

สมบัติกายภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้คอมพอสิต

นางสาวจุไรรัตน์ คงทัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาปีโตเรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICAL PROPERTIES OF POLY(VINYL CHLORIDE)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/WOOD  
FLOUR COMPOSITES

Miss Jurairat Kongthan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติกายภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิবিທີਲීନഴ်കുടി
	เนต/ผงไม้คอมพอสิต
โดย	นางสาวจุไรรัตน์ คงทัน
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมทิตธิสุทธิ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลภุชณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมทิตธิสุทธิ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์)

จุไรรัตน์ คงทัน : สมบัติกายภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้คอมพอสิต (PHYSICAL PROPERTIES OF POLY(VINYL CHLORIDE)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/WOOD FLOUR COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, 87 หน้า.

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงความเหนียวและการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและผงไม้ จากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความทนแรงกระแทก, การยืดตัว ณ จุดขาด และการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องด้วยพอลิเมอร์ผสมพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด สูงที่สุด จึงได้ถูกเลือกเพื่อนำไปเตรียมคอมพอสิตด้วยผงไม้ที่ปริมาณต่างๆ กัน (10, 20, 30 ส่วนต่อเรซินผสมร้อยละ) ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ายังสม่ำเสมอ, ความทนแรงดัดโค้ง, โมดูลัสดัดโค้ง, อุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อน, การดูดซึมน้ำ และการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณผงไม้ และยังพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ความทนแรงกระแทก, ความทนแรงดึง, การยืดตัว ณ จุดขาด และจุดอ่อนตัวไวแคตมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก จึงอาจสรุปได้ว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความเหนียวและการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ในขณะที่การใส่ผงไม้มีผลทำให้คอมพอสิตของพอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้มีความแข็งดึง, อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนและการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5671931923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLY(VINYL CHLORIDE) / POLY(BUTYLENE SUCCINATE) / WOOD FLOUR / MECHANICAL PROPERTIES / THERMAL PROPERTIES / BIODEGRADABLE PLASTICS

JURAIRAT KONGTHAN: PHYSICAL PROPERTIES OF POLY(VINYL CHLORIDE)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/WOOD FLOUR COMPOSITES.  
 ADVISOR: ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHAUYJULJIT, 87 pp.

This work aimed to improve the toughness and biodegradability of poly(vinyl chloride) (PVC) by incorporating poly(butylene succinate) (PBS) and wood flour (WF). The PVC/PBS blends showed a PBS dose-dependent increase in the impact strength, elongation at break and biodegradability compared to the PVC. According to the optimum impact strength and elongation at break, the 80/20 (w/w) PVC/PBS blend was selected for preparing composites with different loading of WF (10, 20 and 30 parts by weight per hundred of blend resin). The resulting PVC/PBS/WF composites showed a significant increase in the Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, heat deflection temperature, water uptake and biodegradability in a WF-dose-dependent manner, and a slight increase in glass transition temperature compared to the 80/20 (w/w) PVC/PBS blend. However, their impact strength, tensile strength, elongation at break and Vicat softening point were found to decrease compared to the 80/20 (w/w) PVC/PBS blend. It can be concluded that the PBS played an important role in both toughening and increasing the biodegradability of PVC/PBS blends, whereas the WF caused an increase in the stiffness, heat distortion temperature and also the biodegradability of the PVC/PBS/WF composites.

Field of Study: Petrochemistry and  
 Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ เงินทุน และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคคลผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังรายนามต่อไปนี้

1. อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำและแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการทำงานวิจัยได้อย่างถูกต้อง จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

2. ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ กรรมการภายนอก จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อวัสดุดิบ และอำนวยความสะดวกต่างๆในระหว่างงานวิจัย

3. ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรารุณี ตั้งพสุธาตล และรองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณ ญาติพี่น้อง รุ่นพี่ เพื่อน และน้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจ คำปรึกษา และการสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์ .....	3
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (poly(vinyl chloride), PVC) .....	3
2.1.1 การสังเคราะห์พีวีซี.....	4
2.1.1.1 การผลิตแบบแขวนลอย (suspension polymerization).....	4
2.1.1.2 การผลิตแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) .....	4
2.1.1.3 การผลิตแบบบัลค์ (bulk polymerization) .....	5
2.1.2 พีวีซีเรซิน (PVC resin).....	5
2.1.3 พีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound) .....	6
2.1.3.1 สารทำให้เสถียร (stabilizer).....	6
2.1.3.2 สารทำให้อ่อนตัว (plasticizer) .....	7
2.1.3.2.1 การเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ (choice of plasticizers).....	7
2.1.3.2.2 พลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ (types of plasticizers).....	7

2.1.3.2.3 พอลิเมอร์พลาสติกไฮเซออร์ (polymeric plasticizers) .....	8
2.1.3.3 สารตัวเติม (filler).....	8
2.1.3.3.1 ประเภทของสารตัวเติม .....	9
2.1.3.3.2 สมบัติของสารตัวเติม .....	9
2.1.3.4 สารช่วยในการขึ้นรูป (processing aid).....	9
2.1.3.5 สารหล่อลื่น (lubricant).....	9
2.1.3.6 สี (pigment) .....	10
2.2 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) .....	10
2.2.1 สมบัติของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ .....	10
2.2.1.1 พอลิเมอร์ประเภทที่มีส่วนผสมของแป้ง (polysaccharide).....	10
2.2.1.2 พอลิเมอร์ประเภทเอสเทอร์ (polyester) .....	11
2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหรือพีบีเอส (poly(butylene succinate),PBS).....	12
2.4 ผงไม้ (wood flour) .....	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 วัตถุประสงค์.....	17
3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ .....	18
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ .....	19
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง .....	20
3.5 การทดลอง.....	21
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม .....	21
3.5.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	22
3.5.3.การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength).....	23



3.5.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties).....	24
3.5.5.การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง (flexural properties) .....	25
3.5.6 การทดสอบสมบัติด้านความร้อนอุณหภูมิก่อตัวด้วยความร้อน (heat distortion property) .....	26
3.5.7 การทดสอบสมบัติด้านความร้อนหาอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening property) .....	27
3.5.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, DMA) .....	28
3.5.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM).....	29
3.5.10 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water uptake) .....	29
3.5.11 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน .....	30
3.5.12 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	32
4.1 ลักษณะขึ้นทดสอบ .....	32
4.2 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	33
4.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS.....	33
4.2.1.1 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก .....	33
4.2.1.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง .....	34
4.2.1.3 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง.....	35
4.2.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS .....	36
4.2.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS .....	37
4.2.4 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS .....	38
4.2.5 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS .....	39

4.2.6 การย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS .....	41
4.2.6.1 ความทนแรงกระแทก .....	41
4.2.6.2 สันฐานวิทยา .....	42
4.3 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	44
4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	44
4.3.1.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF .....	44
4.3.1.2 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF .....	45
4.3.1.3 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF .....	46
4.3.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF .....	47
4.3.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ คอมพอสิต PVC/PBS/WF .....	48
4.3.4 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	49
4.3.5 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	50
4.3.6 การย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่ อัตราส่วนต่างๆ .....	51
4.3.6.1 ความทนแรงกระแทก .....	51
4.3.6.2 สันฐานวิทยา .....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	55
รายการอ้างอิง .....	56
ภาคผนวก ก .....	61
ภาคผนวก ข .....	69
ภาคผนวก ค .....	72

ภาคผนวก ง..... 77

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 87



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

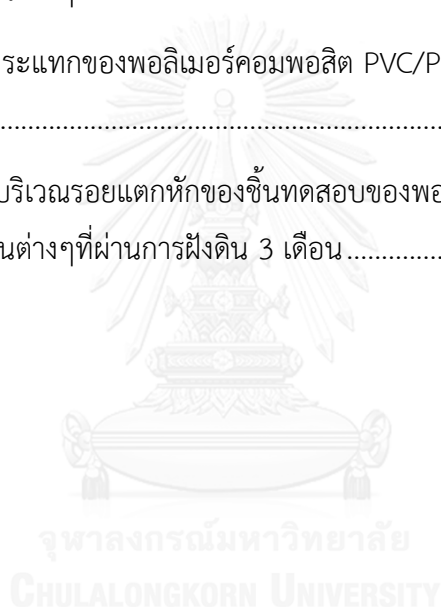
	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และสมบัติของผลิตภัณฑ์ .....	6
ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ .....	8
ตารางที่ 3.1 สมบัติของพีวีซี.....	17
ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิไวนิลิลีนซัคซิเนต เกรด FZ91PD.....	18
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของผงไม้ Lignocel เกรด C 120.....	18
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม .....	21
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	31
ตารางที่ 4.1 ค่า $T_g$ ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	37
ตารางที่ 4.2 การดูดซึมน้ำสูงสุดของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ ....	39
ตารางที่ 4.3 ค่า $T_g$ ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	48
ตารางที่ 4.4 การดูดซึมน้ำสูงสุดของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	49

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพีวีซี .....	3
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาสังเคราะห์พีวีซี.....	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์.....	12
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิไวนิลคลอไรด์ .....	12
รูปที่ 2.5 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์.....	13
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการทดลอง.....	20
รูปที่ 3.2 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	21
รูปที่ 3.3 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ .....	22
รูปที่ 3.4 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ .....	22
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดแบบ .....	23
รูปที่ 3.6 ขึ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก .....	23
รูปที่ 3.7 เครื่องมือทดสอบความทนแรงกระแทก.....	24
รูปที่ 3.8 ขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความทนแรงดึง .....	24
รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบความทนแรงดึง.....	25
รูปที่ 3.10 ขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง .....	25
รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบความทนแรงดัดโค้ง .....	26
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบ HDT.....	26
รูปที่ 3.13 หัวกดสำหรับการทดสอบ HDT .....	27
รูปที่ 3.14 หัวกดสำหรับการทดสอบ Vicat.....	27
รูปที่ 3.15 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต .....	28
รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	29

รูปที่ 3.17 ทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	30
รูปที่ 3.18 ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ .....	30
รูปที่ 4.1 ลักษณะขึ้นทดสอบ.....	32
รูปที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	33
รูปที่ 4.3 ความทนแรงดึง ,ยังส์มอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBSที่อัตราส่วนต่างๆ.....	34
รูปที่ 4.4 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสแรงดัดโค้ง ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	35
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อน และอุณหภูมิการอ่อนตัว ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.6 กราฟ tangent delta ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	38
รูปที่ 4.8 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของขึ้นทดสอบของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	40
รูปที่ 4.9 ความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.10 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของขึ้นทดสอบของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	43
รูปที่ 4.11 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	44
รูปที่ 4.12 ความทนแรงดึง,ยังส์มอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	45
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้ง ,มอดุลัสแรงดัดโค้ง ของพอลิเมอร์คอมพอสิตPVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	46

รูปที่ 4.14 อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน และอุณหภูมิการอ่อนตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47
รูปที่ 4.15 กราฟ tangent delta ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	48
รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	49
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของผงไม้.....	50
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของของขึ้นทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดิน 3 เดือน.....	52
รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของขึ้นทดสอบของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆที่ผ่านการฝังดิน 3 เดือน .....	53



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (poly(vinyl chloride, PVC)) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้งานมากเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน เนื่องด้วยสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง การต้านทานการติดไฟ ความทนทานต่อสารเคมี และสถานะแวดล้อม ความเป็นฉนวนไฟฟ้าและสามารถขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ ได้ง่าย อีกทั้งยังมีราคาถูก [1] โดยสามารถพบเห็นการใช้งานของพีวีซีได้ทั่วไปไม่ว่าจะเป็นการใช้งานภายในบ้าน อาคาร สำนักงาน และโรงงานอุตสาหกรรม ในรูปแบบต่างๆ เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า กีฬา บรรจุภัณฑ์ พิล์มงานก่อสร้าง และผลิตภัณฑ์หนังเทียม [2, 3] เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้งานพีวีซีจำเป็นต้องใส่สารเติมแต่ง (additives) ชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งในด้านการขึ้นรูปและการใช้งาน เนื่องจากพีวีซีมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ โดยจะแตกสลายได้ง่ายเมื่อขึ้นรูปด้วยความร้อน อีกทั้งมีสมบัติแข็งเปราะ ดังนั้น สารเติมแต่งที่นิยมนำมาใช้กับพีวีซี ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer) สารหล่อลื่น (lubricant) พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) และสารดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifier) เป็นต้น [4] โดยสารดัดแปรความทนแรงกระแทกส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอริกที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นแทนการใช้พลาสติไซเซอร์ เนื่องจากพลาสติไซเซอร์ทางการค้าส่วนใหญ่เป็นสารประกอบกลุ่มเอสเทอร์ฟทาเลต (ester phthalates) [5] ที่สามารถเคลื่อนขึ้นมาบนพื้นผิวของพีวีซีได้ง่าย จึงถูกชะล้างหรือแพร่เข้าสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างการใช้งาน [6, 7] เพราะเป็นสารประกอบอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีอันตรกิริยากับพีวีซีอย่างอ่อนๆ นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าพลาสติไซเซอร์กลุ่มนี้ไม่ได้ก่อให้เกิดความเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน แต่จะแสดงความเป็นพิษในลักษณะพิษเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิตโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, USEPA) และจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติ (National Cancer Institute) สหรัฐอเมริกา พบว่า พลาสติไซเซอร์กลุ่มนี้ยังมีผลต่อการทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง [8, 9]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate)) เป็นเทอร์โมพลาสติกในปัจจุบันที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นพลาสติกชีวภาพ ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ [10] อีกทั้งยังมีความสามารถที่ทำหน้าที่เป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทกหรือพอลิเมอริกพลาสติไซเซอร์แทนพลาสติไซเซอร์ทางการค้าได้ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง ( $T_g$  ต่ำระหว่าง  $-45$  ถึง  $-10$  องศาเซลเซียส) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการเดียวกับพอลิโอเลฟินส์ทั่วไป อีกทั้งยังมีความเข้ากันได้กับพีวีซี



งานวิจัยนี้มีแนวความคิดที่จะเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตโดยมีพีวีซีเป็นเมทริกซ์หลัก ทำการทดลองเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีวีซีและพอลิบิวทิลีน ซักซิเนต โดยให้พอลิบิวทิลีนซักซิเนต ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับพีวีซีในอัตราส่วนต่างๆ จากนั้นเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนที่สอง ด้วยสารตัวเติม (filler) โดยเลือกใช้ผงไม้ (wood flour) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (cellulose) และอนุภาคมีลักษณะเป็นเส้นใย เนื่องจากผงไม้มีราคาถูกและเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่หาได้ง่าย[11] ซึ่งนอกจากช่วยปรับปรุงสมบัติ ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผงไม้ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จึงมีการใช้งานกว้างขึ้นและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เตรียมพอลิเมอร์ผสมของพีวีซี/พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิเมอร์คอมพอสิตของพีวีซี/พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ผงไม้

1.2.2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติความร้อน การย่อยสลายทางชีวภาพ และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้

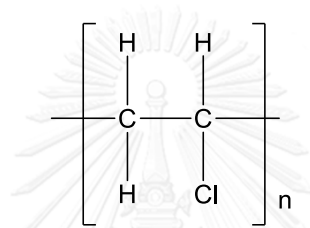
## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พีวีซีคอมพอสิตที่มีสมบัติเชิงกลเหมาะสำหรับทำเป็นผลิตภัณฑ์ไม้เทียมที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้บางส่วน

## บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

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

พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (poly(vinyl chloride), PVC) เป็นพลาสติกที่มีการผลิตอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในด้านก่อสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า ของใช้ในบ้าน งานบรรจุภัณฑ์ งานทำหนังเทียมและงานด้านเกษตรกรรม เป็นต้น [12] พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติก โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.1

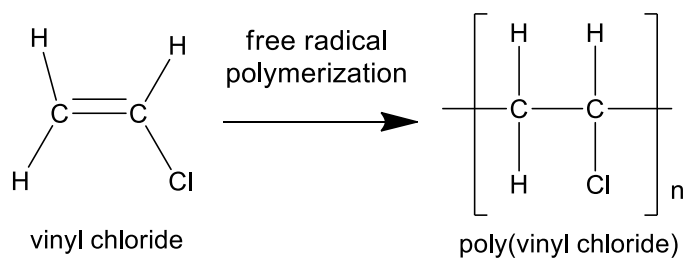


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพีวีซี

พีวีซีเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากก๊าซธรรมชาติและเกลือ โดยก๊าซเอทิลีนทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่ได้จากเกลือโซเดียมคลอไรด์ ได้เป็นเอทิลีนไดคลอไรด์ (ethylene dichloride, EDC) แล้วเปลี่ยนต่อไปเป็นไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (vinyl chloride monomer, VCM) และเมื่อนำ VCM ไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะได้ผงพีวีซีที่บริสุทธิ์ [13] ซึ่งแสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์พีวีซีในรูปที่ 2.2

พีวีซีที่ยังไม่ได้ใส่สารเติมแต่งใดๆ มีสมบัติดังนี้

- แข็ง เปราะ แตกง่าย เป็นพลาสติกอสังฐาน
- ไม่มีสี และใส
- ความหนาแน่นประมาณ  $1.4 \text{ g/cm}^3$
- มี  $T_g = 87$  องศาเซลเซียส และ  $T_m = 212$  องศาเซลเซียส
- เมื่อติดไฟสามารถดับไฟด้วยตัวเอง
- สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนและแสง จึงต้องใส่สารเพิ่มเสถียรภาพ



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาสังเคราะห์พีวีซี

### 2.1.1 การสังเคราะห์พีวีซี

พีวีซีสังเคราะห์ได้จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี โดยอาศัยกลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (free radical polymerization) การสังเคราะห์สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการผลิตแบบแขวนลอย (suspension polymerization) กระบวนการผลิตแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) และกระบวนการผลิตแบบบัลค์ (bulk polymerization) [14, 15]

#### 2.1.1.1 การผลิตแบบแขวนลอย (suspension polymerization)

พีวีซีส่วนใหญ่ถูกผลิตด้วยกระบวนการนี้ และพีวีซีที่ได้มีความเหมาะสมกับการใช้งานทั่วไป (general propose) ในระบบของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (VCM) ที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble monomer)
- สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ละลายในมอนอเมอร์ (oil-soluble initiator)
- สารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) พร้อมการกวนอย่างรวดเร็วจะทำให้มอนอเมอร์กระจายเป็นหยดเล็กๆและป้องกันการรวมตัวของมอนอเมอร์

ปฏิกิริยาเกิดโดยนำไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์และน้ำส่งเข้าไปยังเตาปฏิกรณ์ที่รักษาความดันไว้ที่ประมาณ 15 บรรยากาศ โดยทำการกวนที่อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส โดยมอนอเมอร์จะเกิดเป็นหยดเล็กๆ ในน้ำมีขนาด 30-130 ไมโครเมตร และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ได้มีลักษณะเป็นสารเนื้อผสม (slurry) ที่มีอนุภาคของพีวีซีแขวนลอยในน้ำ และตกตะกอนแยกตัวออกมาอย่างรวดเร็วหากไม่มีการกวน น้ำถูกกำจัดออกโดยด้วยวิธีการกรอง

