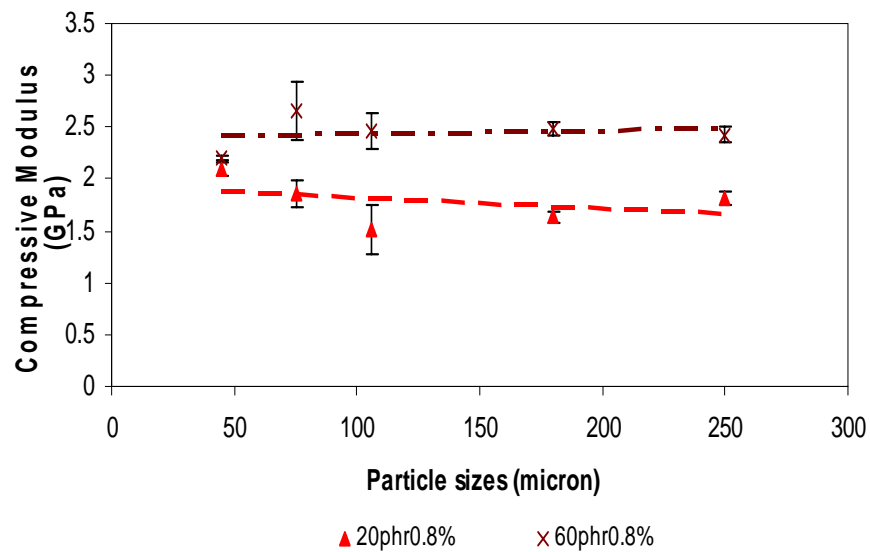


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

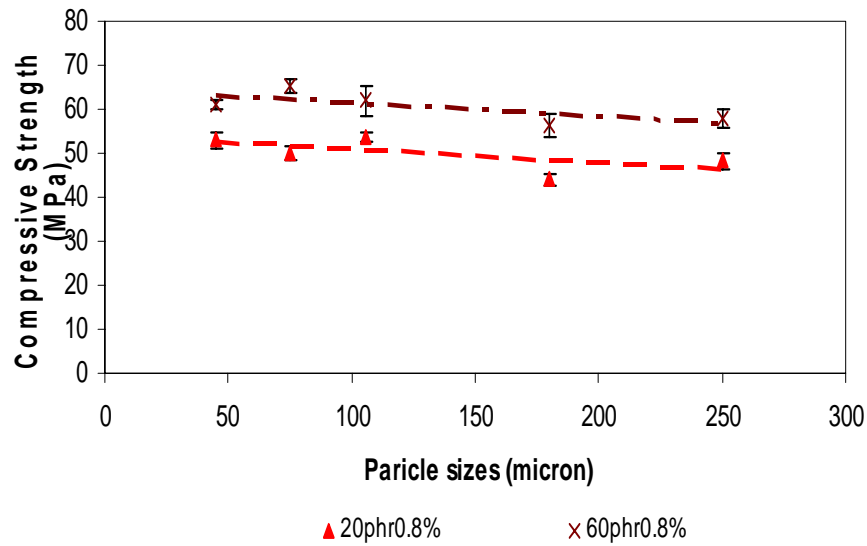
### Compressive Modulus@ 0.8%



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของ ไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

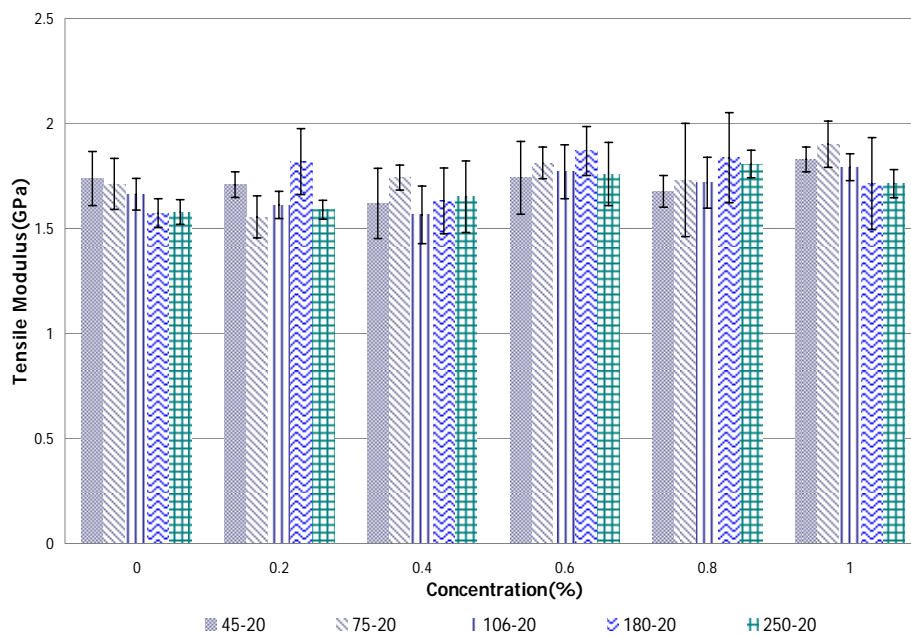
พิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคแกลบ จะเห็นว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงกดอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.48 และ 4.49 เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะกระจายตัวได้ดีกว่า และมีพื้นที่ผิวรับแรงกดที่เกิดจากการทดสอบมากกว่าจึงมีมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งและค่าการทนต่อแรงกดอัดสูงกว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่มีอนุภาคผงแกลบขนาดใหญ่