#### 2.1.1.2 การผลิตแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization)

เหมาะกับงานเคลือบ เช่น การทำหนังเทียม ในระบบของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (VCM)
- สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำ (water-soluble initiator)
- อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) เป็นสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโครงสร้างมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันจะใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ทำให้เกิดสารชั้นๆ ภายในเตาปฏิกรณ์ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้เลเทกซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ของพิวซีกระจายในน้ำเรียกว่า อนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) โดยมีขนาดอนุภาค 0.2-5.0 ไมโครเมตร เมื่อนำไปอบแห้งแล้วจะได้ผงที่มีลักษณะคล้ายแป้งเนื้อละเอียด

### 2.1.1.3 การผลิตแบบบัลค์ (bulk polymerization)

เป็นวิธีง่ายๆ ผลผลิตที่ได้ให้ความบริสุทธิ์สูง ตอนเริ่มต้นจะมีเพียงมอนอเมอร์และสารเริ่มปฏิกิริยาเท่านั้น แต่มีข้อเสียที่ควบคุมอุณหภูมิปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ยาก ซึ่งเมื่อเกิดพอลิเมอร์มากขึ้นทำให้ความหนืดสูง เป็นผลทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังควบคุมขนาดของพิวซีได้ยากและกำจัด VCM ที่ตกค้างในระบบได้ยาก

### 2.1.2 พิวซีเรซิน (PVC resin)[16]

มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ซึ่งสามารถแบ่งเกรดพิวซีเรซิน ตามความหนืดเมื่อละลายในตัวทำละลาย ซึ่งโดยมากใช้ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) แล้ววัดความหนืด โดยมีมาตรฐานกำหนดค่าแทนความหนืด เรียกว่า “K value” ซึ่งเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย แต่มีตารางเปรียบเทียบค่า K-value กับความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) และสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$(\text{Log } \eta)/C = 75 K^2/(1+1.5KC)+K$$

โดย  $\eta$  = ความหนืดสัมพัทธ์







C = ความเข้มข้นของสารละลาย

ค่า K เป็นค่าที่ชี้ให้เห็นถึงน้ำหนักโมเลกุล โดยถ้าพิวซี เรซินมีค่า K สูง แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในทางกลับกันหากค่า K ต่ำ แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ค่า K ยังแสดงถึงอุณหภูมิที่จะใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วย กล่าวคือ ถ้ามีค่า K สูงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และค่า K ยังบอกถึงความแข็งและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ด้วย ถ้ามีค่า K สูง ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงและความแข็ง แต่หากมีค่า K ต่ำ ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงต่ำและความนิ่มมากกว่า ซึ่งการแบ่งพิวซีเรซินตามค่า K จะเป็นดังนี้

พีวีซีเรซินที่มีค่า K ต่ำ	คือ ต่ำกว่า 60
พีวีซีเรซินที่มีค่า K ปานกลาง	คือ 60-70
พีวีซีที่มีค่า K สูง	คือ ตั้งแต่ 70 ขึ้นไป

ในการขึ้นรูปพีวีซีนั้น ค่า K มีความสำคัญ เพราะถ้าผลิตภัณฑ์เป็นพีวีซีชนิดแข็ง (rigid PVC) จะเลือกใช้พีวีซีที่มีค่า K 59-60 เพราะต้องการค่า K สูงพอที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง แต่ถ้าค่า K สูงมากกว่านี้จะขึ้นรูปไม่ได้ เพราะพีวีซีชนิดแข็งจะไม่มีสารใส่พลาสติกไซเซอร์ลงไป หรือถ้าใส่ก็จะน้อยมาก ซึ่งทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูง และทำให้มีแรงเฉือนเกิดขึ้นมาก ซึ่งทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัว (decomposition) เสียก่อน ส่วนพีวีซียืดหยุ่น (flexible PVC) มีการใช้พีวีซีที่มีค่า K แตกต่างกันไปอีก ทั้งนี้ขึ้นกับการนำไปใช้งานของพีวีซีเรซิน

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และสมบัติของผลิตภัณฑ์ [4]

คุณสมบัติ	Low K  High K
รูพรุน (Porous)	
ความแข็งแรง (Strength), การยืดตัว (Elongation)	
ความเหนียว (Stiffness)	
อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป (Melt Temperature)	
ความใส (Clarity)	

### 2.1.3 พีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound)

เนื่องจากพีวีซีมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรงได้เนื่องจากไม่ทนความร้อน ดังนั้น จึงต้องมีการผสมสารเติมแต่งบางชนิดลงไป เพื่อให้ขึ้นรูปได้และมีสมบัติตามที่ต้องการ โดยเรียกพีวีซีที่ผสมสารเติมแต่งแล้วว่า “พีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound)” [17] สารเติมแต่งที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้แก่

**2.1.3.1 สารทำให้เสถียร (stabilizer)** มีหน้าที่ยับยั้งการเกิดการเสื่อมสลายของพีวีซีเมื่อได้รับความร้อนหรือพลังงานแสง ช่วยให้พีวีซีคงทนต่อความร้อน ป้องกันการสลายตัว สมบัติที่ดีของสารทำให้เสถียรที่สำคัญ คือ ควรเข้ากันได้ดีกับพีวีซีและสารประกอบอื่น ไม่เป็นสารอันตราย และไม่ส่งผลต่อการผลิต สารทำให้เสถียรที่นิยมใช้งาน เช่น สารทำให้เสถียรที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมและสังกะสี (Ca/Zn stabilizer), สารทำให้เสถียรที่มีองค์ประกอบของดีบุก (Tin stabilizer) เป็นต้น [18]

### 2.1.3.2 สารทำให้อ่อนตัว (plasticizer) พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็งเปราะ

ไม่อ่อนตัว และแตกง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจึงทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัวเสียก่อน กระบวนการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า พลาสติไซเซชัน (plasticization) และสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่า พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ซึ่งพลาสติไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอได้ (flexibility) และความสามารถในการยืดออก (extensibility or stretchability) ของพอลิเมอร์ โดยการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ พลาสติไซเซอร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (plastic flow) และลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว (polymer's melt viscosity) ทำให้กระบวนการขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น [19, 20]

#### 2.1.3.2.1 การเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ (choice of plasticizers)

เนื่องจากการขึ้นรูปและสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณพลาสติไซเซอร์ ดังนั้น ในการเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ให้เหมาะสม จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่อไปนี้

- ราคา
- ลักษณะเฉพาะในการขึ้นรูป (processing characteristics)
- สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล
- ความทนทานต่อน้ำ เคมีภัณฑ์ สภาพอากาศ ฝุ่น และ จุลินทรีย์
- ความเป็นพิษ
- ผลต่อสมบัติทางวิทยากระแส (rheological properties)
- วิธีการขึ้นรูป
- สมบัติที่ต้องการของผลิตภัณฑ์

#### 2.1.3.2.2 พลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆ (types of plasticizers)

ถ้าแบ่งพลาสติไซเซอร์ตามโครงสร้างทางเคมี จะแบ่งได้ดังนี้คือ

- ฟทาเลตเอสเทอร์ (phthalate esters)
- ไตรเมลลิตเตเอสเทอร์ (trimellitate esters)
- อะลิฟาติกไดคาร์บอกซิลิก แอซิดเอสเทอร์ (aliphatic dicarboxylic acid esters)
- ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters)

- โพลีเอสเทอร์หรือโพลีเอสเตอร์พลาสติกไซเซอร์ (polymeric plasticizers)
- พลาสติกไซเซอร์อื่นๆ (other plasticizers)

### 2.1.3.2.3 โพลีเอสเตอร์พลาสติกไซเซอร์ (polymeric plasticizers)

โพลีเอสเตอร์หรือโพลีเอสเตอร์พลาสติกไซเซอร์ (polyester plasticizers) ทางการค้าที่ใช้กันส่วนใหญ่คือ โพลีเอสเตอร์อิมิตัวซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดออลและกรดไตรคาร์บอกซิลิก โพลีเอสเตอร์พลาสติกไซเซอร์ละลายได้ยากจึงทำให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ยากกว่าการใช้มอนอเมอร์พลาสติกไซเซอร์ อย่างไรก็ตาม โพลีเอสเตอร์พลาสติกไซเซอร์จะมีความคงตัวสูง อยู่กับโพลีเมอร์ได้ดีกว่า มีความต้านทานต่อการถูกสกัดออกด้วยน้ำมัน ไขมัน และตัวทำละลายอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนได้สูงกว่าและไม่เกิดการเคลื่อนย้าย ข้อดีของพลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้คือ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าและทำให้สมบัติต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำด้อยกว่า ดังนั้นการใช้งานส่วนใหญ่ของโพลีเอสเตอร์พลาสติกไซเซอร์ จึงใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความต้านทานสูงต่อการถูกสกัดออกด้วยน้ำมัน ไขมันและอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ท่อน้ำมันเชื้อเพลิง ฉนวนเคเบิลท่อน้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ ยังใช้ในผ้าคลุมพลาสติก ผ้าปูพลาสติกในห้องน้ำ กางเกงพลาสติกสำหรับทารก ฉนวนเคเบิลทนความร้อน เทปกั้นไฟดูด ปะเก็นตู้เย็น และฟิล์ม

### 2.1.3.3 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นของแข็งที่ใช้ใส่ในโพลีเมอร์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของโพลีเมอร์ สารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์

#### ตารางที่ 2. 2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในโพลีเมอร์

สารตัวเติมอนินทรีย์ (inorganic fillers)	สารตัวเติมอินทรีย์ (organic fillers)
แคลเซียมคาร์บอเนต(calcium carbonate)	ผงไม้ (wood flour)
ไมกา(mica)	เยื่อไม้(wood pulp)
ทัลค์(talc)	แป้ง (starch)
วอลลาสโทไนต์(wollastonite)	
ซิลิกา (silica)	
ซิงก์ออกไซด์ (zinc oxide)	

### 2.1.3.3.1 ประเภทของสารตัวเติม:

สารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

- **สารตัวเติมประเภทเพิ่มเนื้อ (extender)** เป็นสารตัวเติมที่ใช้เพื่อเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตาม การใส่สารตัวเติมประเภทนี้ก็ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทนี้ได้แก่ หินปูน (limestone) ทัลค์ เคาลิน ผงไม้ เป็นต้น

### - สารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler)

เป็นสารตัวเติมซึ่งใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ เช่น สมบัติความทนแรงดึง ยั่งสัมมอดูลัส การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้ง สารตัวเติมประเภทนี้ได้แก่ ซิลิกา และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminum hydroxide) เป็นต้น

### 2.1.3.3.2 สมบัติของสารตัวเติม

สารตัวเติมที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- สะอาด ปราศจากสารเจือปน ความชื้นและไม่เป็นพิษ
- หนืด ไม่ละลายและมีเสถียรภาพทางความร้อน
- ดูดซึมความชื้นและสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ ต่ำ
- ทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
- ทั้งโครงสร้างและสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป
- มีการกระจายของขนาดของอนุภาคที่สม่ำเสมอ
- ไม่ขัดสีเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป
- ไม่ทำให้สีและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เสียไป

### 2.1.3.4 สารช่วยในการขึ้นรูป (processing aid)

เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการไหล (melt strength) ของพีวีซีที่หลอม ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และช่วยให้ผิวชิ้นงานสวยงาม ตัวอย่างของการช่วยในการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันเช่น พอลิเมอร์อะคริลิก (acrylic polymer) เป็นต้น [4]

### 2.1.3.5 สารหล่อลื่น (lubricant)

เป็นสารที่ช่วยหล่อลื่นในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พีวีซี ทำให้พีวีซีสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีผิวเรียบสารหล่อลื่นสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

- สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant) ช่วยลดความเสียดทานและการ



เกาะติดระหว่างพีวีซีที่หลอมเหลวกับส่วนของเครื่องจักรที่เป็นโลหะร้อน เช่น เกลียวรีด (screw), กระจบอบบาร์เรล (barrel), โม่ (mold) ตัวอย่างสารหล่อลื่น เช่น ไชพาราฟิน (paraffin waxes) เป็นต้น

- สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant) ช่วยลดความเสียดทานระหว่างอนุภาคของพีวีซีด้วยกันเองในระหว่างการหลอมตัว ตัวอย่างของสารหล่อลื่น เช่น กลีเซอรอล มอนอสเตียเรท (glycerol mono stearate (GMS)) เป็นต้น [21]

### 2.1.3.6 สี (pigment)

ใช้เพื่อเพิ่มความสวยงามของผลิตภัณฑ์ การใช้สีในพีวีซีทำได้ 2 วิธี คือ การใช้โดยตรงหรือการทำให้เป็นแม่สีเข้มข้น (master batch) สมบัติของสีที่ดี ควรมีความคงทนต่อความร้อนและแสง ทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี ด้านทานการเกิดการย้าย (migration) ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในสูตร และมีการกระจายตัวที่ดี ตัวอย่างสีที่ใช้ในงาน เช่น สีขาวเป็นสารไทเทเนียม ไดออกไซด์ (titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ )) [4]

โดยในงานวิจัยนี้ มีการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์พลาสติกไฮเซอร์ และผงไม้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ให้กับพีวีซี

## 2.2 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นพลาสติกที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น น้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช โดยวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นขยะ และอยู่ในภาวะที่เหมาะสมคือมีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งในระหว่างการใช้งาน พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจะไม่เกิดการย่อยสลายจนกว่าจะทิ้งเป็นขยะที่ถูกฝังกลบและมีสภาวะที่เหมาะสมคือมีแบคทีเรียและเอนไซม์ [22]

### 2.2.1 สมบัติของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่มีการศึกษาวิจัยและนำมาผลิตเพื่อใช้ประโยชน์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ

#### 2.2.1.1 พอลิเมอร์ประเภทที่มีส่วนผสมของแป้ง (polysaccharide)

เกิดจากการผสมพอลิเมอร์บางชนิดเข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งที่เกิดจากการ

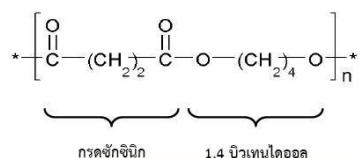
เรียงต่อกันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส (glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic) โดยใช้อัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10-90 % ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งาน หากส่วนผสมของแป้งมากกว่า 60 % จะทำให้พลาสติกผสมสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และเมื่อส่วนผสมของแป้งต่ำกว่า 60% ส่วนผสมที่เป็นแป้งจะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นทำให้เกิดการแตกตัวของชิ้นส่วนพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาดเล็กลง

**2.2.1.2 พอลิเมอร์ประเภทเอสเทอร์ (polyester)** จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์อยู่ในสายโซ่จำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้ความแข็งแรงน้อย สามารถแตกตัวได้ง่ายโดยทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) ดังนั้นจึงสามารถย่อยสลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้ พอลิเอสเทอร์ยังสามารถจำแนกตามส่วนประกอบของสายโซ่เป็น 2 ประเภท คือ อะลิฟาติก พอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) และ อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (aromatic polyester) ในปัจจุบันมีการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ประเภทอะลิฟาติก พอลิเอสเทอร์ เพราะสายโซ่มีความเหมาะสมต่อการสลายพันธะดีกว่า ในส่วนของอะโรมาติก พอลิเอสเทอร์ จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมขึ้น โดยอาจต่อสายโซ่กับอะลิฟาติก พอลิเอสเทอร์ ให้เป็นโคพอลิเมอร์ (aliphatic-aromatic copolyester) ก่อนจึงจะสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งสามารถใช้ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET), เป็นส่วนประกอบหลักได้

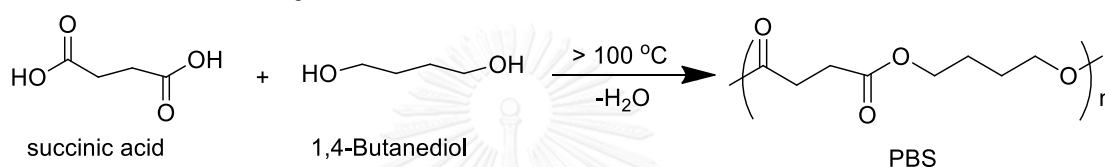
อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 4 ตระกูลใหญ่ๆ คือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate), พอลิไฮดรอกซี แอลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, (PHA)) พอลิคาโพรแลกโตน (polycaprolactone, (PCL)), และพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, (PLA)) ซึ่งพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนตและพอลิคาโพรแลกโตนต้องใช้ออนอเมอร์จากปิโตรเคมี ส่วนพอลิแล็กติกแอซิด สามารถใช้วัตถุดิบที่ทดแทนได้แต่ยังต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สายโซ่ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ขณะที่ พอลิไฮดรอกซี แอลคาโนเอต เป็นพอลิเมอร์ตระกูลเดียวที่กระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดเกิดขึ้นในจุลินทรีย์ โดยปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้ทางการค้าและมีการผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดบ้างแล้ว

### 2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหรือพีบีเอส (poly(butylene succinate),PBS)

เป็นพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาควบแน่นของกรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butane diol) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.4

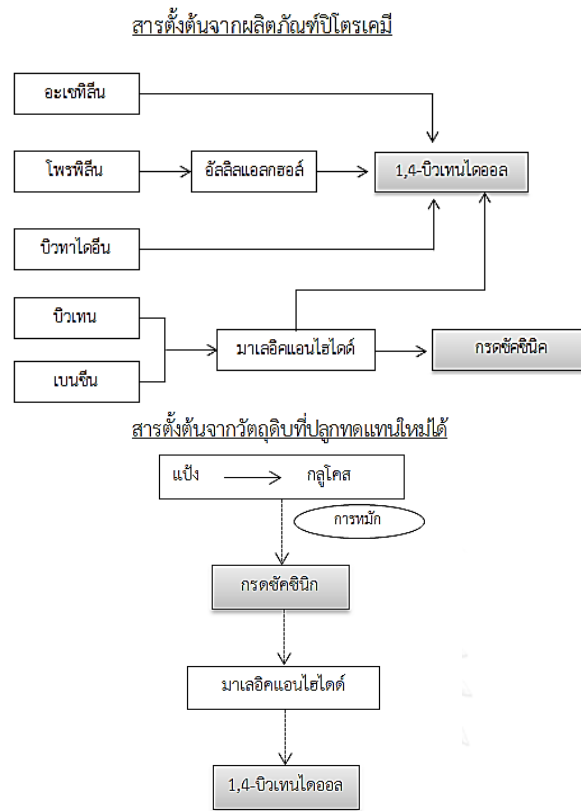


รูปที่ 2.3 โครงสร้างเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

โดยกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออลเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี โดยเริ่มจาก ก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลต่อไป อย่างไรก็ตาม กรดซัคซินิกยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ จากกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก และสามารถเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1,4-บิวเทนไดออล โดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากนั้นมอนอเมอร์ทั้งสองคือกรดซัคซินิก และ 1,4 บิวเทนไดออล จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [22]



**รูปที่ 2.5** แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

-สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเทอร์โมพลาสติกสีขาว มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียง พอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิดและมี  $T_g$  ที่ต่ำมาก โดยทั่วไปแล้วพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลสูง และทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ อีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วย นอกจากนี้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังสามารถนำมาผสมกับแป้งเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ แต่สมบัติดังกล่าวยังต่ำกว่าพอลิเอสเทอร์

-การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต การย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยน้ำ (hydro-biodegradable) เริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง และสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต่อไป

-การนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต สามารถนำไปใช้แทนที่ พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) และพอลิเอทิลีนส์ได้ โดยเฉพาะพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE), พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density

polyethylene, HDPE), พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) และ พอลิแล็กติกแอซิด นอกจากนี้พอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆเช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง พลาสติกบรรจุภัณฑ์อาหาร ขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์อนามัย เบาะโฟม และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่นๆ พลาสติกคลุมดินสำหรับการเกษตร กระถางต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืชหรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในรถยนต์

## 2.4 ผงไม้ (wood flour)

ผงไม้เป็นเส้นใยที่ได้มาจากธรรมชาติ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยผงไม้มีลักษณะเหมือนแป้ง ผงไม้ได้จากการนำขี้เลื่อย เศษไม้หรือไม้แผ่นบางๆ มาบดให้เป็นผง โดยทั่วไปผงไม้ที่นำมาใช้งานเป็นสารตัวเติมในพลาสติกมีอนุภาคเท่ากับ 40-80 ไมครอน ผงไม้เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่ใช้ในเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมพอสิตอย่างแพร่หลายทั้งในเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต

สำหรับการนำผงไม้มาใช้เป็นสารตัวเติมในเทอร์โมพลาสติกจะช่วยทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป โดยไม่ทำให้เครื่องจักรสึกหรอเนื่องจากอนุภาคของผงไม้มีความแข็ง (hardness) ต่ำกว่าอนุภาคของสารอินทรีย์ [23]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ibrahim และคณะ [24] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีวีซีและพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบหลอมเหลวเพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่นของพีวีซี พบว่าพีวีซีและ PBAT สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (miscible blend) โดยจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) พบตำแหน่งของพีกที่แสดงถึงการมีอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ของ PBAT กับแอลฟา-ไฮโดรเจน ( $\alpha$ -hydrogen) ของพีวีซี นอกจากนี้ยังตรวจพบ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมเพียงตำแหน่งเดียว และจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นการยึดเกาะระหว่างผิว (interfacial adhesion) ที่ดีระหว่างพีวีซี และ PBAT

Kim และคณะ [25] ได้เตรียมคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยผงไม้และแคลบ โดยศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ พบว่าการเติมผงไม้ในพีวีซีทำให้มีสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength) ดีกว่าการเติมแคลบ เนื่องจากผงไม้

มีไฮโดรเซลลูโลส (holocellulose) และลิกนิน (lignin) เป็นองค์ประกอบที่พบในผงไม้ได้มากกว่า ซึ่งช่วยส่งเสริมความแข็งแรงให้กับผงไม้ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงไม้และแกลบที่ใส่เข้าไป พบว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้มีสมบัติความทนแรงดึงสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้จากการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน พบว่า เมื่อเติมผงไม้และแกลบเข้าไปได้ช่วยให้เกิดการย่อยสลายเร็วขึ้น ซึ่งวัดได้จากน้ำหนักที่หายไปอย่างไร้ที่ติตาม การเติมผงไม้และแกลบในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตส่งผลให้มีสมบัติด้านความทนแรงดึงลดลง เนื่องจากการไม่มีแรงยึดติดระหว่างผิวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับผงไม้และแกลบ

Sombatsompop และคณะ [26] ได้เตรียมคอมพอสิตของพีวีซีจากผงไม้ และศึกษาปริมาณผงไม้ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ พบว่าการใส่ผงไม้เข้าไปในพีวีซีส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดลง เนื่องจากการมีความชื้นภายในผงไม้ที่ทำให้พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ระหว่างผงไม้ลดลง จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดลง และจากหลักฐานวิทยภาพพบว่า ผงไม้ไม่สามารถกระจายตัวในพีวีซีเมทริกซ์ได้ดี ซึ่งเป็นเหตุผลสนับสนุนการลดลงของสมบัติทางเชิงกลและสมบัติทางความร้อน อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติมผงไม้ปริมาณมากกว่าร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใส่ผงไม้เข้าไปทดแทนพีวีซีเพื่อลดต้นทุน และทางคณะวิจัยได้เสนอแนะให้ทำการเตรียมผงไม้ที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 5 ซึ่งอาจช่วยปรับปรุงให้มีสมบัติดีขึ้น

Chuayjulit และคณะ [27] ทำการเตรียมคอมพอสิตของพีวีซีด้วยโวลลาสโทไนต์ (wollastonite) โดยใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์พลาสติกไฮเซอรร่วมกับไดไอโซโนนิลฟทาเลต (diisononyl phthalate) ซึ่งเป็นพลาสติกไฮเซอรทางการค้า และทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ พบว่าการผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในพีวีซีในอัตราส่วนเพิ่มมากขึ้นส่งผลสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง, ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และความทนแรงฉีกขาด (tear strength) และเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และสามารถเกิดการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพีวีซีได้ และเมื่อทำการเติมโวลลาสโทไนต์ พบว่า ยั่งส์มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มีความแข็งตึง (stiffness) สูง และมีลักษณะคล้ายเข็ม (needle-like) จึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนไหวของพีวีซีและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หากแต่ความทนแรงดึงมีค่าลดลงเนื่องจากการไม่มีอันตรกิริยาระหว่างโวลลาสโทไนต์และเมทริกซ์ นอกจากนี้โวลลาสโทไนต์ยังเกาะเป็นกลุ่มก้อน (agglomeration) เมื่อใส่ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม การเติมโวลลาสโทไนต์ยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนให้กับคอมพอสิต

Rimdusit และคณะ [28] ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพีวีซีด้วยอะครีโลไนไทรล์ บิวตะไดอีน สไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) และผงไม้ โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีวีซี กับ ABS ให้ค่าความทนแรงกระแทกที่สูงขึ้น เนื่องจาก ABS เป็นเทอร์พอลิเมอร์ที่มีส่วนของบิวตะไดอีน ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ผสมได้ และจากสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า พีวีซี มีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำ แต่เมื่อเติม ABS ลงในพอลิเมอร์ผสมพบว่าอัตราการดูดซึมน้ำ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ABS มีหมู่อะครีโลไนไทรล์ที่มีความเป็นขั้วจึงดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเสริมสภาพของความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับผงไม้ได้ด้วย และเมื่อทำการเติมผงไม้ ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกลดลงเนื่องจากการเติมผงไม้ลงไป เนื่องจากการลดการยืด (ductile portion) และแรงยึดระหว่างพันธะของพอลิเมอร์และผงไม้ และจากสมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิตพบว่า เมื่อเติมผงไม้ลงไปพบว่าอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผงไม้มีส่วนประกอบของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่มีความชอบน้ำ (hydrophobicity) จึงเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำให้แก่คอมพอสิต

Lindström และคณะ [29] ทำการศึกษานำพอลิบิวทีลีน อะดิเพต (polybutylene adipate, PBA) มาทำหน้าที่เป็น พอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร์ให้กับพีวีซี โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และความเข้ากันได้ ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า PBA สามารถปรับปรุงการยืด ณ จุดขาด ให้กับพีวีซี เนื่องจาก PBA สามารถเข้าไปเพิ่มปริมาตรอิสระ (free volume) ให้กับพีวีซี จึงช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้มีการยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น ในการศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างพีวีซีและ PBA ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าพีวีซีและ PBA เข้ากันได้แบบบางส่วน (partial-miscible) โดยสังเกตจากการขยับของตำแหน่งของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ซึ่งบอกรับอันตรกิริยาระหว่างพีวีซีและ PBA

**บทที่ 3**  
**วิธีดำเนินงานวิจัย**

**3.1 วัตถุดิบ**

1. ผงเรซินพีวีซี (K value = 58) ของบริษัท Thai plastic and chemicals Co.,Ltd. แสดงสมบัติในตารางที่ 3.1
2. เม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate,PBS) เกรด FZ91PD ของบริษัท Mitsubishi Chemical Performance Polymers,Inc.GS Pla<sup>®</sup> แสดงสมบัติในตารางที่ 3.2
3. ผงไม้สน (wood flour, WF) เกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 100 – 120 เมช ความหนาแน่น 100 – 135 กรัม/ลิตร ของบริษัท J.Rettenmaier & Sohne Co. แสดงสมบัติในตารางที่ 3.3
4. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer (BTY-4))
5. สารช่วยในการขึ้นรูป (Kane ace PA 20)
6. สารหล่อลื่นภายนอก (stearic acid)
7. สารหล่อลื่นภายใน (calcium stearate)

**ตารางที่ 3.1** สมบัติของพีวีซี K value 58

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย	พีวีซี (K value=58)
K value	DIN 353726	-	58.0
apparent density	ISO 60	g/ml	0.56
impurities and foreign matter	ISO 1265	pt/100 squ	1
volatile matter	ISO 1269	%	0.1
retained on 250 micron	ASTM D 1921	%	0.1
retained on 75 micron	ASTM D 1921	%	94.7



ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกรด FZ91PD

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (FZ91PD)
density	JIS K7112	g/cm <sup>3</sup>	1.26
melt flow index	JIS K7210	g/10 min	4.5
Young's modulus	JIS K7203	MPa	650
tensile stress	JIS K6781	MPa	40
elongation at break	JIS K6781	%	250
impact strength	JIS K7110	kJ/m <sup>2</sup>	9

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของผงไม้ Lignocel เกรด C 120

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
Cellulose	41.000
Hemicellulose	27.50
Lignin	28.10
Extractive	3.40

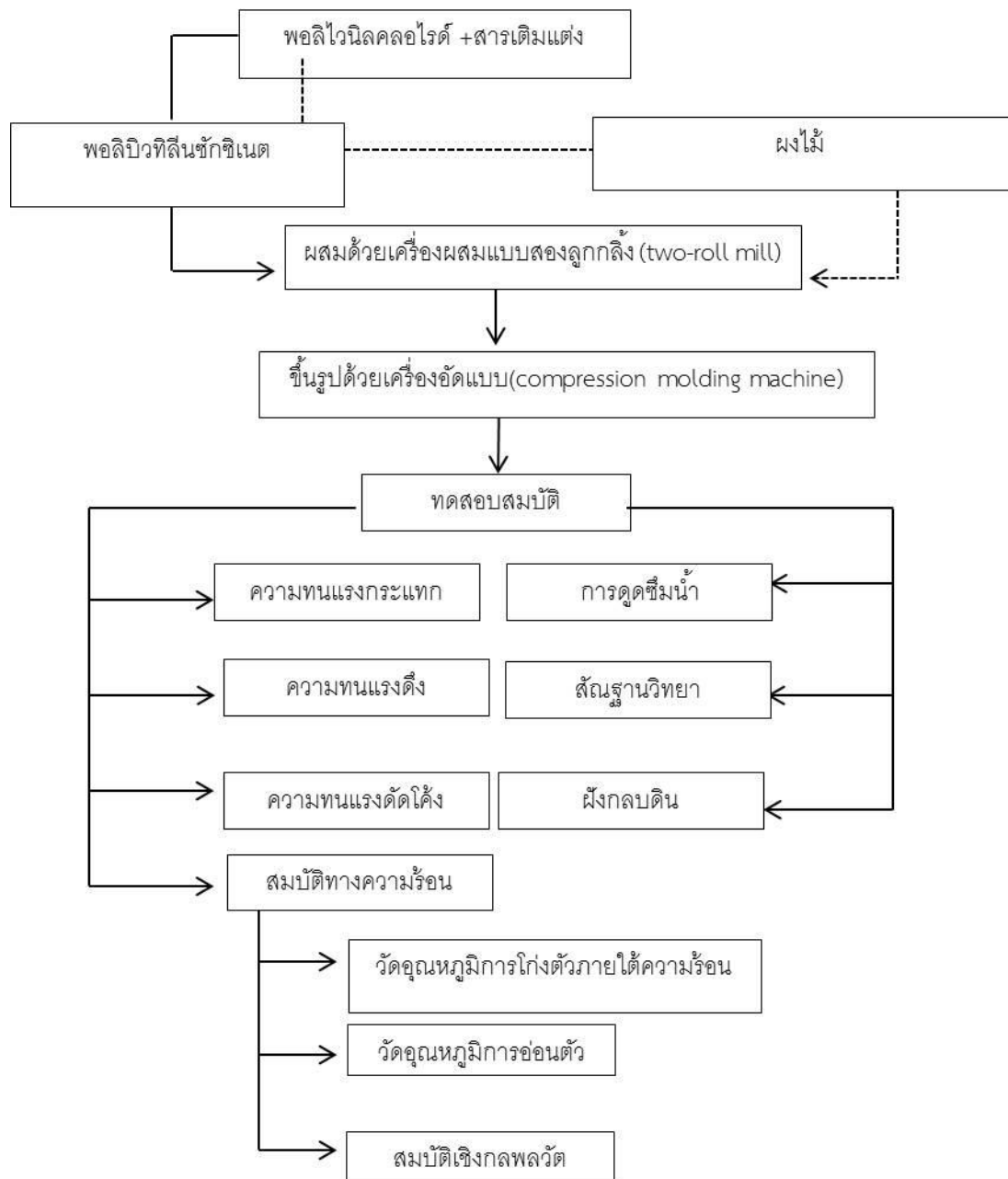
### 3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

1. เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) รุ่น LRM-S-110 ของบริษัท Labtech Engineering (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องอัดแบบขึ้นงาน (compression molding machine) รุ่น LP-S-50 ของบริษัท Labtech Engineering (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

### 3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น GT-7045-MD ของบริษัท GOTECH (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น LLOYD LR100 K (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine) รุ่น LLOYD 500 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องวัดอุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อน (heat distortion machine) รุ่น HDT-Vicat auto ของบริษัท Ceast (สถาบันยานยนต์)
5. เครื่องวัดอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening machine) รุ่น HDT-Vicat ของ Ceast (สถาบันยานยนต์)
6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, DMA) รุ่น DMA/STDA 861 ของบริษัท Mettler Toledo (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6480LV ของบริษัท JEOL (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

### 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการทดลอง

### 3.5 การทดลอง

#### 3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสมกับพีวีซีและสารตัวเติมตามอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูป 3.2 ภายใต้สภาวะต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 170 องศาเซลเซียส (ทั้งลูกกลิ้งหน้าและลูกกลิ้งหลัง)

ความเร็วของลูกกลิ้งหน้า: 8.4 รอบ/นาที

ความเร็วของลูกกลิ้งหลัง: 10.6 รอบ/นาที

เวลาในการผสมด้วยลูกกลิ้ง: 5 นาที

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5	6	7
พีวีซี	100	0	90	80	70	60	50
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	0	100	10	20	30	40	50
สารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน	4	4	4	4	4	4	4
สารช่วยในการขึ้นรูป	6	6	6	6	6	6	6
สารหล่อลื่นภายนอก	2	2	2	2	2	2	2
สารหล่อลื่นภายใน	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5



รูปที่ 3.2 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง

### 3.5.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง มาใส่ในแม่แบบที่มีขนาด  $15 \times 15 \times 0.3$  เซนติเมตร (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  หนา) (รูปที่ 3.3) และ แม่แบบรูปขึ้นทดสอบ (รูปที่ 3.4) ด้วยเครื่องอัดแบบ (รูปที่ 3.5) โดยใช้สภาวะการขึ้นรูปดังนี้

อุณหภูมิ: 170 องศาเซลเซียส

เวลาก่อนการกดอัด: 5 นาที

เวลาอัดก่อนเปิดไล่อากาศ: 1 นาที

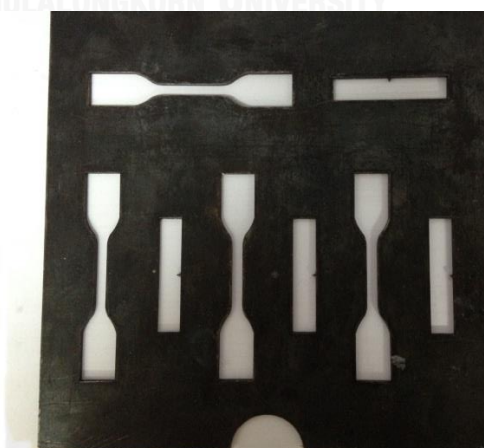
เวลากดอัดสุดท้าย : 3 นาที

เวลาหล่อเย็น: 2 นาที

ความดัน : 900 psi



รูปที่ 3.3 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ



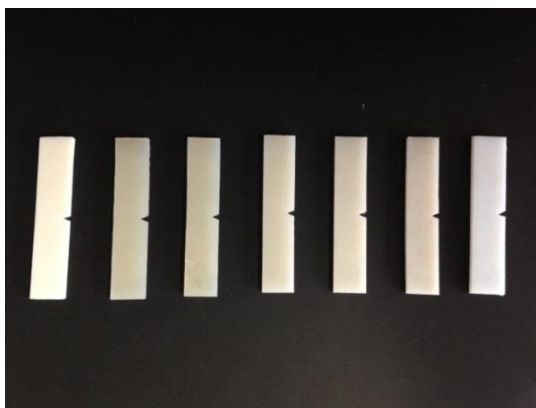
รูปที่ 3.4 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดแบบ

### 3.5.3.การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength)

ทดสอบค่าความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบให้มีขนาด 6.35 X 12.70 X 3.0 มิลลิเมตร (กว้าง X ยาว X หนา) จากนั้นบากชิ้นงานทดสอบเป็นรูปตัววี (V-notch) (รูปที่ 3.6) แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.7) ภายใต้สภาวะทดสอบดังนี้ : น้ำหนักค้อน 1 จูล ความเร็วค้อนเหวี่ยง 3.45 เมตร/วินาที ค้อนทำมุม 150 องศา ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก



รูปที่ 3.7 เครื่องมือทดสอบความทนแรงกระแทก

### 3.5.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

ทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D 638 ประเภท IV โดยอัดแบบขึ้นทดสอบรูปที่ได้จากกระบวนการอัดแบบ (รูปที่ 3.8) แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.9) เพื่อหาความทนแรงดึง (tensile strength), ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) โดยมีระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 65 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่ 50 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง



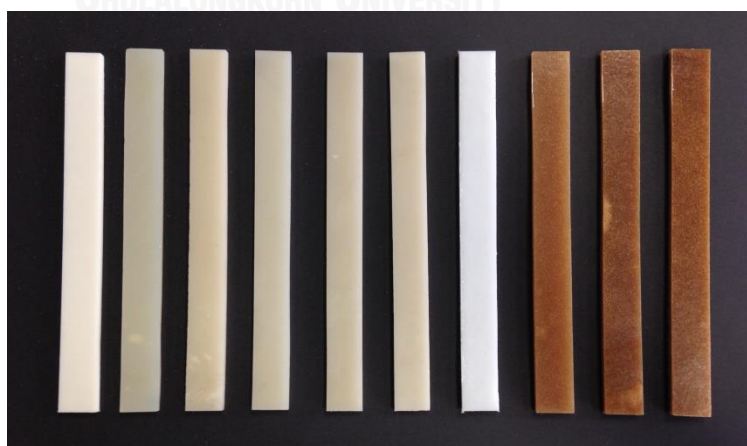
รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความทนแรงดึง



รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบความทนแรงดึง

### 3.5.5. การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง (flexural properties)

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D 790 ประเภท rectangular โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบเป็นชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยม (รูปที่ 3.10) แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.11) เพื่อหาความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และมอดุลัสดัดโค้ง (flexural modulus) น้ำหนักที่ใช้กด 250 นิวตัน ความเร็วการกดขึ้นงานเท่ากับ 15 มิลลิเมตร/ นาที ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง





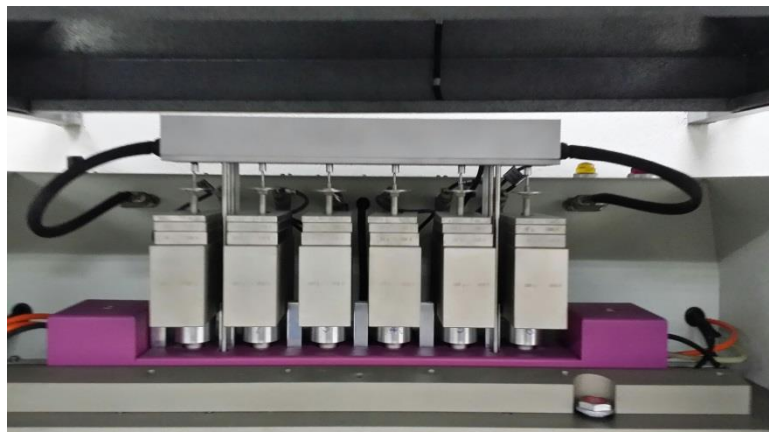
รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

### 3.5.6 การทดสอบสมบัติด้านความร้อนอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (heat distortion property)

ทดสอบสมบัติด้านความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D 648 โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบให้มีขนาด 12.7 x 127 x 3.0 มิลลิเมตร (กว้าง X ยาว X หนา) แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่อง HDT-Vicat auto (รูปที่ 3.12 และ 3.13) เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุทดสอบโก่งงอลงไปที่ตำแหน่ง 0.25 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเดิม ในสภาวะ load cell 0.455 MPa ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 2 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบ HDT



รูปที่ 3.13 หัวกดสำหรับการทดสอบ HDT

### 3.5.7 การทดสอบสมบัติด้านความร้อนหาอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening property)

ทดสอบสมบัติด้านความร้อนหาอุณหภูมิการอ่อนตัวของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D 1525 โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบให้มีขนาด  $12.7 \times 63.5 \times 3.0$  มิลลิเมตร (กว้าง X ยาว X หนา) แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่อง HDT-Vicat auto (รูปที่ 3.14) เพื่อหาอุณหภูมิการอ่อนตัวของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต ในสภาวะที่ load cell 50 N ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 องศาเซลเซียส/ ชั่วโมง



รูปที่ 3.14 หัวกดสำหรับการทดสอบ Vicat

### 3.5.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, DMA)

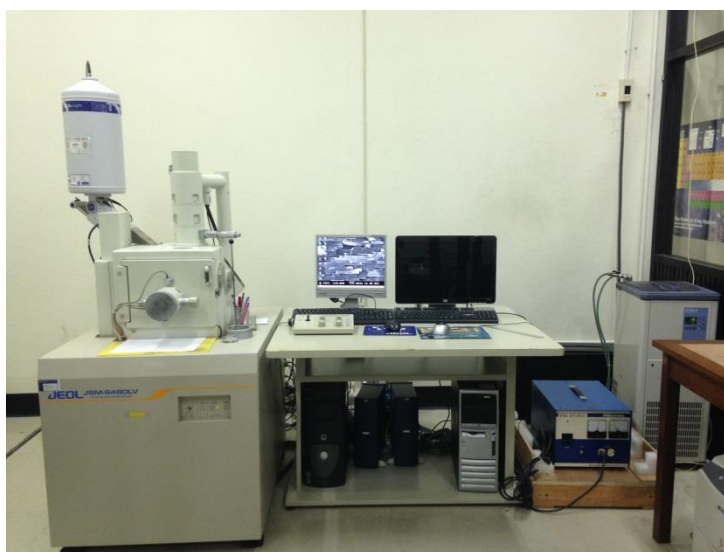
ทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) (รูปที่ 3.15) โดยชิ้นงานมีขนาด  $1.0 \times 1.0 \times 3.0$  มิลลิเมตร (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  หนา) ในรูปแบบ compression mode ภายใต้อุณหภูมิทดสอบ  $-50$  องศาเซลเซียสถึง  $100$  องศาเซลเซียส แอมพลิจูด  $10 \mu\text{m}$  ความถี่  $1 \text{ Hz}$  และอัตราการเพิ่มความร้อนที่  $3$  องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.15 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

### 3.5.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.16) โดยทำการเคลือบทองบนพื้นผิวรอยแตกหักก่อนทำการตรวจสอบ และดำเนินการที่ 10 kV กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.5.10 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water uptake)

ทดสอบสมบัติด้านการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D 570 นำชิ้นทดสอบขนาด 12.7 × 63.5 × 3.0 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × หนา) ไปอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บชิ้นทดสอบในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำมาชั่งหนักเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ( $W_0$ ) หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบแช่ลงในน้ำ (รูปที่ 3.17) โดยหลังจากนั้นเช็ดชิ้นทดสอบให้แห้งและบันทึกค่าน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่ในน้ำในแต่ละวัน ( $W_1$ ) และนำค่าน้ำหนักที่บันทึกได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำตามสมการที่ 3.1

$$\% \text{ water absorption} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

$W_0$  คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการดูดซึมน้ำ

$W_1$  คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 3.17 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

### 3.5.11 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยการฝังดิน โดยนำชิ้นทดสอบ (รูปที่ 3.18) ไปฝังดิน โดยทำการฝังดินที่ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการเก็บชิ้นทดสอบหลังฝังดิน 90 วัน (เดือนมิถุนายน – สิงหาคม) แล้วทำการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกและตรวจสอบสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.18 ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

### 3.5.12 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอลิิต

นำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและผงไม้มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงตามลำดับ ก่อนนำไปผสมกับพีวีซีและสารเติมแต่งตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบและทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมในหัวข้อ 3.5.3-3.5.11

ตารางที่ 3. 5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอลิิต

องค์ประกอบ	8	9	10
พีวีซี	80	80	80
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	20	20	20
ผงไม้	10	20	30
สารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน	4	4	4
สารช่วยในการขึ้นรูป	6	6	6
สารหล่อลื่นภายนอก	2	2	2
สารหล่อลื่นภายใน	0.5	0.5	0.5

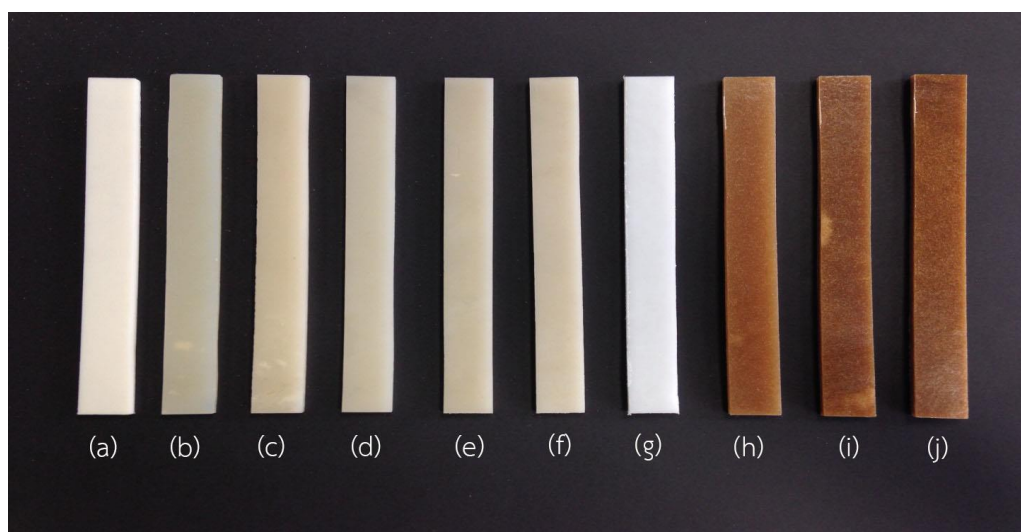


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบของ PVC, PBS, พอลิเมอร์ผสมของ PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิตของ PVC/PBS/ผงไม้ (PVC/PBS/WF) ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแบบ ตามลำดับ



รูปที่ 4. 1 ลักษณะชิ้นทดสอบพีวีซี (a), พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 90/10 (b), 80/20 (c), 70/30 (d), 60/40 (e), 50/50 (f), PBS (g), พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF 80/20/10 (h), 80/20/20 (i), 80/20/30 (j)

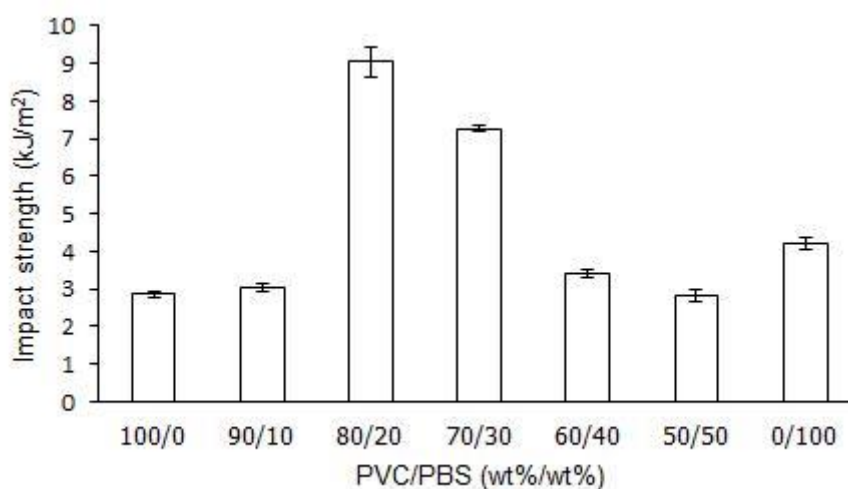
จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะกายภาพของชิ้นทดสอบดังนี้ ชิ้นทดสอบ พีวีซี (a) มีสีขาวปนเหลือง มีความแข็ง ขณะที่ชิ้นทดสอบ PBS (g) มีสีขาวขุ่น ทึบแสง ยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ ซึ่งเมื่อนำพีวีซีไปผสมกับ PBS พบว่าชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS (b-f) มีลักษณะขุ่น ซึ่งเมื่อเพิ่มองค์ประกอบของ PBS ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าชิ้นงานสามารถโค้งงอได้ และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ PVC/PBS (80/20) ไปผสมกับผงไม้ (10-30 phr) พบว่า ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต (h-j) มีความแข็งมากขึ้น ทึบแสง มีเฉดสีคล้ายไม้ โดยมีเฉดสีเข้มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น

## 4.2 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

### 4.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS

#### 4.2.1.1 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

รูปที่ 4.2 แสดงสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



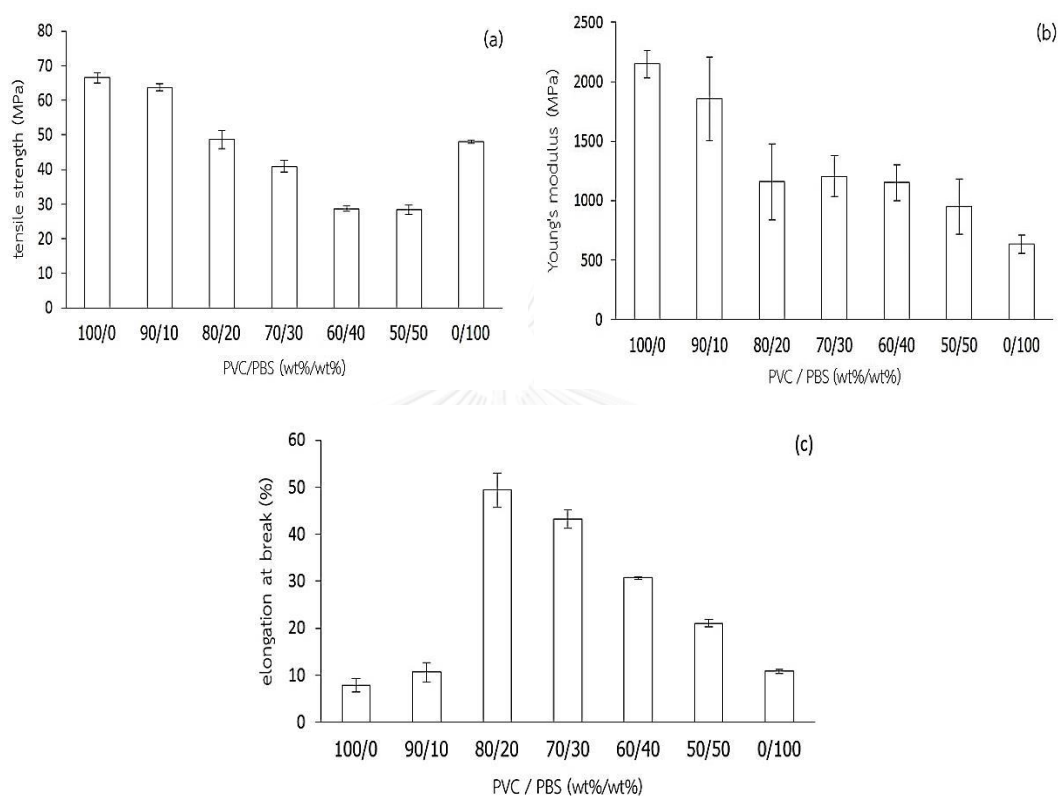
รูปที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าพีวีซี แสดงสมบัติของพลาสติกที่แข็งเปราะ เนื่องจากมีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำ ( $2.9 \text{ kJ/m}^2$ ) เพราะพีวีซี มีค่า  $T_g$  ที่สูง เมื่อพิจารณาความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS พบว่ามีการปรับปรุงเมื่อเติม PBS ตั้งแต่ปริมาณ 10-40 % โดยน้ำหนัก โดยมีความทนแรงกระแทกในช่วง  $3-9 \text{ kJ/m}^2$  บ่งบอกได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวมากกว่าพีวีซี โดยค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นสูงที่อัตราส่วน 80/20 ที่ค่าความทนแรงกระแทก  $9.0 \text{ kJ/m}^2$  แสดงถึงการกระจายตัวความเข้ากันได้ดีระหว่าง พีวีซี และ PBS แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PBS มากขึ้นกลับพบว่าค่าความทนแรงกระแทกลดลง อันเนื่องมาจากกระจายตัวไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการเกาะกลุ่ม (agglomeration) ของ PBS ส่งผลให้การส่งผ่านแรงระหว่างแต่ละเฟสลดลง [30]



#### 4.2.1.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง

รูปที่ 4.3 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดึงในเทอมของความทนแรงดึง (tensile strength), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



รูปที่ 4.3 ความทนแรงดึง (a), ยังส์มอดุลัส (b) และการยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

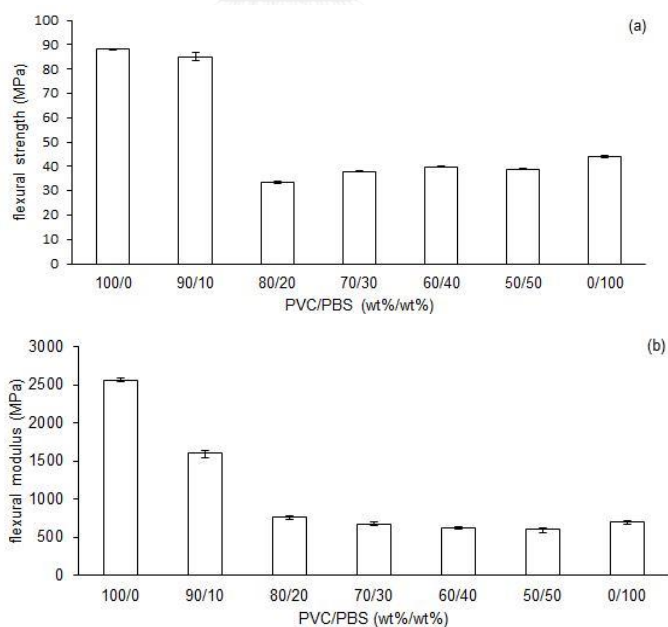
จากรูปที่ 4.3 (a) แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 5 อัตราส่วน ที่แสดงค่าความทนแรงดึงที่ต่ำกว่าพีวีซี (66.5 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น (จาก 4.2% ที่ปริมาณ PBS 10% โดยน้ำหนัก ถึง 57.3% ที่ปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก) ทั้งนี้เนื่องจากความทนแรงดึงที่ต่ำของ PBS ( 48 MPa) เมื่อเทียบกับพีวีซี และมีแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัสระหว่างพีวีซีและ PBS ที่ต่ำ นำไปสู่การส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ระหว่างแต่ละเฟสของพอลิเมอร์ต่ำ จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงต่ำ ยิ่งไปกว่านั้น การลดลงของความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ PBS สูงขึ้น 40 และ 50% โดยน้ำหนัก เกิดจากการรวมกลุ่มของ PBS ที่มากเกินไปและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของ PBS ในพีวีซีเมทริกซ์

รูปที่ 4.3 (b) แสดงค่ายังสัมมอดูลัส พบว่ายังสัมมอดูลัสของพีวีซี (2148.5 MPa) มีค่าลดลงหลังจากผสมกับ PBS และมีแนวโน้มลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น ค่ายังสัมมอดูลัสลดลงจาก 13.7% ที่ปริมาณ PBS 10% โดยน้ำหนักถึง 55.7% ที่ปริมาณ PBS 50% โดยน้ำหนัก เนื่องจากความยืดหยุ่นและมีค่ามอดูลัสที่ต่ำของ PBS (636 MPa) นำไปสู่การลดความแข็งตึง (stiffness) ของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อพิจารณาการยืดตัว ณ จุดขาด ของพีวีซีมีค่าเพียง 7.9% เมื่อทำเป็นพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม 80/20 PVC/PBS เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 49.4% บ่งบอกว่าความยืดหยุ่นของ PBS โดย PBS จะเคลื่อนตัวเข้าไปในปริมาตรอิสระ (free volume) ในขณะทำการดึงยืด เมื่อทำการดึง PBS ถูกดึงยืดไปด้วย จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น [30, 31]

#### 4.2.1.3 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง

รูปที่ 4.4 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งในเทอมของความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และมอดูลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

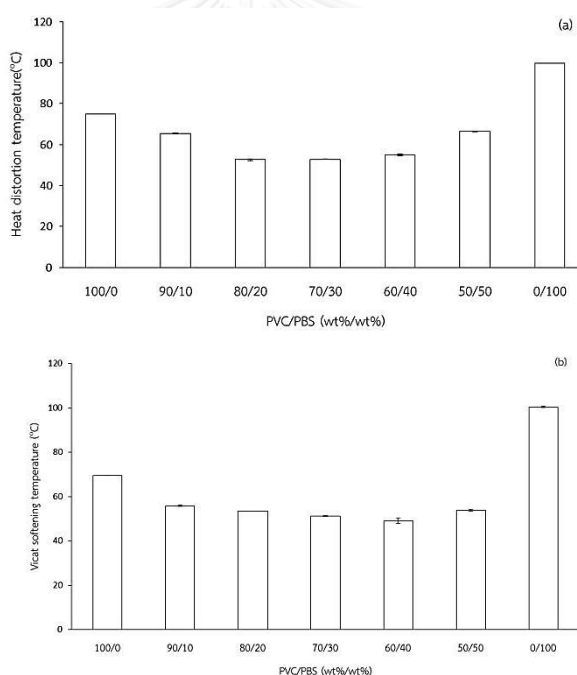


รูปที่ 4.4 ความทนแรงดัดโค้ง (a) และมอดูลัสแรงดัดโค้ง (b) ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่ปริมาณ PBS 10-50 % โดยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพีวีซีมีค่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้ง 88 MPa และ 2562.5 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ PBS ค่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้ง 43.9 MPa และ 694.5 MPa ตามลำดับ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถดัดโค้งได้ง่าย [32] เมื่อเติม PBS ที่มีความนิ่มลงในพีวีซีที่มีความแข็ง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองยังสัมผัสและการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ในการทดสอบความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