### Compressive Strength @ 0.8%



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

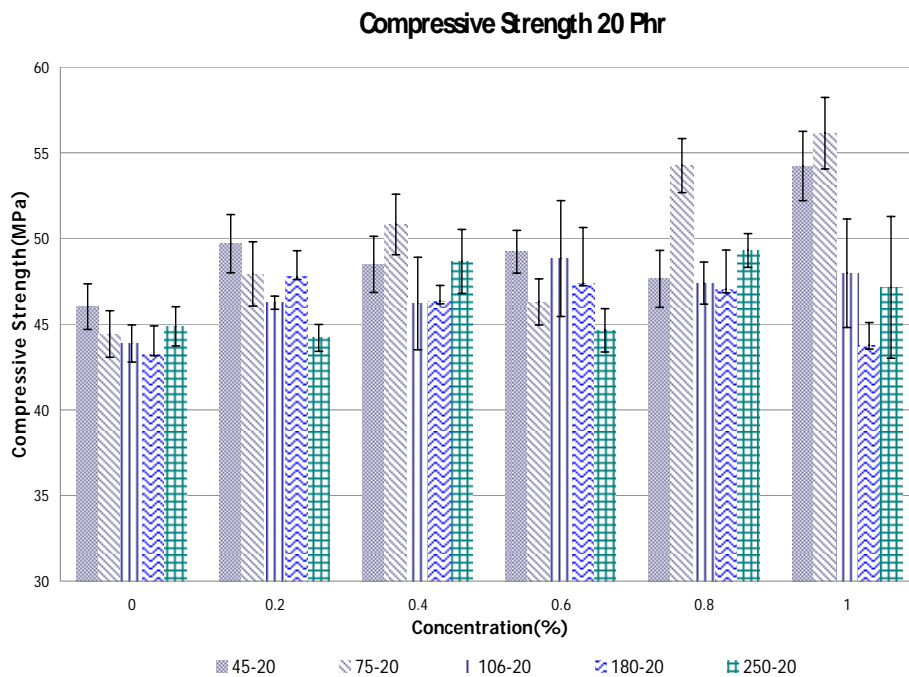
### Compressive Modulus 20 phr



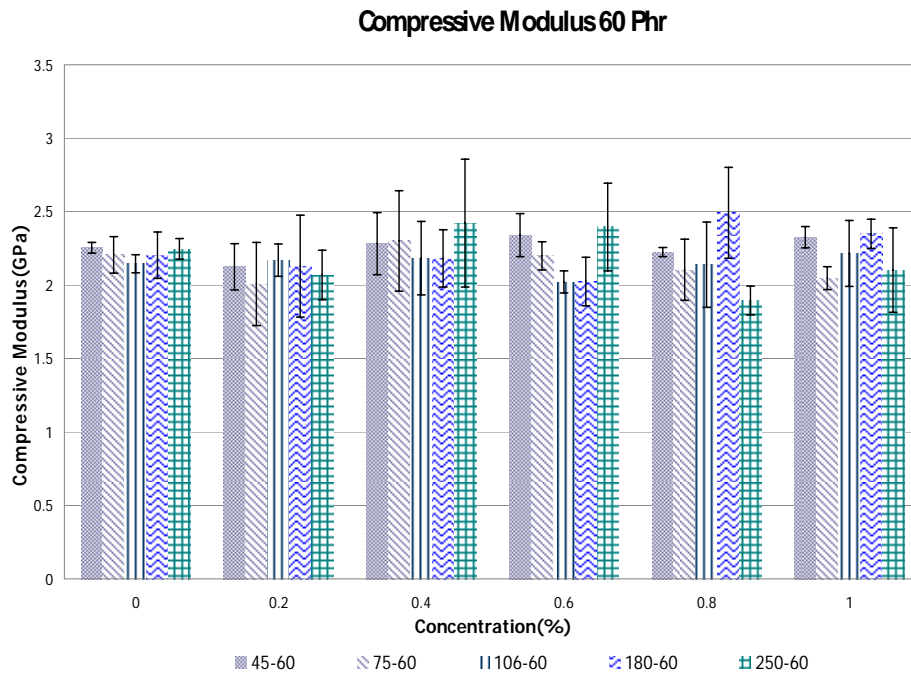
รูปที่ 4.50 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแคลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของแคลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

จากรูปที่ 4.50 แสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/เถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้น 0.8% ขนาด 75 ไมครอน ปริมาณผงเถ้าแกลบ 20 phr พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวราว 1.13% และค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้น 22.11% ดังรูปที่ 4.51 เมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดอัดและค่าการทนต่อแรงกดอัดราว 1.73 GPa และ 46.58 MPa ตามลำดับ

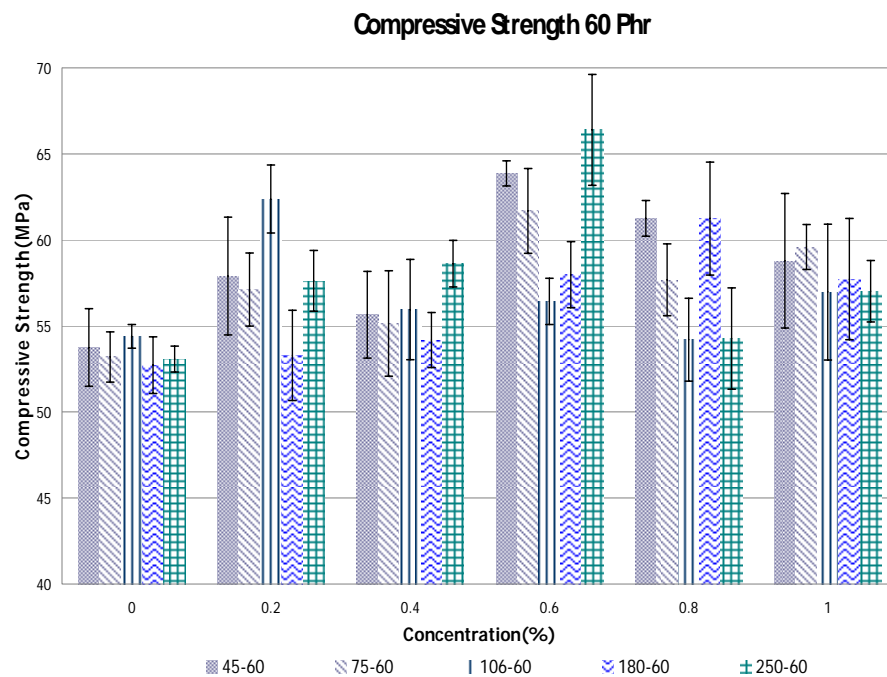
เมื่อเพิ่มปริมาณผงเถ้าแกลบ 60 phr จากรูปที่ 4.52 พบว่า ที่ความเข้มข้นและขนาดเดียวกัน มอดูลัสภายใต้แรงกดอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวราว 53.74% และจากรูปที่ 4.53 ค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้น 37.24 % เมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดอัดและค่าการทนต่อแรงกดอัดราว 2.03 GPa และ 45.79 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเถ้าแกลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



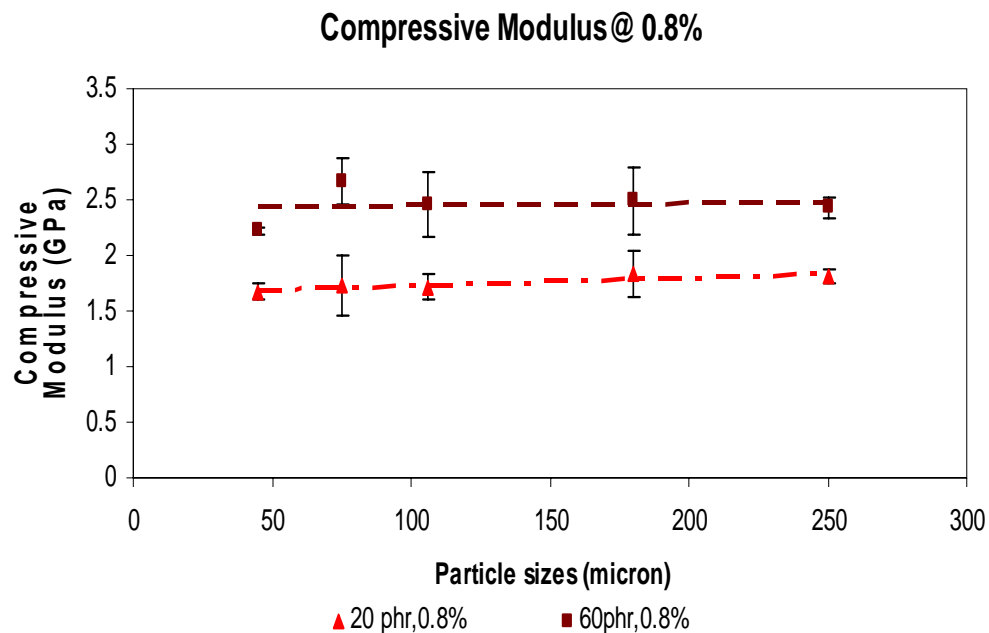
รูปที่ 4.52 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเถ้าแกลบ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



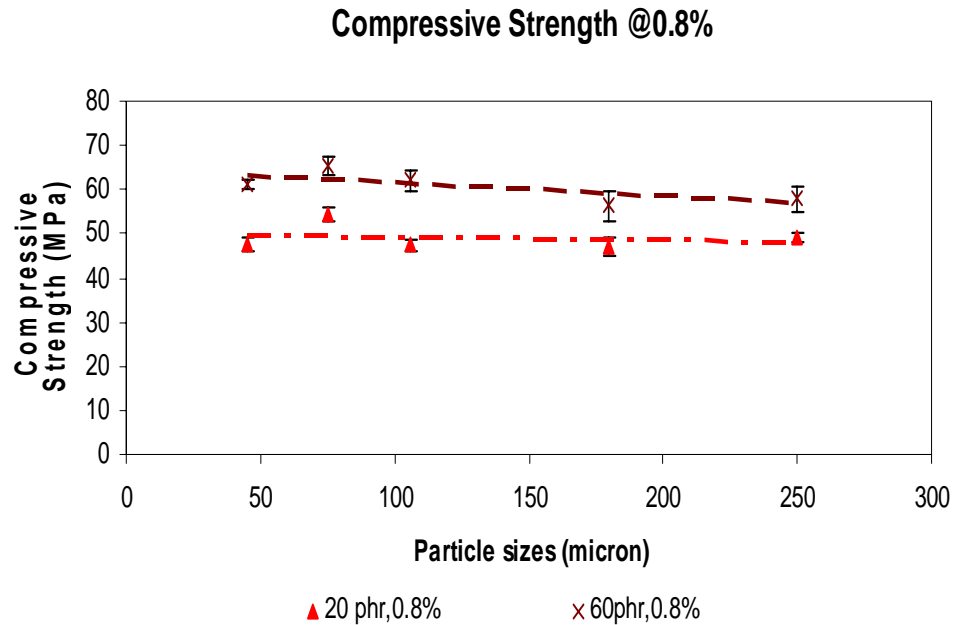
รูปที่ 4.53 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของเถ้าแกลบ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



เมื่อเพิ่มปริมาณผงถั่วแกลบจาก 20 เป็น 60 phr มอดูลัสภายใต้แรงกดอัดเพิ่มขึ้น 54.07 % ดังรูปที่ 4.54 และค่าการทนต่อแรงกดเพิ่มขึ้นราว 37.24% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.55 เนื่องมาจากผงถั่วแกลบที่ใส่ทำหน้าที่ร่วมรับแรงกดและเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวส่งผลให้ช่องว่างระหว่างสองเฟสลดลงและส่งผ่านแรงจากPVCไปยังผงถั่วแกลบได้มากขึ้น ทำให้ไม้พลาสติกมีค่าการทนต่อแรงกดอัดสูงขึ้น เมื่อปริมาณผงถั่วแกลบมากขึ้นก็จะสามารถรับแรงกดได้สูงขึ้น ทำให้การยุบตัวของวัสดุประกอบไม้พลาสติกลดลง

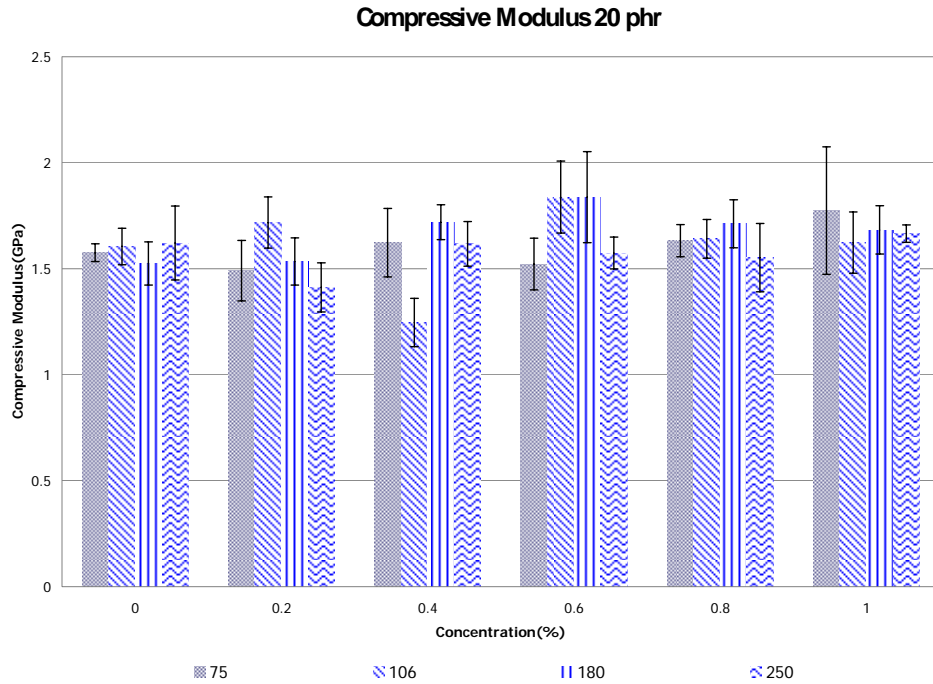


รูปที่ 4.54 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

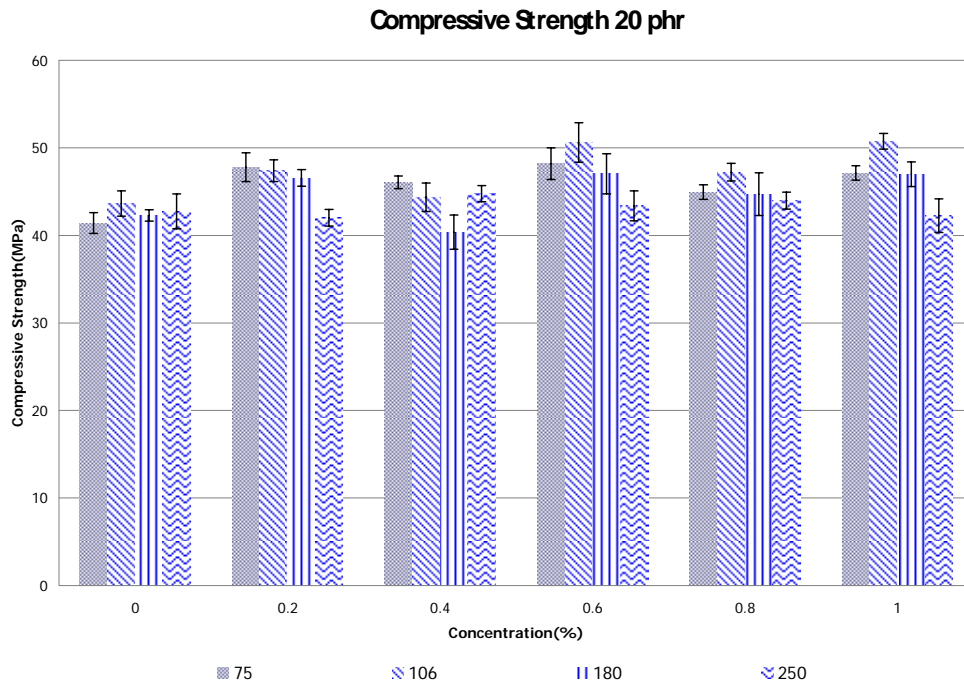


รูปที่ 4.55 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/เส้นใยถั่วเหลือง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

จากรูปที่ 4.56 แสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ไม้เต็ง ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน ที่ความเข้มข้น 0.6% ขนาด 75 ไมครอน ปริมาณผงไม้ 20 phr พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีปรับแต่งพื้นผิวมอดูลัสภายใต้แรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวราว 14.53% ดังรูปที่ 4.56 และค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้น 15.98% ดังรูปที่ 4.57 เมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดอัดและค่าการทนต่อแรงกดอัดราว 1.60 GPa และ 43.63 MPa ตามลำดับ เนื่องจาก ผงไม้มีความแข็งทำหน้าที่ร่วมรับแรงกดและขัดขวางการยุบตัวของวัสดุประกอบไม้พลาสติก เมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวส่งผลให้ช่องว่างระหว่างสองเฟสลดลงและส่งผ่านแรงจากPVCไปยังผงไม้ได้มากขึ้น ทำให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าการทนต่อแรงกดอัดสูงขึ้น



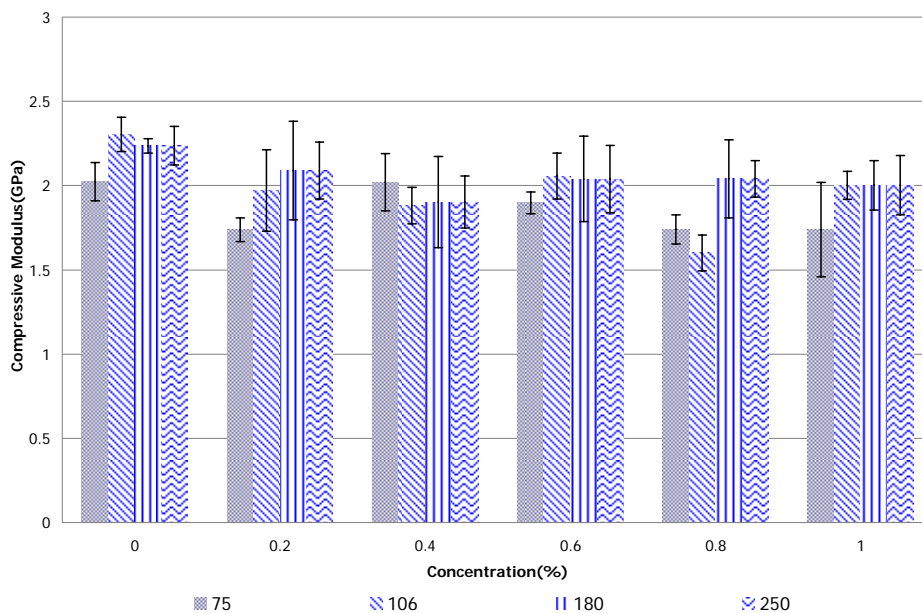
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