#### 4.2.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS

รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติความร้อนในเทอมของอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (heat distortion temperature, HDT) และอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening temperature, VST) ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



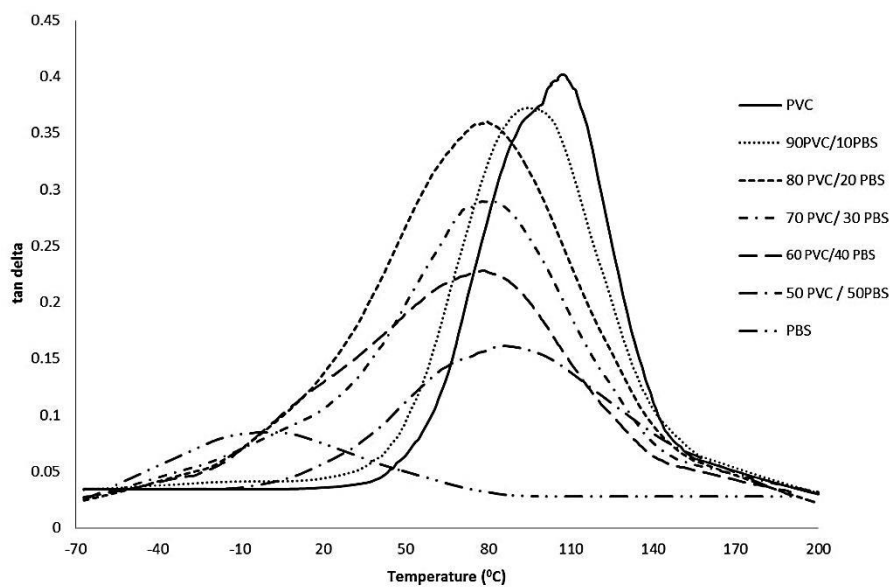
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (a) และอุณหภูมิการอ่อนตัว (b) ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.5 พบว่า พีวีซีมีค่า HDT และ VST อยู่ที่ 74.8 และ 69.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ PBS มีค่า HDT และ VST อยู่ที่ 99.6 และ 100.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้โดยไม่เสียสภาพ [22] หากแต่เมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS พบว่า HDT และ VST มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก

การผสม PBS ในพอลิเมอร์ผสม จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่ได้มากขึ้น จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการโก่งตัวหรืออ่อนตัวได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ยิ่งไปกว่านั้น อันตรกิริยาที่ต่ำระหว่างพีวีซีและ PBS จะไปลดค่ามอดูลัสจึงเป็นสาเหตุให้ค่า HDT และ VST ของพอลิเมอร์ผสมลดลง [33]

#### 4.2.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS

รูปที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.1 แสดง  $T_g$  ที่ได้จากกราฟ tangent delta ของเทคนิค DMA ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



รูปที่ 4.6 กราฟ tangent delta ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

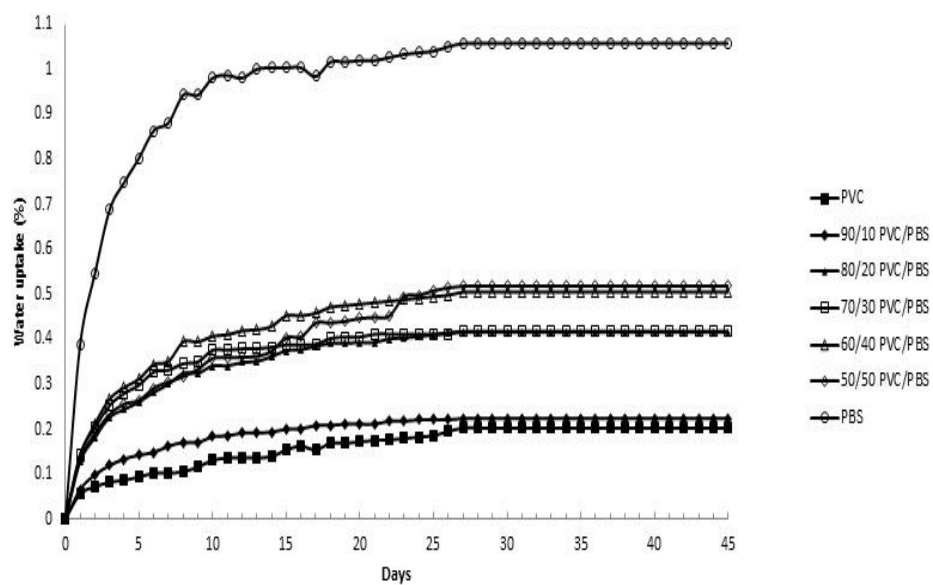
ตารางที่ 4.1 ค่า  $T_g$  ของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

PVC/PBS (wt%/wt%)	$T_g$ ( $^{\circ}$ C)
100/0	110
0/100	-10
90/10	95
80/20	80
70/30	81
60/40	78
50/50	85

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.1 พบว่าพีวีซีและ PBS มีค่า  $T_g$  ประมาณ 110 และ -10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การผสม PBS ลงไปในปริมาณ 10 -40 % โดยน้ำหนักลงในพีวีซี ทำให้ค่า  $T_g$  ของพีวีซีเกิดการขยับตำแหน่งไปในอุณหภูมิที่ต่ำเมื่อปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่า  $T_g$  ที่ต่ำและความยืดหยุ่นที่สูงของ PBS ไปเพิ่มการเคลื่อนไหวของสายโซ่พีวีซีหลังจากผสมกับ PBS [34] อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ PBS ที่สูงขึ้น (50 % โดยน้ำหนัก) ค่า  $T_g$  ของพีวีซีในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น บ่งบอกว่าเกิดการแยกเฟส (phase separation) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเริ่มแสดงสมบัติเฉพาะตัว แต่อย่างไรก็ตาม การแสดงให้เห็นพีกของ  $T_g$  เส้นเดียวไม่ได้บ่งบอกว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันได้ (miscible blend) อาจจะเป็นการผสมเข้ากันได้บางส่วน (partially miscible blend) เนื่องจากเป็นกราฟที่มีลักษณะกว้าง (broadening transition)

#### 4.2.4 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS

รูปที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.2 แสดงการดูดซึมน้ำของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



รูปที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ในระยะเวลา 45 วัน

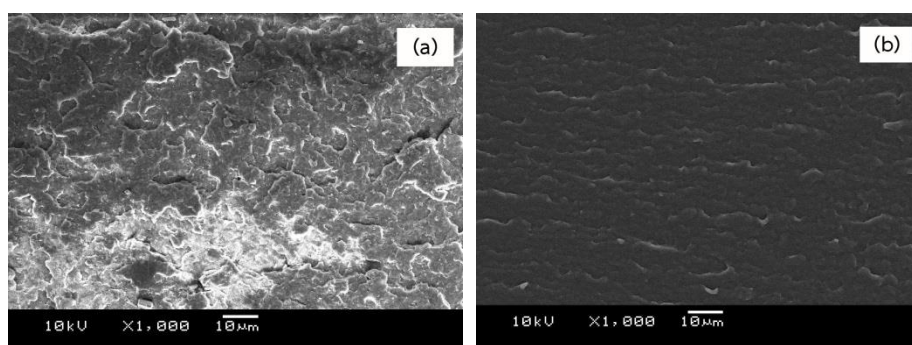
ตารางที่ 4.2 การดูดซึมน้ำสูงสุดของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

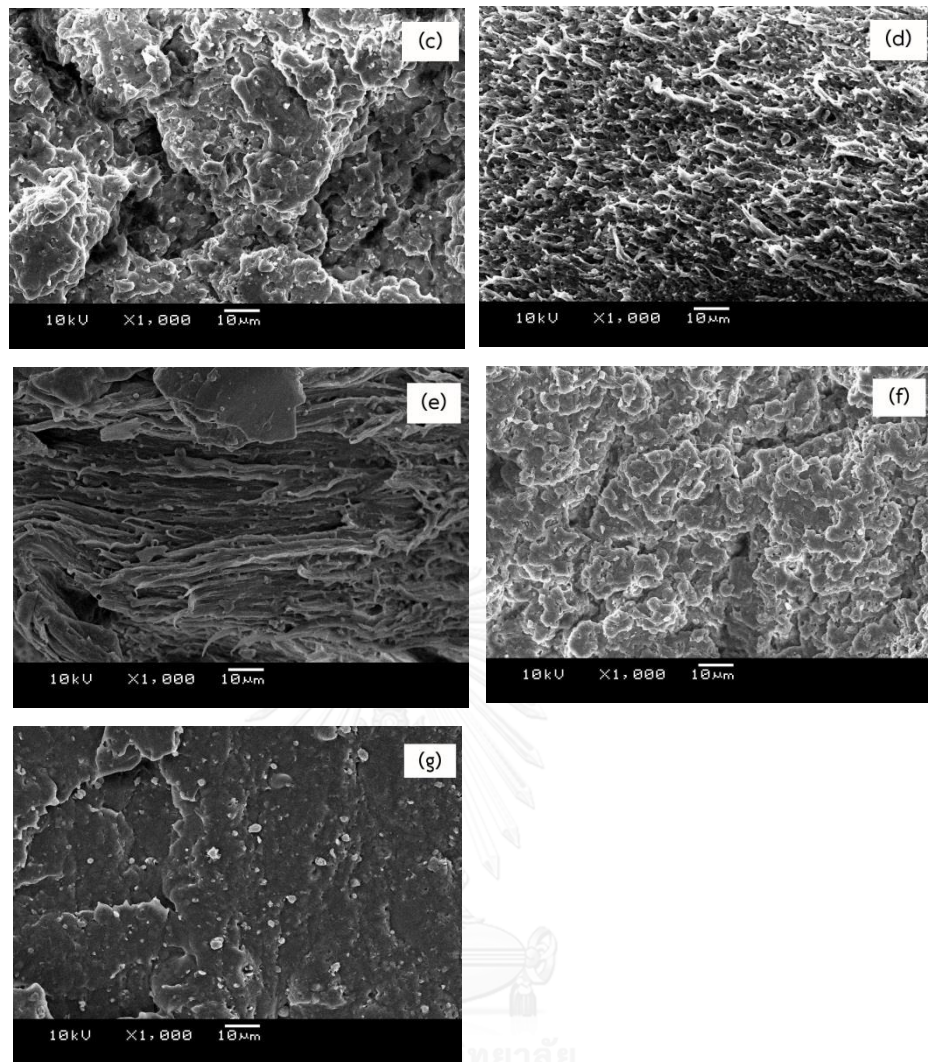
PVC/PBS (wt%/wt%)	อัตราการดูดซึมน้ำสูงสุด (%)
100/0	0.202
0/100	1.057
90/10	0.224
80/20	0.517
70/30	0.415
60/40	0.417
50/50	0.504

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าดูดซึมน้ำของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า การดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรกและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเริ่มคงที่จนถึงจุดอิ่มตัว โดยพีวีซีมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำ เนื่องจากพีวีซีมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ในขณะที่ PBS มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูง โดยจะสังเกตเห็นได้จากในช่วงแรกของสัปดาห์ ที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆคงที่จนถึงอิ่มตัว โดยอัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดของพีวีซีและ PBS อยู่ที่ 0.202 และ 1.057 % ตามลำดับ ดังนั้นอัตราการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น โดยอยู่ในช่วง 0.224 – 0.518 % โดยที่พอลิเมอร์ผสมพีวีซี/PBS อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 แสดงค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดประมาณ 0.51 % ใน 28 วัน [28]

#### 4.2.5 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS

รูปที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบด้านความทนแรงดึงของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ ภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า





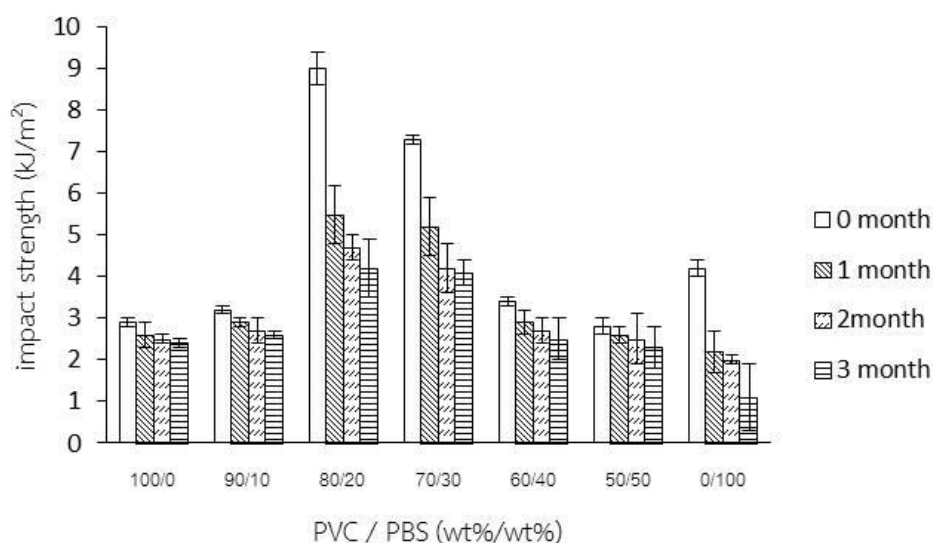
รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบของพีวีซี (a), PBS (b) และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วน 90/10 (c), 80/20 (d), 70/30 (e), 60/40 (f) และ 50/50 (g)

จากรูปที่ 4.8 พบว่า พีวีซีมีพื้นผิวรอยแตกหักค่อนข้างเรียบ (a) ซึ่งแสดงลักษณะของวัสดุที่แข็งและเปราะ ขณะที่ PBS มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ขรุขระ (b) ซึ่งแสดงลักษณะของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าพื้นผิวรอยแตกหักมีลักษณะเป็นรอยคลื่น ขรุขระกระจายตัวไปทั่ว (c-g) โดยพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วน 80/20 (d) แสดงการยึดสูงสุด ณ จุดขาด ทั้งนี้เนื่องจากความยืดหยุ่นที่สูงของ PBS ที่ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นที่ปริมาณ PBS ที่สูง 40 -50 % โดยน้ำหนัก ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมแสดงให้เห็นถึงสัณฐานวิทยาที่ไม่เข้ากันและเกิดการแยกเฟส ซึ่งสนับสนุนผลการทดลองเชิงกลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

## 4.2.6 การย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS

### 4.2.6.1 ความทนแรงกระแทก

รูปที่ 4.9 แสดงสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กันเมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือน



รูปที่ 4.9 ความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการศึกษา การย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือน

จากรูปที่ 4.9 พบว่า พีวีซีเมื่อผ่านการฝังดิน ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกตกลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ขณะที่ PBS เมื่อผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่าความทนแรงกระแทกตกลง 73.8% ซึ่งมากกว่าพีวีซีที่มีค่าความทนแรงกระแทกตกลง 17.2 % แสดงให้เห็นว่า PBS สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ในภาวะการทดสอบ และเมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS พบว่าการเติม PBS ที่ปริมาณ 20% และ 30% ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกตกลงอย่างเห็นได้ชัดเจนนเมื่อทำการฝังดินเป็นระยะ 3 เดือน ขณะที่การเติม PBS ที่ปริมาณ 10%, 40% และ 50% มีค่าความทนแรงกระแทกตกลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อทำการฝังดิน อาจเนื่องจาก PBS ไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในพีวีซีเมทริกซ์

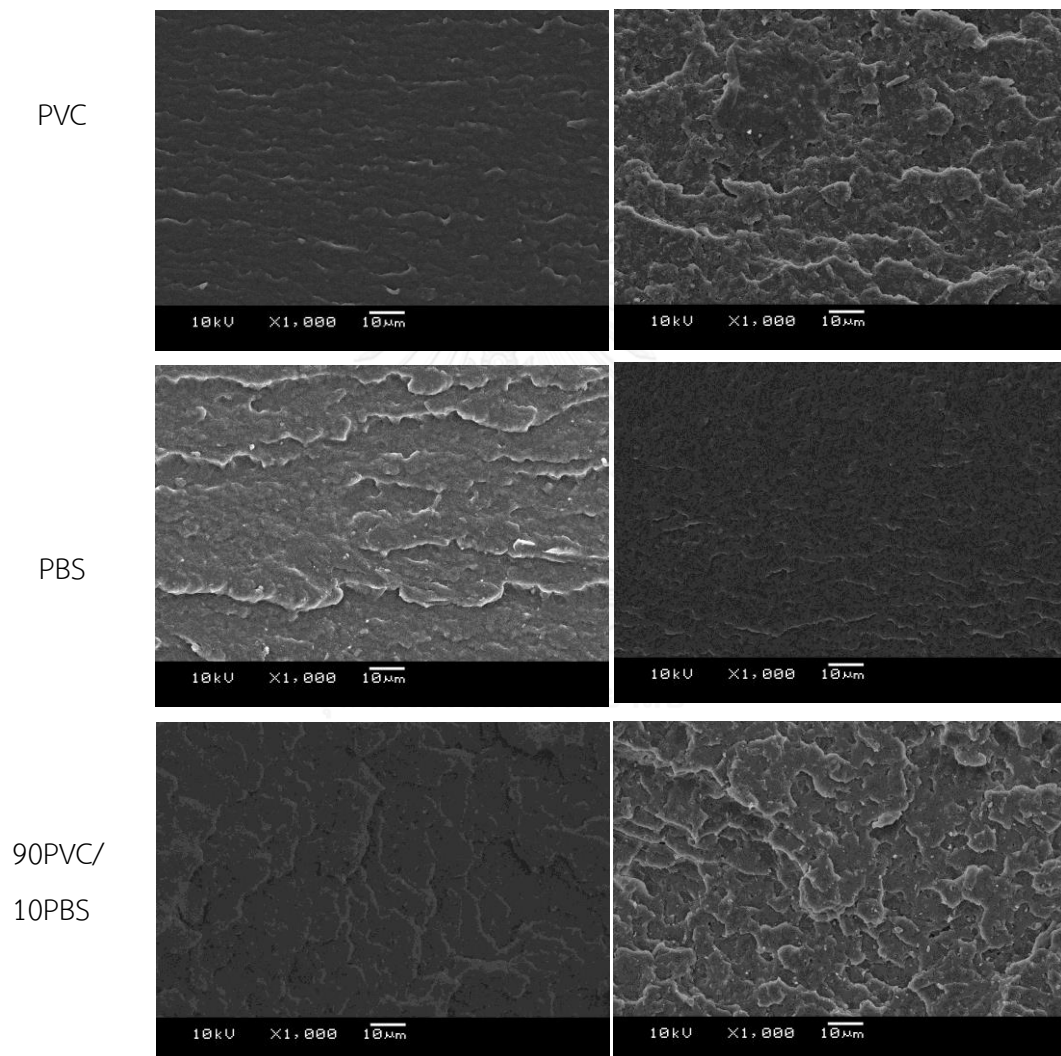


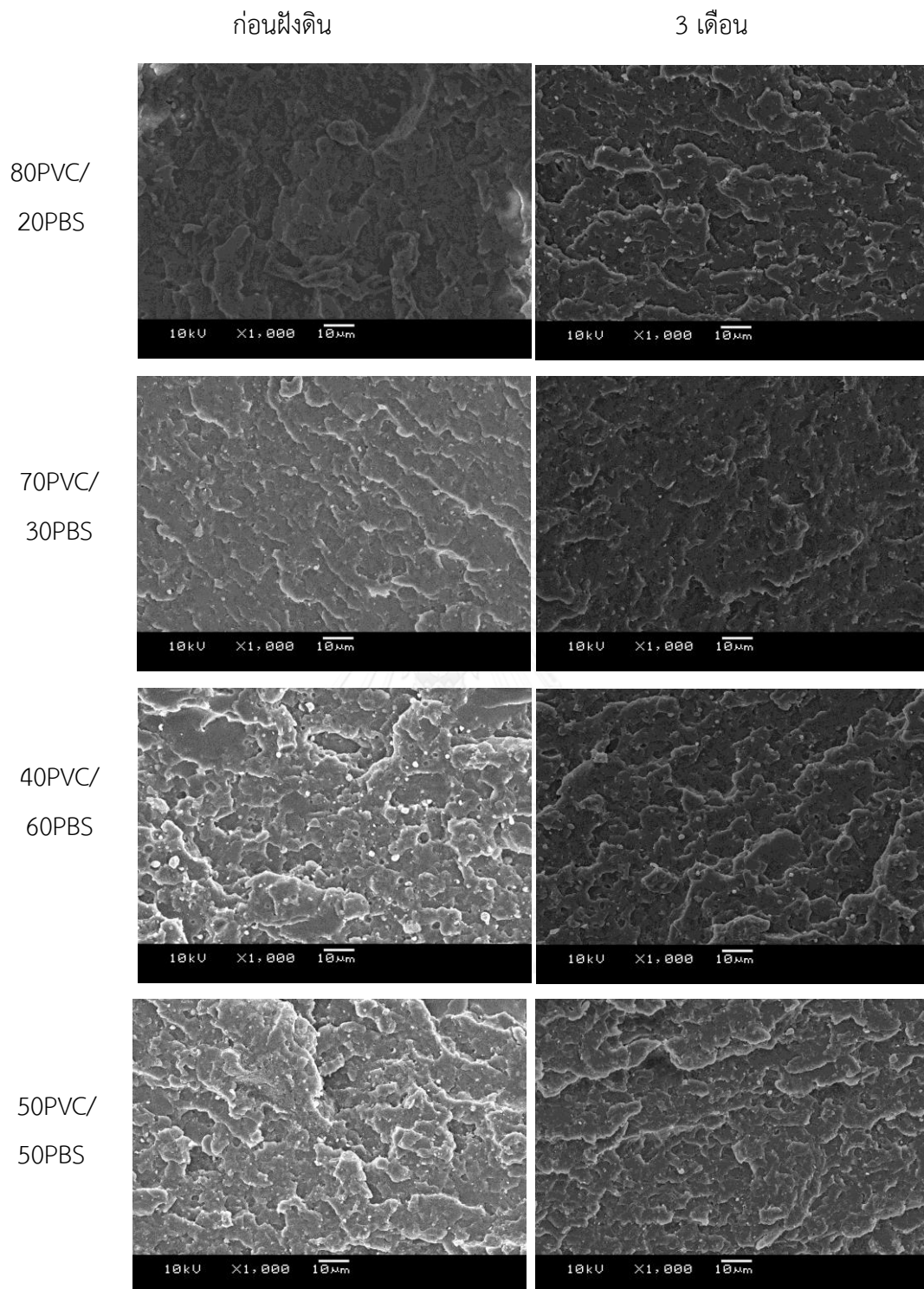
#### 4.2.6.2 สัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.10 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังจากทดสอบด้านความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือนภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า

ก่อนฝังดิน

3 เดือน





**รูปที่ 4.10** สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบของพีวีซี, PBS และพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือน

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ชั้นทดสอบเมื่อผ่านการฝังดินและทดสอบความทนแรงกระแทกมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวิทยาของชั้นทดสอบอย่างไม่น่าสำคัญ ทั้งนี้การย่อยสลายจะเกิดบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบ

จากการพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมแล้ว ทำให้ตัดสินใจเลือกอัตราส่วนผสมของ PVC/PBS ที่อัตราส่วน 80/20 ไปผสมกับผงไม้ในปริมาณ 10-30 phr เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนต่อไป

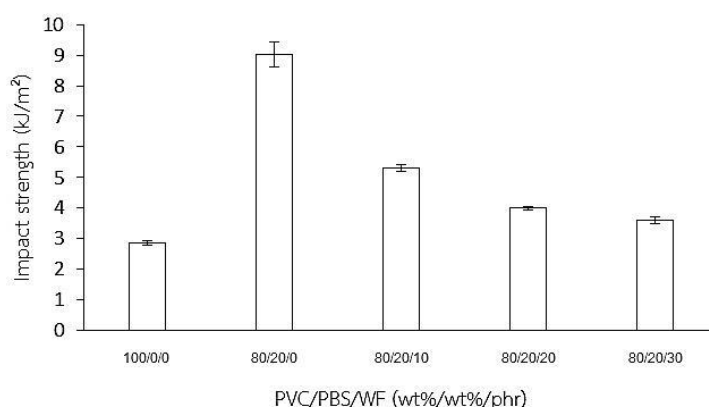
#### 4.3 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วน 80/20 มีความทนแรงกระแทกและการยึดตัว ณ จุดขาดสูงสุด จึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนนี้มาผสมกับผงไม้ที่ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

##### 4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต

###### 4.3.1.1 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF

รูปที่ 4.11 แสดงสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



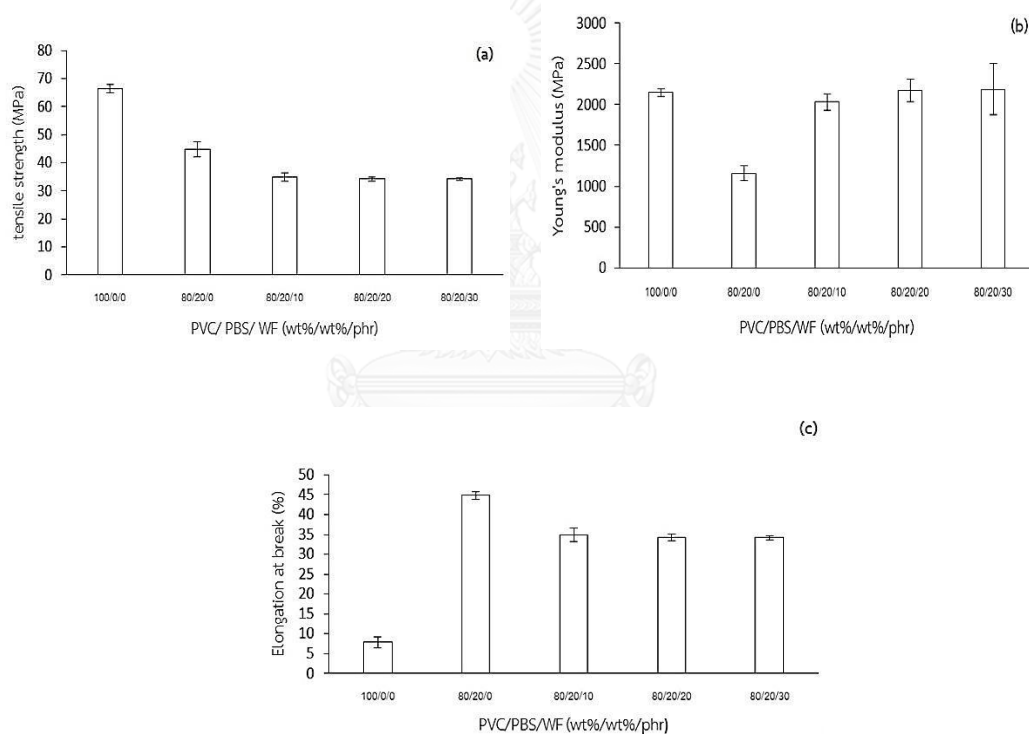
รูปที่ 4.11 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่มีความแข็งตึง (stiffness) สูง

เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน และเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลิเมอร์ (chain mobility) ของพอลิเมอร์ ทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง และอันตรกิริยาที่ต่ำระหว่างพีวีซีหรือ PBS กับผงไม้ นำไปสู่การส่งผ่านแรงที่ไม่ดีระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับผงไม้ ถึงแม้ว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลงไปประมาณ 41–60% เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 80/20 แต่ก็ยังมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าพีวีซี [35]

#### 4.3.1.2 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF

รูปที่ 4.12 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดึงในเทอมของความทนแรงดึง (tensile strength), ยั่งสัมมอดูลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.12 ความทนแรงดึง (a), ยั่งสัมมอดูลัส (b) และการยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของพอลิเมอร์ผสมคอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

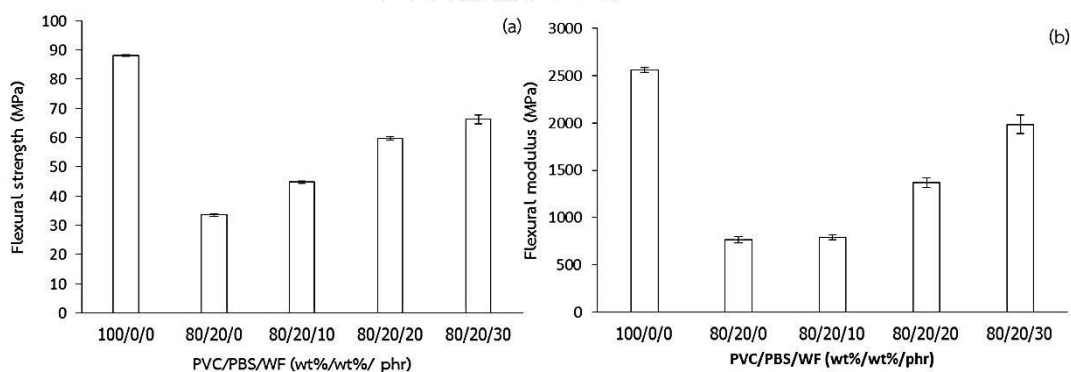
จากรูปที่ 4.12 พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลง เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น (จาก 22.1% ที่ปริมาณผงไม้ 10 phr ถึง 23.7% ที่ปริมาณผงไม้ 30 phr) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12(a) อันเนื่องมาจากการมีอันตรกิริยาที่ต่ำระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงไม้ และการส่งผ่านแรงที่ต่ำระหว่างเฟส ซึ่งสามารถสนับสนุนผลการทดลองด้วยภาพถ่าย SEM

ในส่วนของยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่า ยังส์มอดุลัสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น (จาก 68.6 % ที่ปริมาณผงไม้ 10 phr ถึง 81.5 % ที่ปริมาณผงไม้ 30 phr) ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งตึงของผงไม้ที่เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b)

จากรูปที่ 4.12 (c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้มีความแข็งตึงสูง ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งมีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ โดยการเติมผงไม้ที่แสดงถึงผลการยืดตัว ณ จุดขาดที่ลดลงอย่างชัดเจน [36]

#### 4.3.1.3 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF

รูปที่ 4.13 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งในเทอมของความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และมอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

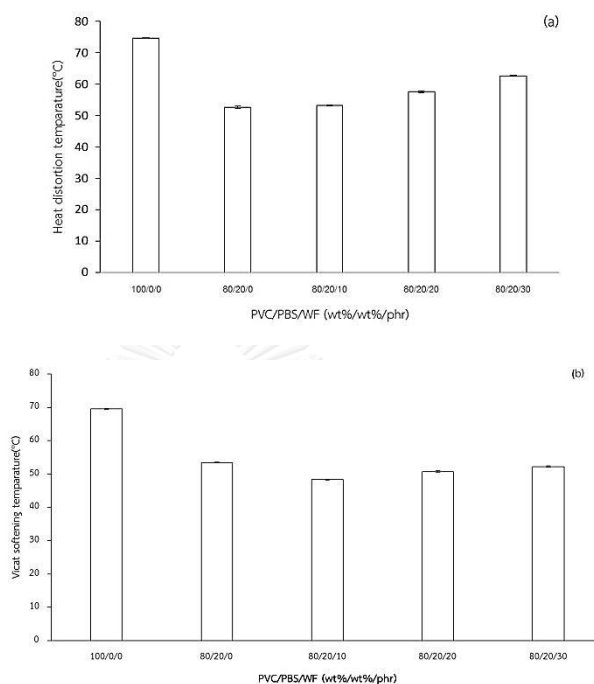


รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้ง (a), มอดุลัสแรงดัดโค้ง (b) ของพอลิเมอร์ผสมคอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 33.57 MPa เป็น 66.27 MPa และมอดุลัสดัดโค้งของคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันจาก 767.8 MPa เป็น 1986.2 MPa เมื่อเติมผงไม้ปริมาณ 30 phr ทั้งนี้เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง จึงเพิ่มความแข็งตึงให้กับคอมพอสิต [36] ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดี

### 4.3.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF

รูปที่ 4.14 แสดงสมบัติด้านทางความร้อนในเทอมของอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (heat distortion temperature, HDT) และอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening temperature, VST) ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

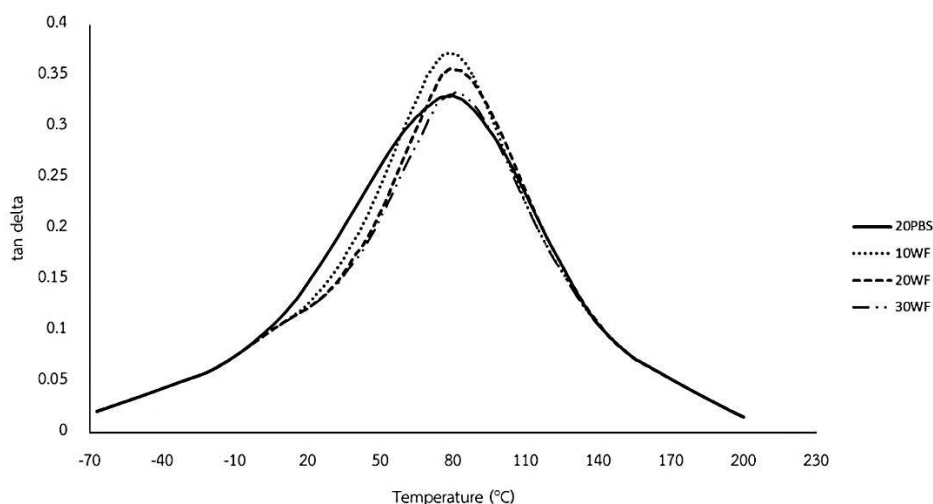


รูปที่ 4.14 อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (a) และอุณหภูมิการอ่อนตัว (b) ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ค่า HDT และ VST มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 80/20 ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของอนุภาคผงไม้ ที่ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์และป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์คอมพอสิต [37] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ HDT และ VST สามารถบ่งบอกถึงความทนความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เพิ่มขึ้น หากแต่ค่า HDT และ VST ของพอลิเมอร์คอมพอสิตไม่สามารถถูกปรับปรุงได้เท่ากับพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่างผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติมต่ำ[38]

### 4.3.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, $T_g$ ) ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF

รูปที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.3 แสดง  $T_g$  ที่ได้จากกราฟ tangent delta ของเทคนิค DMA ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน



รูปที่ 4.15 กราฟ tangent delta ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

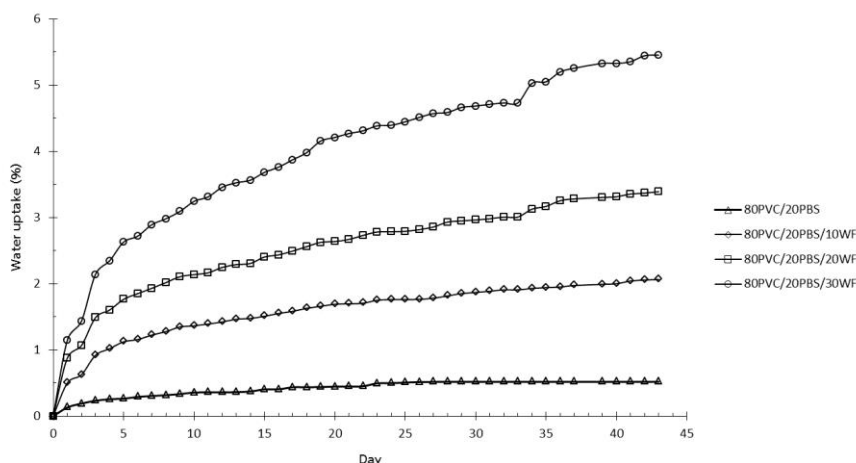
ตารางที่ 4.3 ค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $^{\circ}\text{C}$ )
80/20/0	80
80/20/10	78
80/20/20	80
80/20/30	81

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 พบว่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 78-81 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ พบการเปลี่ยนแปลงค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์คอมพอสิตอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเติมปริมาณผงไม่เพิ่มมากขึ้น โดยเทียบกับค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสม

#### 4.3.4 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.5 แสดงการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ในระยะเวลา 45 วัน

ตารางที่ 4. 4 การดูดซึมน้ำสูงสุดของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

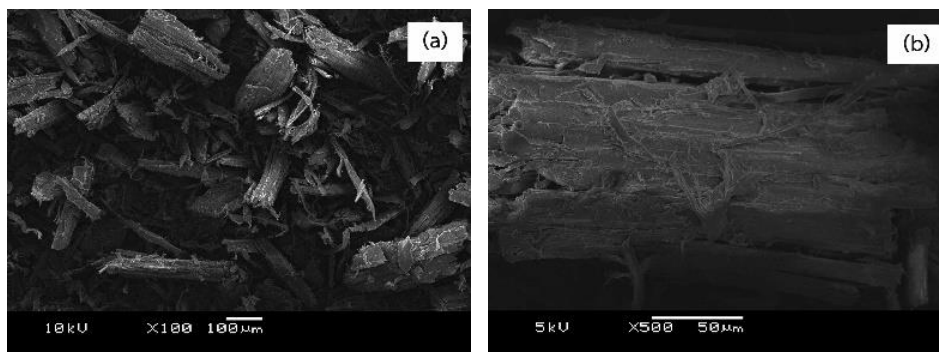
PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	อัตราการดูดซึมน้ำสูงสุด (%)
80/20/0	0.517
80/20/10	2.063
80/20/20	3.390
80/20/30	5.450

จากรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.4 พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงไม้ปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) ซึ่งแสดงสมบัติความชอบน้ำที่ตอบสนองต่ออัตราการดูดซึมน้ำโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ยิ่งไปกว่านั้นช่องว่างพื้นผิวระหว่างผงไม้กับพอลิเมอร์ เป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีปริมาณผงไม้ 30 phr แสดงอัตราการดูดซึมน้ำ 4.584 % และ 5.45 % หลังจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 28 วันและ 45 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่แห้ง การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งให้เกิดการย่อยสลายของพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยให้จุลินทรีย์สามารถแทรกเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง [28, 35]



#### 4.3.5 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอลิิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