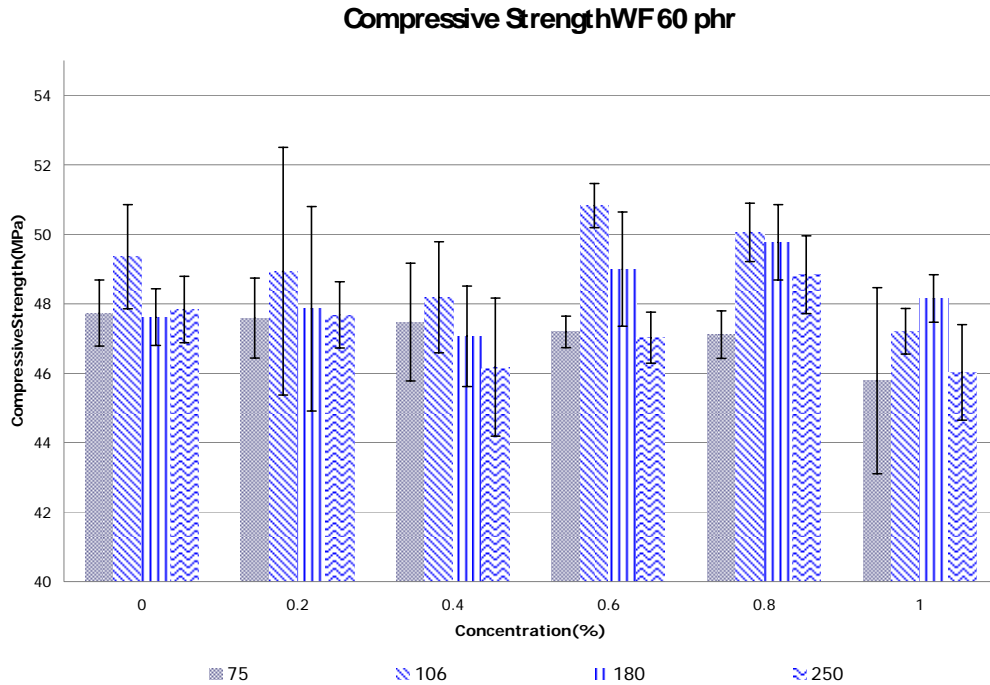
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 20 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%

เมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้เต็ง 60 phr จากรูปที่ 4.58 พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงกดอัดที่ความเข้มข้นเดียวกันเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวเพิ่มขึ้นราว 3.32% และจากรูปที่ 4.59 ค่าการทนต่อแรงกดอัดเพิ่มขึ้น 2.98 % เมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้เต็งจาก 20 เป็น 60 phr มอดูลัสภายใต้แรงกดอัดเพิ่มขึ้น 14.56 % ดังรูปที่ 4.60 แต่ค่าการทนต่อแรงกดอัดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.61 เนื่องมาจากผงไม้ที่ใส่ทำหน้าที่ร่วมรับแรงกดและเมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวส่งผลช่องว่างระหว่างสองเฟสลดลงและส่งผ่านแรงจากPVCไปยังผงไม้ได้มากขึ้น ทำให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าการทนต่อแรงกดอัดสูงขึ้น เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้นก็จะสามารถรับแรงกดได้สูงขึ้น การยุบตัวของไม้พลาสติกลดลง

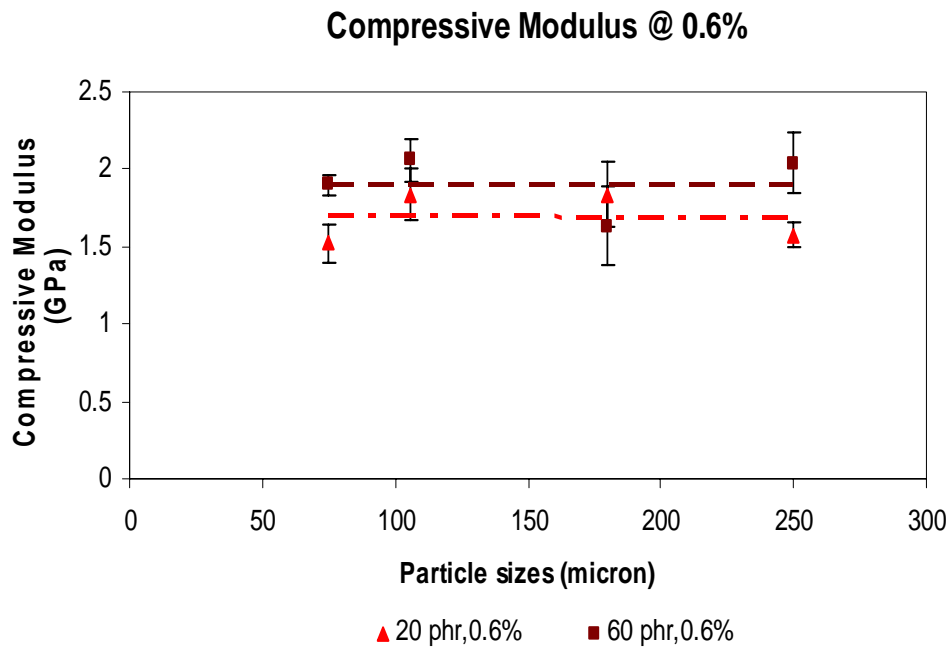
Compressive ModulusWF 60 phr



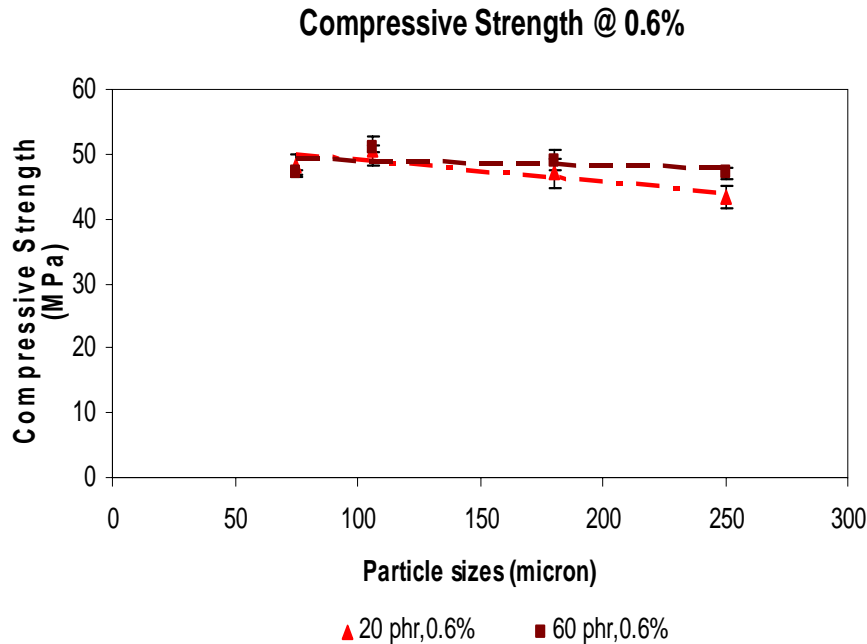
รูปที่ 4.58 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของผงไม้ 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0-1.0%



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้แต่ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของไม้แต่ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.6%



รูปที่ 4.61 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้เต็ง ที่ขนาดต่างๆและปริมาณของไม้เต็ง 20, 60 phr ความเข้มข้นสารประสาน 0.8%

พิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาคที่มีต่อมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดและค่าการทนต่อแรงกดอัด พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.60 และ 4.61 เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะกระจายตัวได้ดีกว่า และมีพื้นที่ผิวรับแรงกดที่เกิดจากการทดสอบมากกว่าจึงมีมอดูลัสภายใต้แรงกดอัดและค่าการทนต่อแรงกดอัดสูงกว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่มีอนุภาคผงไม้ขนาดใหญ่

จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกทั้ง 3 ระบบ คือ PVC/แคลบ PVC/ถั่วแคลบ และPVC/ไม้เต็ง พบว่า เมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิววัสดุเสริม วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกสามารถทนต่อแรงกดอัดได้มากขึ้น สามารถเรียงตามความสามารถในการทนแรงดัดโค้งจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PVC/ถั่วแคลบราว 20-30% PVC/แคลบราว 8-20% และPVC/ไม้เต็ง ราว 15% ตามลำดับ