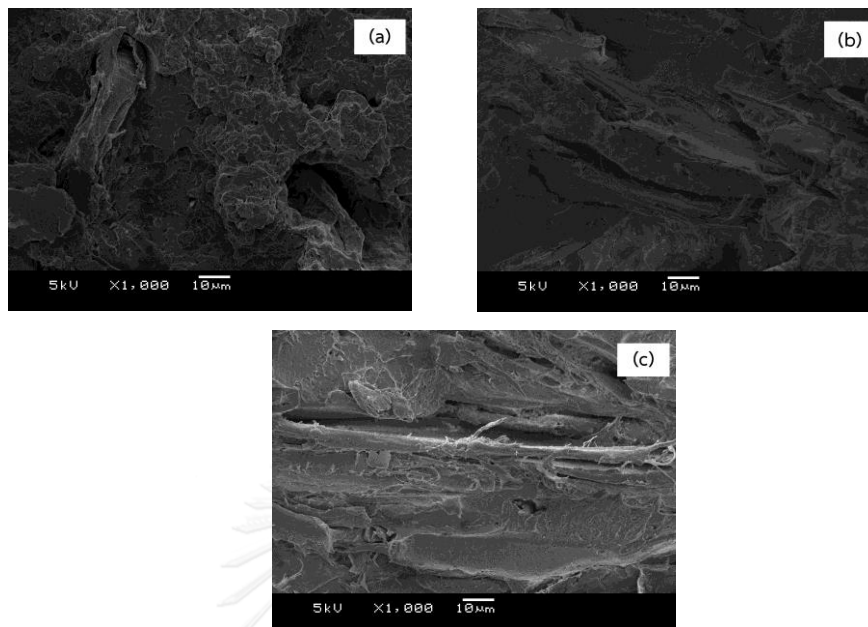
รูปที่ 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาของผงไม้ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของผงไม้ภายใต้กำลังขยาย (a) 100 เท่า และ (b) 500 เท่า

จากรูปที่ 4.17 พบว่าอนุภาคผงไม้ มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเส้นใย (fibril) ที่มีความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆ กัน (มี aspect ratio ประมาณ 3-10)

รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกหักของของขึ้นทดสอบภายหลังการทดสอบด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.18 สัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกหักของของขึ้นทดสอบ PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

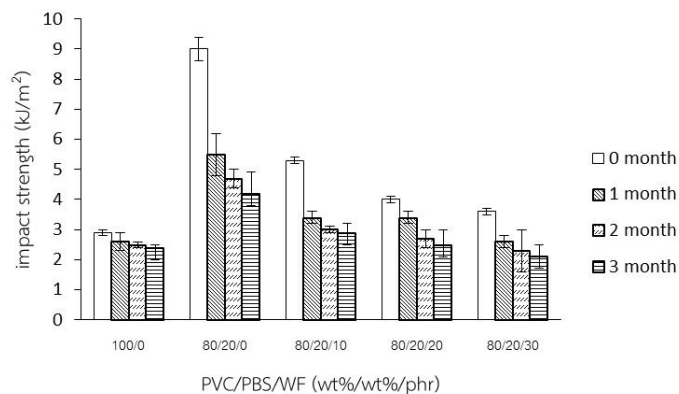
(a) 80/20/10 (b) 80/20/20 (c) 80/20/30

จากรูปที่ 4.18 พบว่า เกิดช่องว่างบริเวณพื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาคผงไม้ โดยสามารถสังเกตเห็นอนุภาคผงไม้ได้อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาพื้นผิวที่ต่ำระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติม และความเข้ากันได้ไม่ดี (non-wettability) ระหว่างผงไม้ที่มีความชอบน้ำกับพีวีซี และ PBS ที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ลดอัตราการเกิดพันธะ (debonding) ระหว่างอนุภาคผงไม้กับเมทริกซ์และมีเกิดช่องว่างเกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบความทนแรงดึง ซึ่งสอดคล้องกับผลความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ลดลงเมื่อเติมผงไม้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น

#### 4.3.6 การย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

##### 4.3.6.1 ความทนแรงกระแทก

รูปที่ 4.19 แสดงสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ กันเมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือน



**รูปที่ 4.19** ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือน

จากรูปที่ 4.19 พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบก่อนฝังดิน โดยความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าความทนแรงกระแทกลดลง เนื่องจากมีองค์ประกอบของอนุภาคผงไม้ที่เป็นวัสดุที่ย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable) จึงเพิ่มโอกาสให้เกิดการย่อยสลายได้ดี

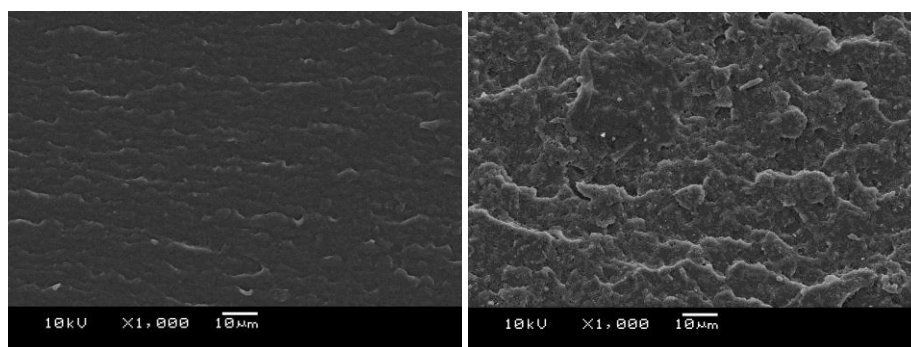
#### 4.3.6.2 สัณฐานวิทยา

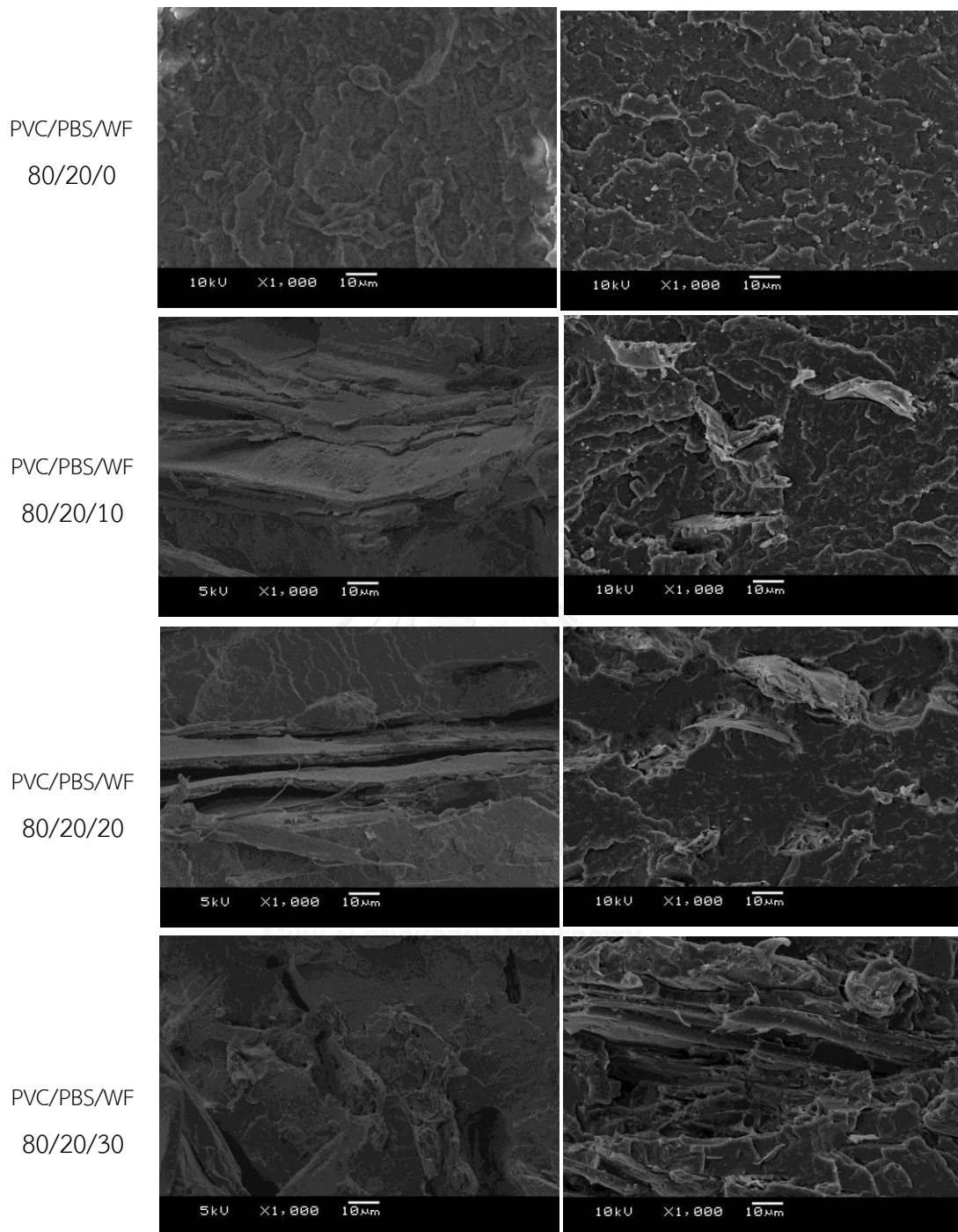
รูปที่ 4.20 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในระยะเวลา 3 เดือนภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า

ก่อนฝังดิน

3 เดือน

PVC





**รูปที่ 4.20** สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ ในระยะเวลา 3 เดือน

จากรูปที่ 4.20 พบว่า เกิดช่องว่างระหว่างผิวของผงไม้และพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างผงไม้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ ยังพบการหลุดออกของอนุภาคผงไม้จากเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งอาจส่งผลให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติความเหนียวและการย่อยสลายทางชีวภาพของพีวีซี โดยใช้ PBS ทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์กิปลาสติไซเซอร์ให้แก่ พีวีซี และเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF เพื่อทำเป็นวัสดุไม้เทียม โดยผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคนิคกระบวนการอัดแบบ แล้วทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดซึมน้ำ และการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1. จากการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBS และเมื่อทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF พบว่าการเติมผงไม้ จะทำให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลง
2. จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสมีค่าลดลงตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อทำการเติมผงไม้ พบว่าความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง
3. จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS พบว่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมผงไม้พบว่า ผงไม้ปรับปรุงสมบัติความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้งให้แก่พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ได้
4. จากการทดสอบสมบัติความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่า พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS มีค่า HDT และ VST ที่ลดลง และเมื่อเติมผงไม้พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตจะมีค่า HDT และ VST เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ
5. จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ด้วยเทคนิคเชิงกลพลวัต พบว่า พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง  $T_g$  เกิดการขยับตำแหน่งไปในอุณหภูมิที่ต่ำเมื่อปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมผงไม้ พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF พบการเปลี่ยนแปลงค่า  $T_g$  อย่างไม่มีนัยสำคัญปริมาณผงไม้เพิ่มมากขึ้น

6. จากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเติมผงไม้ พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตมีอัตราการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น
7. จากการตรวจสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินในพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทำการทดสอบด้วยสมบัติความทนแรงกระแทกและสัญญาณวิทยา พบว่าเมื่อปริมาณของ PBS, ผงไม้ และจำนวนระยะเวลาของการฝังดินเพิ่มขึ้น การย่อยสลายทางชีวภาพก็จะเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้คล้ายกับ PBS มาแทน เช่น พอลิแล็กติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต เป็นต้น
2. ศึกษาการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบให้มากขึ้น เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง และทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงสัญญาณวิทยาบริเวณพื้นผิวซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด
3. ทดลองใช้สารคู่ควบ ที่จะช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผงไม้และพอลิเมอร์เมทริกซ์
4. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การฉีดแบบ การเป่าฟิล์ม การอัดรีดเป็นแผ่น เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงกระบวนการขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต

## รายการอ้างอิง

- [1] Marathe, D.S. and Joshi, P.S. Characterization of highly filled wood flour-PVC composites: morphological and thermal studies. Journal of Applied Polymer Science 114(1) (2009): 90-96.
- [2] Müller, M., Radovanovic, I., Grüneberg, T., Militz, H., and Krause, A. Influence of various wood modifications on the properties of polyvinyl chloride/wood flour composites. Journal of Applied Polymer Science 125(1) (2012): 308-312.
- [3] Aouachria, K., Massardier, V., and Belhaneche-Bensemra, N. Isothermal and dynamic thermogravimetric degradation of rigid and plasticized poly(vinyl chloride)/poly(methyl methacrylate) blends. International Journal of Polymeric Materials 58(6) (2009): 336-346.
- [4] บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน). คู่มือการใช้งานพีวีซีเรซิน. 2010. Available from: [http://www.thaiplastic.co.th/TPC/Upload/Product/Resin/Download\\_1300345455.pdf/](http://www.thaiplastic.co.th/TPC/Upload/Product/Resin/Download_1300345455.pdf/) [17 October 2014]
- [5] Rahman, M. and Brazel, C.S. The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges. Progress in Polymer Science 29(12) (2004): 1223-1248.
- [6] Marcilla, A., Garcia, S., and Garcia-Quesada, J. Study of the migration of PVC plasticizers. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71(2) (2004): 457-463.
- [7] Shin, S.M., Jeon, H.S., Kim, Y.H., Yoshioka, T., and Okuwaki, A. Plasticizer leaching from flexible PVC in low temperature caustic solution. Polymer Degradation and Stability 78(3) (2002): 511-517.
- [8] Pakalin, S., Aschberger, K., Cosgrove, O., Lund, B., Paya, P., and Vegro, S. European Union Risk Assessment Report—Bis (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP). 2008, Series 2nd Priority List.
- [9] Pereira, C., Mapuskar, K., and Rao, C.V. Chronic toxicity of diethyl phthalate in male Wistar rats—A dose–response study. Regulatory Toxicology and Pharmacology 45(2) (2006): 169-177.



- [10] Kim, H.-S., Kim, H.-J., Lee, J.-W., and Choi, I.-G. Biodegradability of bio-flour filled biodegradable poly(butylene succinate) bio-composites in natural and compost soil. Polymer Degradation and Stability 91(5) (2006): 1117-1127.
- [11] Ge, X., Li, X., and Meng, Y. Tensile properties, morphology, and thermal behavior of PVC composites containing pine flour and bamboo flour. Journal of Applied Polymer Science 93(4) (2004): 1804-1811.
- [12] Pagé, D.J.Y.S., Cunningham, N., Chan, N., Carran, G., and Kim, J. Mechanical and heat deflection properties of PVC/PMMA/montmorillonite composites. Journal of Vinyl and Additive Technology 13(2) (2007): 91-97.
- [13] กรรณิการ์ บุตรเอก. มารู้จัก ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ กันเถอะ 2012. Available from: [http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss\\_j/2555\\_189\\_60\\_p20-21.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2555_189_60_p20-21.pdf) [20 October 2015]
- [14] Endo, K. Synthesis and structure of poly(vinyl chloride). Progress in Polymer Science 27(10) (2002): 2021-2054.
- [15] บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. Polyvinyl Chloride Resin, โพลีไวนิลคลอไรด์เรซิน Available from: <http://thaipolychemicals.blogspot.com/2014/01/polyvinyl-chloride-resin.html> [21 October 2015]
- [16] plastmate.com. K-value of PVC Available from: <http://www.plastemart.com/Upload/Literature/pvc.asp> [24 October 2015]
- [17] Wilkes, C.E., Summer, J.W., Daniels, C.A. PVC Handbook. USA: Hanser Gardner, 2005.
- [18] Edenbaum, J. Plastic additives and modifiers Handbook. USA: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [19] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [20] นวดล เพ็ชรวัฒนา. การเสริมสภาพพลาสติกในพอลิไวนิลคลอไรด์ 2011. Available from: [http://www.ubu.ac.th/web/files\\_up/08f2013012310505210.pdf](http://www.ubu.ac.th/web/files_up/08f2013012310505210.pdf) [15 October 2015]
- [21] Patrick., T. Modern Plastics Encyclopedia Handbook. USA: McGraw-Hill, 1994.
- [22] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) Available from: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>

- [23] Wambua, P., Ivens, J., and Verpoest, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics. Composites Science and Technology 63(9) (2003): 1259-1264.
- [24] Ibrahim, N., Rahim, N., Wan Yunus, W., and Sharif, J. A study of poly vinyl chloride / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. Journal of Polymer Research 18(5) (2011): 891-896.
- [25] Kim, H.-S., Yang, H.-S., and Kim, H.-J. Biodegradability and mechanical properties of agro-flour-filled polybutylene succinate biocomposites. Journal of Applied Polymer Science 97(4) (2005): 1513-1521.
- [26] Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C., and Thongsang, S. Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites. Polymer International 52(12) (2003): 1847-1855.
- [27] Chuayjuljit, S., Sirapapoj, C., and Boonmahitthisud, A. Effects of poly (butylene succinate) and ultrafine wollastonite on the physical properties of plasticized poly (vinyl chloride). Journal of Vinyl and Additive Technology 21(3) (2015): 220-227.
- [28] Rimdusit, S., Atthakorn, D., Damrongsakkul, S., Saramas, D., and Tiptipakorn, S. Mechanical, thermal, and water uptake characteristics of woodflour-filled polyvinyl chloride/acrylonitrile butadiene styrene blends. Journal of Applied Polymer Science 124(2) (2012): 943-950.
- [29] Lindström, A. and Hakkarainen, M. Environmentally friendly plasticizers for poly(vinyl chloride)—Improved mechanical properties and compatibility by using branched poly(butylene adipate) as a polymeric plasticizer. Journal of Applied Polymer Science 100(3) (2006): 2180-2188.
- [30] Hassan, E., Wei, Y., Jiao, H., and Yu, M. Dynamic Mechanical properties and Thermal stability of Poly(lactic acid) and poly(butylene succinate) blends composites. Journal of Fiber Bioengineering and Informatics 6(1) (2013): 85-94.
- [31] Bhatia, A., Gupta, R., Bhattacharya, S., and Choi, H. Compatibility of biodegradable poly (lactic acid)(PLA) and poly (butylene succinate)(PBS)