## 4.7 สมบัติเชิงความร้อน

### 4.7.1 Heat Deflection Temperature

อุณหภูมิในการโค้งงอของชิ้นงานของPVC บริสุทธิ์ เท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มวัสดุเสริมที่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสาน อุณหภูมิในการโค้งงอของชิ้นงาน มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการทำให้ชิ้นงานโค้งงอด้วยความร้อนเมื่อมีวัสดุเสริมเข้าไปขัดขวางการคลายขดและยึดของสายโซ่พอลิเมอร์ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อที่จะทำให้ชิ้นงานโค้งงอ ในการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิในการโค้งงอมีวัตถุประสงค์เพื่อหาศึกษาอุณหภูมิที่วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกสามารถทนได้ก่อนเกิดการโค้งงอ เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในบริเวณที่มีความร้อนสูงได้ดี จากตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิในการโค้งงอของชิ้นงานเมื่อได้รับความร้อน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานจาก 20 เป็น 60 phrอุณหภูมิในการโค้งงอของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากว่ามีจำนวนอนุภาคที่ไปขัดขวางการคลายขดและยึดของสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้นต้องใช้ความร้อนมากขึ้นทำให้ชิ้นงานโค้งงอ

ตาราง 4.1 Heat deflection temperature of PVC/fillers.

Fillers	Heat deflection temperature (°C)	
	20 phr	60 phr
RH	78	80
RHA45 $\mu$ m , 1.0%	79	79
RH250 $\mu$ m , 1.0%	79	81
RHA	79	81
RHA45 $\mu$ m , 1.0%	80	82
RHA250 $\mu$ m , 1.0%	80	82
WF	79	80
WF75 $\mu$ m , 1.0%	79	81
WF250 $\mu$ m, 1.0%	79	81

#### 4.7.2 Glass Transition Temperature ( $T_g$ )

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสายโซ่โดยไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสายโซ่โดยไม่เปลี่ยนสถานะ คือ พอลิเมอร์ยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น สายโซ่จะได้รับพลังงานมากขึ้นจนถึงอุณหภูมิเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดพอที่จะสั่นหรือเคลื่อนไหว แต่ไม่เคลื่อนที่ พอลิเมอร์จึงยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง หากเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พอลิเมอร์จะรับพลังงานไปใช้ในการสั่นนี้เพิ่มขึ้นจนทำให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จัดเป็นของแข็งสถานะคล้ายยาง (rubbery state) [24] จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานจาก 20 เป็น 60 phr อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการทำให้สายโซ่เกิดการสั่นหรือเคลื่อนไหวได้



**ဇယား 4.2 Glass transition temperature of PVC/fillers.**

Fillers	Glass Transition Temperature ( $T_g$ )	
	20 phr	60 phr
RH45 $\mu$ m , 0.2%	85.7	89.2
RHA45 $\mu$ m , 1.0%	85.6	88.2
RH250 $\mu$ m , 0.2%	87.7	86.7
RH250 $\mu$ m , 1.0%	85.2	86.3
RHA45 $\mu$ m , 0.2%	84.5	85.6
RHA45 $\mu$ m , 1.0%	85.0	87.3
RHA250 $\mu$ m , 0.2%	90.5	93.0
RHA250 $\mu$ m , 1.0%	90.7	93.7
WF75 $\mu$ m , 0.2%	83.1	93.7
WF75 $\mu$ m , 1.0%	83.9	85.2
WF250 $\mu$ m , 0.2%	85.2	85.7
WF250 $\mu$ m , 1.0%	84.6	92.0

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของอิทธิพลของสารประสานต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกและศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารประสานต่อผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

จากการงานวิจัยนี้ พบว่า วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานนั้น ขนาดอนุภาค 45 75 106 180 และ 250 ไมครอนและปริมาณวัสดุเสริมที่เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 phr มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล ดังผลการทดลองที่ได้แสดงข้างต้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี คือ เมื่อขนาดอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) มาก เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ค่ามอดูลัสค่าทนต่อแรงจะมีค่าสูงเมื่อวัสดุเสริมมีขนาดเล็ก และเมื่อปริมาณเพิ่มสูงขึ้นค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุเสริมที่เติมลงไปทำให้ไม้วัสดุมีความแข็งมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ค่าการทนต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อปริมาณวัสดุเสริมมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ค่าทนต่อการยืดกลับลดลงเนื่องจากว่า เมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับแรงสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการคลายขดและยืดออกเมื่อมีอนุภาคของวัสดุเสริมเป็นเฟสที่มากำกัลดการเคลื่อนขยับและการยืดคลายขดของโมเลกุลของ PVC วัสดุเสริมจึงกลายเป็นอุปสรรคจำกัด Molecular motion ดังกล่าว ทำให้ต้องใช้แรงดึงสูงขึ้นต่อหน่วยการยืดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกโดยรวม ซึ่งสะท้อนออกมาให้เห็นในรูปของมอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงขึ้นเมื่อมีการใส่วัสดุเสริมลงไป

การเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคภายใต้แรงดึงโดยภาพรวมพบว่า เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นแนวโน้มของมอดูลัสภายใต้แรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากในปริมาณที่เท่ากัน อนุภาคเล็กมีจำนวนอนุภาคกระจายตัวใน PVC ได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้น วัสดุเสริมขนาดเล็กจึงเป็นอนุภาคจำนวนมากที่กลายเป็นอุปสรรคต่อการคลายขดและยืดของโมเลกุล PVC มอดูลัสภายใต้แรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่มีอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

ในกรณีที่ใช้สารประสานในการปรับแต่งพื้นผิวของวัสดุเสริม พบว่า ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ 0.4-0.8% เป็นช่วงที่ให้ค่าทางสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบจากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิวต้องใช้แรงในการทำให้

ชิ้นงานทดสอบแตกหักออกจากกัน หมายถึง ชิ้นงานทดสอบสามารถดูดซับแรงได้มากขึ้น สามารถทนต่อแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้นก่อนที่ชิ้นงานจะแตกหัก เนื่องจากว่า เมื่อปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารประสานที่ผิวสัมผัสของทั้งสองฟสจะเกิดพันธะทางเคมี คือ พันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงและจากภาพถ่าย SEM พบว่า มีผิวสัมผัสระหว่างเฟสมากขึ้นการส่งผ่านแรงจากPVCไปยังวัสดุเสริมที่เป็นเฟสที่แข็งกว่าก็มากด้วย เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคและปริมาณวัสดุเสริมที่เติมลงไป พบว่าอิทธิพลของปริมาณวัสดุเสริมมีอิทธิพลเด่นชัดต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกมากกว่าขนาดอนุภาคจึงสามารถสรุปได้อย่างคร่าวๆดังนี้ คือ

- 1). ช่วงความเข้มข้นของสารประสาน(N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane) คือ ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมไม้พลาสติกคือช่วงความเข้มข้น 0.4-0.8%
  - 2). ประสาน(N-( $\beta$ -aminoethyl)- $\gamma$ -aminopropyl-trimethoxysilane) เหมาะสำหรับการใช้งานกับวัสดุเสริมที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ
  - 3).ปริมาณวัสดุเสริมที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์เมื่อมีการใช้สารประสานปรับแต่งพื้นผิว
  - 4).เมื่อปริมาณผงแคลบสูงขึ้น อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการโค้งงอของชิ้นงานไม้พลาสติกเพิ่มขึ้น
- สามารถสรุปได้ดังตาราง

ตาราง 5.1 มอดูลัสและค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ

Filler	Content (phr)	มอดูลัส (GPa)	ค่าการทนต่อแรงดึง(MPa)	%การเพิ่มมอดูลัส (GPa)	%การเพิ่มค่าการทนต่อแรงดึง (MPa)
RH	20	2.66	34.56	34.56	26.24
	60	3.18	30.69	23.91	24.07
RHA	20	2.37	35.86	12.57	7.08
	60	2.94	32.55	14.74	21.65
WF	20	2.51	35.95	8.45	11.15
	60	3.42	35.56	21.30	27.57

ตาราง 5.2 มอดูลัสและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ

Filler	Content (phr)	มอดูลัส (GPa)	ค่าการทนต่อแรงดัด (MPa)	%การเพิ่มมอดูลัส (GPa)	%การเพิ่มค่าการทนต่อแรงดัด (MPa)
RH	20	3.44	57.29	9.20	5.46
	60	4.80	58.92	64.13	24.50
RHA	20	2.70	48.0	4.24	18.50
	60	4.17	49.44	38.50	26.82
WF	20	2.33	37.53	ใกล้เคียง	1.48
	60	4.00	39.67	ใกล้เคียง	20.15

ตาราง 5.3 มอดูลัสและค่าการทนต่อแรงกดอัดของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก 3 ระบบ

Filler	Content (phr)	มอดูลัส (GPa)	ค่าการทนต่อแรงดัด (MPa)	%การเพิ่มมอดูลัส (GPa)	%การเพิ่มค่าการทนต่อแรงดัด (MPa)
RH	20	2.10	53.04	21.13	13.87
	60	2.20	60.86	8.49	32.91
RHA	20	1.73	54.24	1.13	22.11
	60	2.67	65.43	53.74	37.24
WF	20	1.83	50.61	14.53	15.98
	60	2.06	50.82	3.32	2.98

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะแนวทางปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติม มีดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม เช่น แสงแดด อุณหภูมิและความชื้น

5.2.2 ศึกษาการนำกลับมา Recycle ใหม่

## รายการอ้างอิง

- [1] ณรงค์ ไชยสุด. **วิธีการวิเคราะห์โดยอุปกรณ**, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2535
- [2] บรรณ เลง ศรีนิล. **เทคโนโลยีพลาสติก(ฉบับปรับปรุง)**, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2546.
- [3] นพวรรณ ชัญญพานิช. **ปฏิบัติการเคมีพอลิเมอร์ (Polymer Chemistry Laboratory)**, ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [4] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. **งานฉีดพลาสติก**, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น 2540.
- [5] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. **เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีพลาสติก**
- [6] วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (Journal of the National Research council of Thailand) ปีที่ 34 เล่มที่ 2. กรกฎาคม-ธันวาคม 2545.
- [7] สมควร วัฒนกิจไพบูลย์, จิตตกร ทรงต่อศรีสกุล **Engineer Today** ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หน้า. 135-138 กรกฎาคม 2548.
- [8] H.Juvaste, Eero I. Iiskola, T. Pakkanen. Aminosilane as a coupling agent for cyclopentadienyl ligands on silica. **Journal of organometallic Chemistry.** 587(1999):38-45
- [9] W.Chiang, Y. Ku. The effect of maleic anhydride grafting on the flame retardation of plasma pretreated polyethylene. **Polymer Degradation and Stability.** 76(2002):281-290.
- [10] H.Yang, D. Kim, Y. Lee, H. Kim, J. Jeon, C.Kang. Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. **Bioresource Technology.** 95(2004):61-65
- [11] M. Bengtsson, Kristiina Oksman. Silane crosslinked wood composites: processing and properties. **Composites science and Techonology**, 2004.
- [12] M. Hashimoto, H. Takadama, Mineo Mizuno, Tadashi Kokubo . Enhancement of mechanical strength of TiO<sub>2</sub>/High-density polypropylene composite for bone repair with silane coupling treatment. **Materials Research Bulletin.**41(2006):515-524.
- [13] P.Sae-oui , U. T.psuwan , K. Hatthapanit. Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent. **Polymer Testing** 23(2004):397-403.

- [14] T.J.Keener , R.K. Stuart , T.K. Brown. Maleated coupling agent for natural fiber composites. **Composites: Part A** (2004):357-362.
- [15] S. Sun, C. Li, L. Zhang, H.L.Du, J.S.Burnell-Gray. Effect of surface modification of fumed silica on interfacial structure and mechanical properties of poly(vinyl chloride) composites. **European Polymer Journal**.(2006).
- [16] อรุษา สรวารี. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่มที่ 1** ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546 หน้า 65-73
- [17]. ธนดล สัตตบงกช. **ไม้พลาสติก** [นิตยสารงานวิจัย]. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2547.
- [18]. ธนดล สัตตบงกช. **ไม้ประกอบและไม้ประกอบพลาสติก. การประชุมการป่าไม้** ,2545: 247- 255.
- [19]. เจริญ นาคะสรรค์. **เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก**. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2546.
- [20]. สุภาพ ศิลปคัมภีรภาพ, สุพจน์ อ้วนเจริญกุล. **การเตรียมและตรวจสอบคุณภาพซิลิกาเจลที่ได้จากเถ้าแกลบ โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์** คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537,หน้า 1-8
- [21] บุรฉัตร ฉัตรวิระ, วินัย อวยพรประเสริฐ และ สาโรจน์ ดำรงศิลป์. “คุณสมบัติของเถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอิฐมอญ”. กรุงเทพฯ : การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5: MAT, 171-175, 2542
- [22] สมเกียรติ แก้วจรัสสุขสันติ. **การศึกษาการใช้ประโยชน์ของเถ้าชนิดเบาของถ่านหินลิกไนต์เพื่อทำอิฐและคอนกรีต. การค้นคว้าแบบอิสระเชิงวิทยานิพนธ์** ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาการสอนเคมีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2527
- [23] ก้องเกียรติ ภู่เกิด. **การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์จากเถ้าข้าว. การค้นคว้าแบบอิสระเชิงวิทยานิพนธ์** ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาการสอนฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2531
- [24] ปกรณ์ โอภาประกาศิต, มณฑนา โอภาประกาศิต. พอลิเมอร์ วัสดุเอนกประสงค์ แหล่งที่มา:www.vcharkarn.com
- [25.] จินตมัย สุวรรณประทีป. **การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 1.** กรุงเทพมหานคร: ศ.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย- ญี่ปุ่น), 2547.
- [26] H.S. Yang et. al., Rice-husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study. **Composite Structures** 63(2004) : 305–312

- [27] Anatole A.Klyosov. **Wood-Plastic Composites.**Wilsley-Internationalscience. A John Willey & Sons, Inc, Publication.
- [28] Marinothos. **Functional Fillers for Plastics** Otto H.York Department of Chemical Engineering and Polymer Processing Institute, USA
- [29] Callum A.S.Hill.**Wood Modfication Chemical ,Thermal and other Process.**School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales,Bangor.
- [30] ชัยนา ปิติธรรมภรณ์ การพัฒนาวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์ และแกลบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [31] นรินทร์ กาบบัวทอง สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงกับแกลบและแกลบเผาอัดแท่ง.วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [32] ศราวุธ ริมคูสิต เอกสารประกอบคำสอน วิชา 2105638 วิศวกรรมพอลิเมอร์ขั้นสูง (**Advance Polymer Engineering**) ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาววิทยาลัย
- [33] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม **Principles and Techniques of Instrumental Analysis** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาววิทยาลัย, 2534 หน้า 108-149.
- [34] M.Botros Development of New Generation Coupling agents for Wood Plastic Composites.**The global outlook for Natural and Wood Fibers Composites.**New Orleans,LA,2003
- [35] M.Y.A Fuad, Z.Ismail, Z.A.M. Ishak, A.K.M. Omar. Application of rice husk ash as fillers in Polypropylene : Effect of titanate, zirconate and silane Coupling agents. **European. Polym.Journal.**31(1995):885-893.
- [36] Z.Youngsheng, W. Kejian, Z. Fuhua, X. ping, J. Mingyin.Properties of Poly(vinyl Chloride)/wood flour/montmorillonite composites:Effect of Coupling agents and layered silicate.**Polymer Degradation and Stability** (2006):1-10.
- [37] Matuana L.M. et. al. Influence of Interfacial Interactions on the Properties of PVC/Cellulosic Fiber Composites, **Polymer Composites**,19 (1998)
- [38] Coupling agent-Silaneแหล่งที่มา: <http://www.Wikipedia.com>
- [39] Silane Info แหล่งที่มา: <http://www.wikiwhat.com>
- [40] Silanol แหล่งที่มา: <http://www.Wikipedia.com>
- [41] Silane Coupling agent แหล่งที่มา: <http://www.chisso.co.th>
- [42] The Silane Technology แหล่งที่มา: <http://www.Dow Corning.com>

[43] Adhesion Promoter Center-Coupling agent mechanism

แหล่งที่มา: <http://www.specialchem4polymers.com>

[44] Nicole Stark Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled

Polypropylene Composites. Intertech Conferences, 1997

[45] Material Property Data แหล่งที่มา: <http://www.matweb.com>



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลดิบผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/แคลบที่แคลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.6% ปริมาณแคลบ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Tensile Modulus (GPa)	Stress at yield (MPa)	Stress at yield (MPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Strain at yield (%)	Fracture stress (MPa)	Work done to Failure (N.m)	Fracture Energy ( $\text{kJ/m}^2$ )
45	2.64	28.81	1.43	32.38	1.37	21.40	2.02	0.51	28272.87
75	2.44	35.43	1.65	36.34	1.99	29.13	3.45	1.24	68720.89
106	2.47	29.39	1.96	30.35	2.48	28.16	4.35	1.36	75784.17
180	2.63	30.88	1.45	33.07	1.93	27.70	3.29	1.10	61345.72
250	2.84	36.58	1.73	37.03	1.99	20.40	3.93	1.55	86183.94

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของ ไม้พลาสติกPVC/แคลบที่เถ้าแคลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้นสารประสาน 0.6% ปริมาณแคลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Tensile Modulus (GPa)	Stress at yield (MPa)	Stress at yield (MPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Strain at yield (%)	Fracture stress (MPa)	Work done to Failure (N.m)	Fracture Energy ( $\text{kJ/m}^2$ )
45	3.01	31.53	1.38	32.47	1.29	1.38	31.53	0.37	20327.55
75	3.28	29.66	1.00	32.20	1.43	31.93	1.35	0.41	22772.98
106	3.16	28.55	1.51	30.47	1.74	29.20	1.84	0.37	20559.30
180	3.16	28.55	1.51	30.47	1.74	29.20	1.84	0.37	20559.30
250	3.18	24.83	0.76	30.69	1.22	24.77	1.37	0.41	22785.74

ตารางที่ ก-3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/เถ้าแกลบที่เถ้าแกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8% ปริมาณแกลบ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Tensile Modulus (GPa)	Stress at yield (MPa)	Stress at yield (MPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Fracture stress (MPa)	Fracture strain (%)	Work done to (N.m)	Fracture Energy (kJ/m <sup>2</sup> )
45	2.37	33.99	1.63	35.86	2.46	33.68	3.51	0.95	52818.92
75	2.18	31.81	1.54	34.06	2.22	31.74	3.42	0.90	49738.96
106	2.29	31.95	1.51	33.62	2.08	28.92	5.05	2.05	113793.80
180	2.12	35.85	2.28	35.94	2.46	32.84	4.25	1.55	85874.61
250	2.33	33.19	1.69	34.66	2.09	33.26	2.46	0.72	40138.78

ตารางที่ ก-4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของ ไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบที่ถั่วแกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8% ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Tensile Modulus (GPa)	Stress at yield (MPa)	Stress at yield (MPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Fracture stress (MPa)	Fracture strain (%)	Work done to Failure (N.m)	Fracture Energy (kJ/m <sup>2</sup> )
45	2.00	26.40	1.38	28.55	1.97	28.34	1.82	0.61	33976.64
75	2.09	28.38	1.48	30.80	2.15	29.85	2.74	0.80	44215.57
106	2.47	27.85	1.26	30.66	2.03	29.98	2.74	0.80	44607.52
180	2.22	30.58	1.48	31.87	1.94	30.15	2.37	0.78	43216.91
250	2.40	24.88	0.86	29.81	1.38	28.48	1.57	0.35	19521.94

ตารางที่ ก-5 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของ ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ที่ผงไม้อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ปริมาณผงไม้ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Tensile Modulus (GPa)	Stress at yield (MPa)	Strain at yield (%)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Fracture stress (MPa)	Fracture strain (%)	Work done to Failure (N.m)	Fracture Energy (kJ/m <sup>2</sup> )
75	2.30	32.96	1.66	34.71	2.37	30.20	4.43	1.53	84723.17
106	2.51	33.98	1.72	35.95	2.31	32.37	4.58	1.59	88138.56
180	2.42	28.29	1.72	30.42	1.87	26.62	3.42	1.01	55964.11
250	2.30	30.73	1.85	31.07	2.19	27.04	3.63	1.20	66552.50

ตารางที่ ก-6 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ผงไม้อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Tensile Modulus (GPa)	Stress at yield (MPa)	Strain at yield (%)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Fracture stress (MPa)	Fracture strain (%)	Work done to Failure (N.m)	Fracture Energy ( $\text{kJ/m}^2$ )
75	3.11	28.94	1.20	30.34	1.54	29.55	1.78	0.38	21311.43
106	3.15	29.78	1.11	30.66	1.32	28.40	1.63	0.42	23607.41
180	3.74	33.62	1.02	34.63	1.35	29.85	1.38	0.39	21738.12
250	3.45	28.51	0.86	31.20	1.23	27.98	1.60	0.39	21437.69

ตารางที่ ก-7 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่ขนาดอนุภาคต่างๆที่ความเข้มข้น0.8% ปริมาณแคลบ 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Flexural Modulus (GPa)</b>	<b>Stress at yield (MPa)</b>	<b>Strain at yield (%)</b>	<b>Flexural strength (MPa)</b>	<b>Flexural strain (%)</b>
45	3.67	58.83	2.48	59.35	2.93
75	3.44	56.87	2.80	57.29	3.15
106	3.36	51.59	2.16	53.49	2.85
180	3.14	45.41	2.32	46.07	2.73
250	3.44	56.87	2.80	57.29	3.15



ตารางที่ ก-8 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8% ปริมาณเถ้าแคลบ 60 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Flexural Modulus (GPa)</b>	<b>Stress at yield (MPa)</b>	<b>Strain at yield (%)</b>	<b>Flexural strength (MPa)</b>	<b>Flexural strain (%)</b>
45	4.75	50.11	1.31	52.01	1.50
75	4.80	58.77	1.71	58.97	1.78
106	5.48	58.00	1.39	63.02	1.87
180	3.53	42.36	1.55	44.59	1.94
250	4.80	58.77	1.71	58.97	1.78

ตารางที่ ก-9 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของ ไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ปริมาณถั่วแกลบ 20 phr

<b>Particle sizes (mm)</b>	<b>Flexural Modulus (GPa)</b>	<b>Stress at yield (MPa)</b>	<b>Strain at yield (%)</b>	<b>Flexural strength (MPa)</b>	<b>Flexural strain (%)</b>
45	2.70	45.19	2.48	47.99	3.50
75	2.84	40.82	2.13	43.76	3.18
106	2.97	46.71	2.48	49.50	3.62
180	2.09	33.21	2.23	35.97	3.53
250	2.84	40.42	2.29	42.53	3.42

ตารางที่ ก-10 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ถ้ำเกลือ ที่อนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ปริมาณถ้ำเกลือ 60 phr

<b>Particle sizes (mm)</b>	<b>Flexural Modulus (GPa)</b>	<b>Stress at yield (MPa)</b>	<b>Strain at yield (%)</b>	<b>Flexural strength (MPa)</b>	<b>Flexural strain (%)</b>
45	4.17	47.32	1.95	49.44	2.49
75	3.70	42.63	1.93	44.67	2.65
106	3.53	42.36	1.55	44.59	1.94
180	3.54	43.51	1.89	44.16	2.17
250	3.91	43.33	1.89	45.36	2.48

ตารางที่ ก-11 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ปริมาณ ไม้เต็ง 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Flexural Modulus (GPa)</b>	<b>Stress at yield (MPa)</b>	<b>Strain at yield (%)</b>	<b>Flexural strength (MPa)</b>	<b>Flexural strain (%)</b>
75	2.79	42.86	2.48	44.31	3.37
106	2.55	37.79	2.29	39.97	3.39
180	2.36	34.09	1.86	38.40	3.52
250	2.57	36.23	2.12	39.04	3.46

ตารางที่ ก-12 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดอัดของไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่แคลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ที่ปริมาณแคลบ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Compression Modulus	Stress at yield	Strain at yield (%)	Compression strength (MPa)	Compression strain
45	1.92	57.65	8.38	60.15	12.73
75	1.77	44.80	3.93	48.82	8.84
106	1.65	42.78	6.19	44.70	11.39
180	1.62	44.66	5.58	45.90	7.94
250	1.77	46.61	6.53	48.75	9.21

ตารางที่ ก-13 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดอัดของไม้พลาสติกPVC/แคลบ ที่แคลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ที่ปริมาณแคลบ 60 phr

<b>Particle sizes</b>  <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Compression</b>  <b>Modulus</b>	<b>Stress at</b> <b>yield</b>	<b>Strain at</b> <b>yield</b> <b>(%)</b>	<b>Compression</b> <b>strength</b> <b>(MPa)</b>	<b>Compression</b>  <b>strain</b>
45	2.21	57.45	5.63	57.69	6.42
75	2.53	66.05	5.37	66.97	13.22
106	2.34	57.13	4.90	58.85	12.75
180	2.28	52.45	4.95	55.16	8.10
250	2.40	65.61	5.48	66.39	7.37

ตารางที่ ก-14 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดอัดของไม้พลาสติกPVC/ถั่วแกลบ ที่ถั่วแกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8% ที่ปริมาณถั่วแกลบ 20 phr

Particle sizes (mm)	Compression Modulus	Stress at yield	Strain at yield (%)	Compression strength (MPa)	Compression strain
45	1.68	42.44	4.35	47.65	9.85
75	1.73	51.28	5.35	54.25	9.44
106	1.72	46.34	5.52	47.39	7.41
180	1.84	46.93	6.05	47.04	6.52
250	1.81	49.18	6.63	49.30	9.31

ตารางที่ ก-15 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดอัดของไม้พลาสติกPVC/เส้นใยแก้ว ที่เส้นใยแก้วอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.8% ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Compression Modulus	Stress at yield	Strain at yield (%)	Compression strength (MPa)	Compression strain
45	2.20	58.98	5.82	60.86	9.91
75	2.67	64.96	5.26	65.44	6.52
106	2.46	61.40	4.88	62.00	6.14
180	2.49	55.68	4.94	56.34	7.14
250	2.43	57.28	4.77	57.89	6.50



ตารางที่ ก-16 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดอัดของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ไม้เต็ง อนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Compression Modulus	Stress at yield	Strain at yield (%)	Compression strength (MPa)	Compression strain
75	1.52	47.75	6.97	48.19	8.23
106	1.84	50.20	4.98	50.61	5.77
180	1.84	46.93	6.05	47.04	6.52
250	1.57	43.00	5.34	43.36	5.97

ตารางที่ ก-17 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดอัดของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง ที่ไม้เต็งอนุภาคนาขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น0.6% ที่ปริมาณผงไม้ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Compression Modulus	Stress at yield	Strain at yield (%)	Compression strength (MPa)	Compression strain
75	1.74	44.32	3.81	47.11	5.38
106	1.60	48.47	4.51	50.06	5.76
180	2.02	44.26	3.61	49.77	5.97
250	2.04	46.13	4.07	48.83	6.68

ตารางที่ ก-18 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณแกลบ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	7.79
75	6.66
106	6.83
180	6.13
250	7.17

ตารางที่ ก-19 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณแกลบ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	6.60
75	6.50
106	6.60
180	6.09
250	6.78

ตารางที่ ก-20 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณแกลบ 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	6.38
75	6.51
106	6.44
180	6.41
250	5.64

ตารางที่ ก-21 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณแกลบ 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (<math>\text{KJ/m}^2</math>)</b>
45	6.47
75	6.56
106	6.70
180	6.39
250	7.15

ตารางที่ ก-22 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณแกลบ 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (<math>\text{KJ/m}^2</math>)</b>
45	6.67
75	6.66
106	6.55
180	6.84
250	6.93

ตารางที่ ก-23 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	6.70
75	6.38
106	6.41
180	6.02
250	6.49

ตารางที่ ก-24 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	6.33
75	6.47
106	6.72
180	6.35
250	6.21

ตารางที่ ก-25 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	5.72
75	5.92
106	5.14
180	5.97
250	6.30

ตารางที่ ก-26 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	5.74
75	6.45
106	5.70
180	5.55
250	6.33

ตารางที่ ก-27 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/แกลบ  
ที่แกลบอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณแกลบ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	5.54
75	5.60
106	5.91
180	6.06
250	6.35

ตารางที่ ก-28 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	8.98
75	9.14
106	9.03
180	9.01
250	9.22

ตารางที่ ก-29 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	8.93
75	9.23
106	9.12
180	8.93
250	8.85

ตารางที่ ก-30 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	9.14
75	8.89
106	9.11
180	9.08
250	9.02

ตารางที่ ก-31 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
45	9.08
75	9.31
106	9.20
180	9.21
250	8.99

ตารางที่ ก-32 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอบอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
45	9.01
75	9.21
106	9.17
180	9.30
250	9.02



ตารางที่ ก-33 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถ้ำ  
 ถ้ำที่ถ้ำถ้ำอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณถ้ำถ้ำ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	6.55
75	6.92
106	6.55
180	6.96
250	7.20

ตารางที่ ก-34 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถ้ำ  
 ถ้ำที่ถ้ำถ้ำอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณถ้ำถ้ำ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	7.08
75	7.08
106	6.79
180	6.45
250	7.14

ตารางที่ ก-35 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถ้ำ  
 ถ้ำที่ถ้ำถ้ำอนุภาคนขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณถ้ำถ้ำ 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
45	6.01
75	7.30
106	7.17
180	6.81
250	7.32

ตารางที่ ก-36 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 60 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
45	6.82
75	6.66
106	6.80
180	6.79
250	7.00

ตารางที่ ก-37 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ถั่ว  
 ถั่วที่ถั่วถั่วอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณถั่วถั่ว 60 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (KJ/m<sup>2</sup>)</b>
45	6.80
75	6.33
106	6.77
180	7.01
250	6.74

ตารางที่ ก-38 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	11.14
106	11.37
180	11.61
250	12.08

ตารางที่ ก-39 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	11.48
106	11.72
180	12.26
250	12.19

ตารางที่ ก-40 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 20 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	11.90
106	11.11
180	11.74
250	12.69

ตารางที่ ก-41 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณไม้เต็งบ 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (<math>\text{KJ/m}^2</math>)</b>
75	11.66
106	11.53
180	11.71
250	13.11

ตารางที่ ก-42 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณไม้เต็ง 20 phr

<b>Particle sizes (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Impact strength (<math>\text{KJ/m}^2</math>)</b>
75	11.82
106	11.33
180	11.67
250	12.02

ตารางที่ ก-43 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.2%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	7.14
106	7.45
180	8.81
250	8.40

ตารางที่ ก-44 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.4%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	7.41
106	7.48
180	8.13
250	8.44

ตารางที่ ก-45 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.6%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	7.60
106	7.53
180	8.47
250	8.66

ตารางที่ ก-46 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 0.8%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	7.26
106	7.37
180	8.53
250	8.66

ตารางที่ ก-47 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติกPVC/ไม้เต็ง  
ที่ไม้เต็งอนุภาคขนาดต่างๆที่ความเข้มข้น 1.0%ที่ปริมาณ ไม้เต็ง 60 phr

Particle sizes ( $\mu\text{m}$ )	Impact strength ( $\text{KJ/m}^2$ )
75	7.72
106	7.25
180	8.44
250	8.34

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกนกวรรณ พนิชนาพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดมหาสารคาม เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสารคามพิทยาคม จังหวัด มหาสารคาม สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต

#### การเสนอผลงานทางวิชาการ

1. Effects of Coupling Agents on Wood Plastic Composites Prepared from Poly(vinyl chloride) and Rice Hulls K. Panitchanapan , N. Tonanon and S. Covavisaruch. Asian Poymer Association International Conference on Advance in Polymer Science and Technology, New Delhi India (2008)
2. The Influences of Aminosilane-Treated Rice hull Flour in Wood Plastic Composites Prepared from Poly(vinyl chloride) Kanokwan Panitchanapan , Nattaporn Tonanon and Sirijutaratana Covavisaruch. Pure and Applied Chemistry International Conference, Bangkok Thailand.(2008)