- blends for packaging application. Korea-Australia Rheology Journal 19(3) (2007): 125-131.
- [32] Rimdusit, S., Wongmanit, P., Damrongsakkul, S., Saramas, D., Jubsilp, C., and Dueramae, I. Characterizations of poly (vinyl chloride)/acrylonitrile styrene acrylate blends for outdoor applications. Engineering Journal 18(1) (2013): 105-118.
- [33] Majhi, S.K., Nayak, S.K., Mohanty, S., and Unnikrishnan, L. Mechanical and fracture behavior of banana fiber reinforced Polylactic acid biocomposites. International Journal of Plastics Technology 14(S1) (2010): 57-75.
- [34] Djidjelli, H., Martinez-Vega, J.J., Farenc, J., and Benachour, D. Effect of wood flour content on the thermal, mechanical and dielectric properties of poly (vinyl chloride). Macromolecular Materials and Engineering 287(9) (2002): 611-618.
- [35] Iulianelli, G., Tavares, M.B., and Luetkmeyer, L. Water absorption behavior and impact strength of PVC/wood flour composites. Chemistry and Chemical Technology 4(3) (2010): 226-299.
- [36] Sombatsompop, N., Yotinwattanakumtorn, C., and Thongpin, C. Influence of type and concentration of maleic anhydride grafted polypropylene and impact modifiers on mechanical properties of PP/wood sawdust composites. Journal of Applied Polymer Science 97(2) (2005): 475-484.
- [37] Kuan, C.-F., Kuan, H.-C., Ma, C.-C.M., and Huang, C.-M. Mechanical, thermal and morphological properties of water-crosslinked wood flour reinforced linear low-density polyethylene composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37(10) (2006): 1696-1707.
- [38] Zhang, Z., Zhang, J., and Liu, H. High-impact toughness poly(vinyl chloride)/( $\alpha$ -methylstyrene)-acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer/acrylic resin blends: thermal properties and toughening mechanism. Journal of Vinyl and Additive Technology 21(3) (2015): 205-214.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## สมบัติเชิงกลของพีวีซี, PBS, โพลีเมอร์ผสม PVC/PBS และ โพลีเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ก-1 สมบัติเชิงกลความทนแรงกระแทก, ความทนแรงดึง, โมดูลัสของยัง และการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพีวีซี, PBS, โพลีเมอร์ผสม PVC/PBS และ โพลีเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	elongation at break (%)
100/0/0	2.9 ± 0.1	66.5 ± 1.5	2148 ± 144.4	7.9 ± 1.4
0/100/0	4.2 ± 0.2	48.0 ± 0.5	636 ± 77.1	10.9 ± 0.5
90/10/0	3.2 ± 0.1	63.7 ± 1.0	1853.5 ± 52.0	10.6 ± 2.0
80/20/0	9.0 ± 0.4	44.8 ± 0.9	1157.5 ± 90.1	49.4 ± 3.7
70/30/0	7.3 ± 0.1	40.4 ± 1.8	1205 ± 72.9	43.2 ± 2.0
60/40/0	3.4 ± 0.1	28.7 ± 0.8	1151.8 ± 89.4	30.7 ± 0.3
50/50/0	2.8 ± 0.2	28.4 ± 1.4	951.1 ± 61.2	21.0 ± 0.8
80/20/10	5.3 ± 0.1	34.9 ± 1.6	2032 ± 99.8	24.3 ± 2.5
80/20/20	4.0 ± 0.1	34.3 ± 0.8	2178.6 ± 83.0	6.6 ± 1.0
80/20/30	3.6 ± 0.1	34.2 ± 0.5	2188.5 ± 35.0	3.5 ± 0.5

ตารางที่ ก-2 สมบัติเชิงกลความทนแรงดัดโค้ง และ โมดูลัสแรงดัดโค้งของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	flexural strength (MPa)	flexural modulus (MPa)
100/0/0	88.0 ± 0.3	2562.5 ± 22.8
0/100/0	43.9 ± 0.5	694.5 ± 19.8
90/10/0	85.1 ± 1.5	1611.4 ± 66.5
80/20/0	40.5 ± 0.3	767.8 ± 33.6
70/30/0	38.0 ± 0.4	675.0 ± 17.6
60/40/0	39.8 ± 0.4	619.1 ± 21.2
50/50/0	39.0 ± 0.2	600.3 ± 37.2
80/20/10	43.5 ± 0.4	789.6 ± 24.1
80/20/20	47.7 ± 0.4	1368.4 ± 52.1
80/20/30	66.3 ± 1.5	1986.2 ± 90.1

ตารางที่ ก-3 สมบัติเชิงกลความทนแรงกระแทกพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2.8	2.8	2.7	2.8	2.9	2.8	0.1
0/100/0	4.2	4.1	4.2	4.4	3.9	4.2	0.2
90/10/0	3.1	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	0.1
80/20/0	9.1	8.6	8.5	9.5	9.4	9.0	0.4
70/30/0	7.2	7.3	7.3	7.2	7.3	7.3	0.1
60/40/0	3.5	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	0.1
50/50/0	2.9	3.0	2.8	2.7	2.6	2.8	0.2
80/20/10	5.4	5.3	5.2	5.2	5.4	5.3	0.1
80/20/20	4.1	4.0	3.9	4.1	4.2	4.0	0.1
80/20/30	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.6	0.1

ตารางที่ ก-4 สมบัติเชิงกลความทนแรงดึงของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	tensile strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	68.0	65.0	65.5	67.0	64.0	65.5	1.5
0/100/0	48.5	47.5	47.8	48.0	48.4	48.0	0.5
90/10/0	64.7	62.7	63.5	63.5	64.5	63.7	1.0
80/20/0	44.6	46.0	43.9	44.8	45.2	44.8	0.9
70/30/0	42.2	38.6	41.8	39.4	40.8	40.4	1.8
60/40/0	29.5	27.9	28.7	29.3	27.9	28.7	0.8
50/50/0	29.8	27.0	28.8	26.9	29.3	28.4	1.4
80/20/10	36.3	33.9	36.3	35.2	33.1	34.9	1.6
80/20/20	35.1	33.5	34.2	33.5	35.4	34.3	0.8
80/20/30	34.7	33.9	34.6	34.5	33.8	34.2	0.5



ตารางที่ ก-5 สมบัติเชิงกลยังส์มอดุลัสของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	Young's modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2033.5	2198.9	2185.3	2188.7	2133.4	2148.5	44.4
0/100/0	568.7	591.2	610.3	647.6	764.8	636.0	77.1
90/10/0	1837.9	1936.5	1901.0	1842.2	1812.7	1853.5	52.0
80/20/0	1143.1	1067.5	1112.9	1240.0	1223.6	1157.5	90.1
70/30/0	1100.7	1230.6	1275.5	1203.4	1138.5	1205.6	72.9
60/40/0	1232.4	1173.8	1239.4	1236.3	1039.7	1151.8	89.4
50/50/0	1085.8	972.6	887.8	1004.4	1034.6	951.1	61.2
80/20/10	1918.8	2152.7	2091.9	1941.8	2058.4	2032.8	99.8
80/20/20	2286.8	2222.6	2214.3	2095.0	2088.8	2178.6	83.0
80/20/30	2156.4	2118.5	2201.9	2198.3	2154.2	2188.5	35.0

ตารางที่ ก-6 สมบัติเชิงการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	elongation at break (%)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	6.5	6.4	8.8	7.7	9.7	7.9	1.4
0/100/0	11.0	10.8	10.2	10.7	11.4	10.9	0.5
90/10/0	10.7	8.5	12.7	12.4	8.6	10.6	2.0
80/20/0	46.3	45.4	48.7	53.1	51.0	49.4	3.7
70/30/0	45.2	41.9	44.1	44.3	40.3	43.2	2.0
60/40/0	30.9	30.5	30.6	31.0	30.4	30.7	0.3
50/50/0	19.9	20.7	22.0	21.5	21.0	21.0	0.8
80/20/10	23.9	24.1	28.0	22.0	25.8	24.3	2.5
80/20/20	6.8	7.6	6.7	6.6	5.1	6.6	1.0
80/20/30	3.6	2.8	2.5	4.5	3.8	3.5	1.0

ตารางที่ ก-7 สมบัติเชิงกลความทนแรงดัดโค้งของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	flexural strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	88.2	88.4	88.0	87.6	87.8	88.0	0.3
0/100/0	43.7	44.3	44.4	43.7	43.1	43.9	0.5
90/10/0	84.7	85.2	87.3	85.4	83.0	85.1	1.5
80/20/0	40.8	40.7	40.3	40.5	40.2	40.5	0.3
70/30/0	38.2	38.4	37.7	37.6	37.7	38.0	0.4
60/40/0	39.2	39.4	39.9	40.3	40.1	39.8	0.3
50/50/0	39.1	39.0	38.5	39.0	38.8	39.0	0.2
80/20/10	43.1	44.4	43.0	43.1	43.8	43.5	0.4
80/20/20	48.1	47.3	47.5	47.9	48.0	47.7	0.4
80/20/30	66.2	66.7	63.8	68.1	66.3	66.2	1.5

ตารางที่ ก-8 สมบัติเชิงกลมอดูลัสดัดโค้งของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	flexural modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2552.1	2547.2	2546.3	2600.9	2565.5	2562.5	22.8
0/100/0	677.9	699.1	696.9	674.4	723.9	694.5	19.8
90/10/0	1555.6	1592.4	1648.0	1554.1	1706.0	1611.4	66.5
80/20/0	739.4	740.7	806.6	750.2	801.8	767.8	33.6
70/30/0	658.4	698.2	664.2	689.4	664.6	675.0	17.6
60/40/0	594.9	597.0	639.9	631.2	635.3	619.1	21.2
50/50/0	579.5	575.5	596.0	584.7	665.3	600.3	37.2
80/20/10	775.1	778.9	807.0	764.7	822.3	789.6	24.1
80/20/20	1282.7	1359.1	1408.7	1382.8	1408.6	1368.4	52.1
80/20/30	2032.2	1807.7	2032.8	2044.6	2023.1	1986.2	90.1

## ภาคผนวก ข

## สมบัติทางความร้อนของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ข-1 สมบัติทางความร้อน ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ), อุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อน (heat distortion temperature, HDT) และอุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat softening temperature, VST) ของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	heat distortion temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Vicat softening temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
100/0/0	110	74.8 $\pm$ 0.1	69.4 $\pm$ 0.3
0/100/0	-10	99.6 $\pm$ 0.1	100.2 $\pm$ 0.1
90/10/0	95	65.3 $\pm$ 0.5	55.8 $\pm$ 0.3
80/20/0	80	52.6 $\pm$ 0.2	53.5 $\pm$ 0.1
70/30/0	81	52.7 $\pm$ 0.2	50.8 $\pm$ 0.6
60/40/0	78	54.8 $\pm$ 0.3	49.8 $\pm$ 0.1
50/50/0	85	66.4 $\pm$ 0.1	53.5 $\pm$ 0.2
80/20/10	78	53.3 $\pm$ 0.2	48.3 $\pm$ 0.1
80/20/20	80	57.5 $\pm$ 0.2	50.7 $\pm$ 0.3
80/20/30	81	62.7 $\pm$ 0.2	52.2 $\pm$ 0.2

ตารางที่ ข-2 สมบัติทางความร้อนหาอุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน (heat distortion temperature, HDT) ของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	heat distortion temperature (°C)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	74.8	74.9	73.7	74.7	75.9	74.8	0.1
0/100/0	99.7	99.6	99.4	99.5	99.7	99.6	0.1
90/10/0	65.23	65.6	65.8	64.8	65.3	65.3	0.5
80/20/0	52.1	52.9	52.4	52.8	52.88	52.6	0.3
70/30/0	52.9	52.6	52.9	52.5	52.8	52.7	0.1
60/40/0	54.9	54.5	55.1	54.5	55.1	54.8	0.3
50/50/0	66.3	66.44	66.5	66.3	66.5	66.4	0.1
80/20/10	57.7	59.6	57.4	58.5	57.75	60.5	0.2
80/20/20	53.2	53.2	53.5	53.1	53.55	53.3	0.2
80/20/30	57.6	57.8	57.7	57.3	57.33	57.5	0.2

ตารางที่ ข-3 สมบัติทางความร้อนหาอุณหภูมิการอ่อนตัว (Vicat softening temperature, VST) ของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	Vicat softening temperature (°C)						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	69.66	69.45	69.7	69.1	69.4	69.4	0.2
0/100/0	100.1	100.3	100.3	100.1	100.4	100.2	0.1
90/10/0	56	55.5	55.5	56.1	56.0	55.8	0.2
80/20/0	53.3	53.4	53.6	53.4	53.6	53.4	0.1
70/30/0	51.2	50.9	50.2	50.4	51.5	50.8	0.6
60/40/0	49.6	49.8	49.9	49.7	49.9	49.7	0.1
50/50/0	53.4	53.5	53.9	53.3	53.7	53.5	0.2
80/20/10	48.4	48.2	48.2	48.3	48.4	48.3	0.1
80/20/20	50.5	51.1	50.9	50.4	50.6	50.7	0.2
80/20/30	52.4	52	52.4	52.2	52.3	52.2	0.1

## ภาคผนวก ค

สมบัติทางเชิงกลความทนแรงกระแทกของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

ตารางที่ ค-1 สมบัติความแรงกระแทกของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )			
	0 month	1 month	2 month	3 month
100/0/0	2.9 ± 0.1	2.6 ± 0.3	2.5 ± 0.1	2.4 ± 0.1
0/100/0	4.2 ± 0.2	2.2 ± 0.5	2.0 ± 0.1	1.1 ± 0.8
90/10/0	3.2 ± 0.1	2.9 ± 0.1	2.7 ± 0.3	2.6 ± 0.1
80/20/0	9.0 ± 0.4	5.5 ± 0.7	4.7 ± 0.3	4.2 ± 0.7
70/30/0	7.3 ± 0.1	5.2 ± 0.7	4.2 ± 0.6	4.1 ± 0.3
60/40/0	3.4 ± 0.1	2.9 ± 0.3	2.7 ± 0.3	2.5 ± 0.5
50/50/0	2.8 ± 0.2	2.6 ± 0.2	2.5 ± 0.6	2.3 ± 0.5
80/20/10	5.3 ± 0.1	3.4 ± 0.5	3.0 ± 0.1	2.9 ± 0.3
80/20/20	4.0 ± 0.1	3.4 ± 0.2	2.7 ± 0.3	2.5 ± 0.5
80/20/30	3.6 ± 0.1	2.6 ± 0.2	2.3 ± 0.7	2.1 ± 0.4



ตารางที่ ค-2 สมบัติความแรงกระแทกของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2.8	2.8	2.7	2.8	2.9	2.9	0.1
0/100/0	4.2	4.1	4.2	4.4	3.9	4.2	0.2
90/10/0	3.1	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	0.1
80/20/0	9.1	8.6	8.5	9.5	9.4	9.0	0.4
70/30/0	7.2	7.3	7.3	7.2	7.3	7.3	0.1
60/40/0	3.5	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	0.1
50/50/0	2.9	3.0	2.8	2.7	2.6	2.8	0.2
80/20/10	5.4	5.3	5.2	5.2	5.4	5.3	0.1
80/20/20	4.1	4.0	3.9	4.1	4.2	4.0	0.1
80/20/30	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.6	0.1

ตารางที่ ค-3 สมบัติความแรงกระแทกของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 1 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2.5	2.9	2.3	2.7	2.6	2.6	0.2
0/100/0	2.5	2.7	2.1	2.3	1.7	2.2	0.3
90/10/0	2.9	2.8	3	2.7	3.1	2.9	0.1
80/20/0	5.5	6.2	4.8	4.6	6.0	5.4	0.7
70/30/0	5.2	5.9	4.5	5.4	4.9	5.1	0.75
60/40/0	2.9	3.2	2.6	3.1	2.5	2.8	0.34
50/50/0	2.6	2.8	2.5	2.7	2.3	2.5	0.2
80/20/10	3.4	3.9	3.1	2.9	3.8	3.4	0.5
80/20/20	3.4	3.6	3.5	3.2	3.5	3.4	0.2
80/20/30	2.6	2.8	2.8	2.5	2.4	2.6	0.2

ตารางที่ ค-4 สมบัติความแรงกระแทกของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 2 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2.5	2.4	2.6	2.4	2.5	2.5	0.1
0/100/0	2.0	2.1	2.0	1.9	2.2	2.0	0.1
90/10/0	2.7	2.4	3.0	2.6	2.8	2.7	0.3
80/20/0	4.7	4.4	5.0	4.3	4.8	4.7	0.3
70/30/0	4.2	4.8	3.9	3.8	4.4	4.2	0.6
60/40/0	2.7	3.0	2.4	2.6	3.1	2.7	0.3
50/50/0	2.5	3.1	1.9	2.1	2.9	2.5	0.6
80/20/10	3.0	3.1	2.9	3.1	2.9	3.0	0.1
80/20/20	2.7	2.4	3.0	2.7	2.6	2.7	0.3
80/20/30	3.0	2.4	2.7	2.3	1.5	2.3	0.7

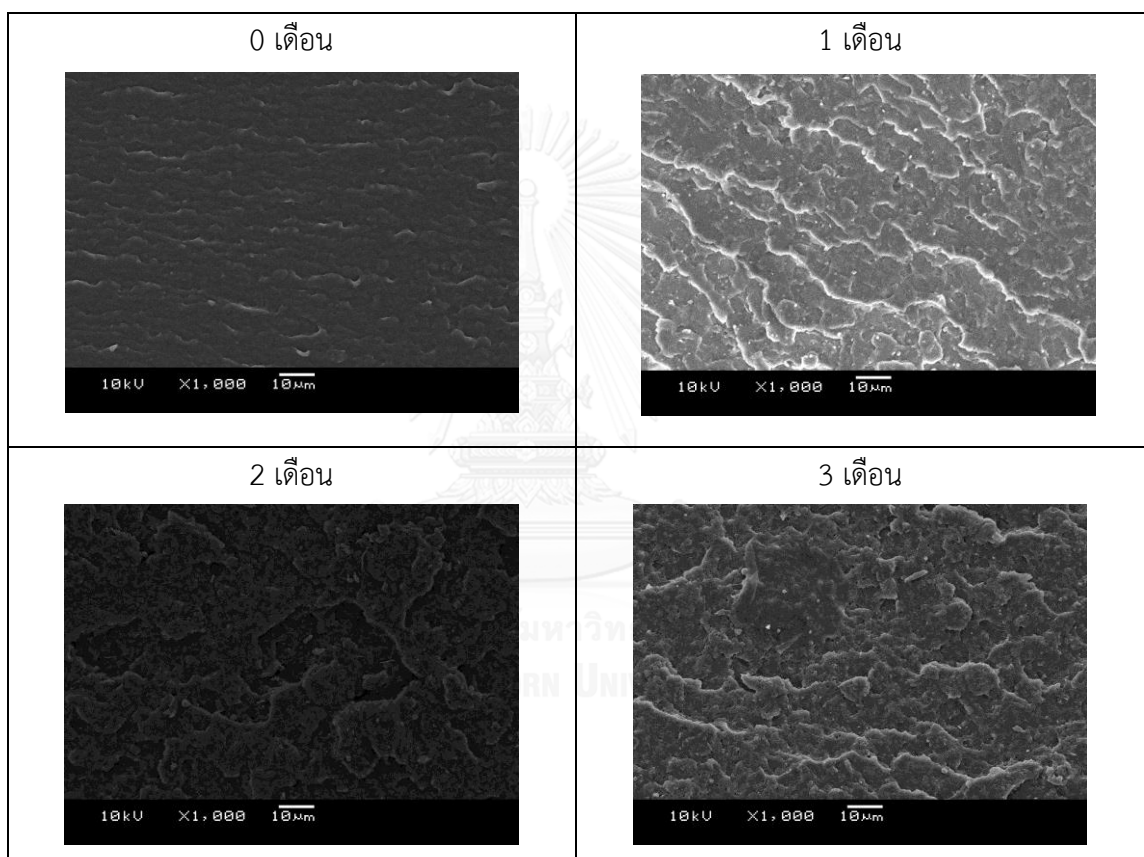
ตารางที่ ค-5 สมบัติความแรงกระแทกของพีวีซี, PBS, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )						
	1	2	3	4	5	AVG	SD
100/0/0	2.4	2.5	2.3	2.2	2.5	2.3	0.1
0/100/0	1.1	1.9	0.7	0.5	1.2	1.1	0.8
90/10/0	2.6	2.5	2.7	2.6	2.4	2.6	0.1
80/20/0	4.2	3.7	4.9	4.2	3.8	4.2	0.7
70/30/0	4.1	3.8	4.4	3.9	4.2	4.1	0.3
60/40/0	2.4	2.9	2.2	2.7	2.5	2.65	0.5
50/50/0	2.3	2.8	1.8	2.2	2.4	2.3	0.5
80/20/10	2.9	3.2	2.6	3.1	2.8	2.9	0.3
80/20/20	2.5	3.0	2.0	1.5	3.5	2.5	0.5
80/20/30	2.1	2.5	1.9	2.0	2.1	2.1	0.4

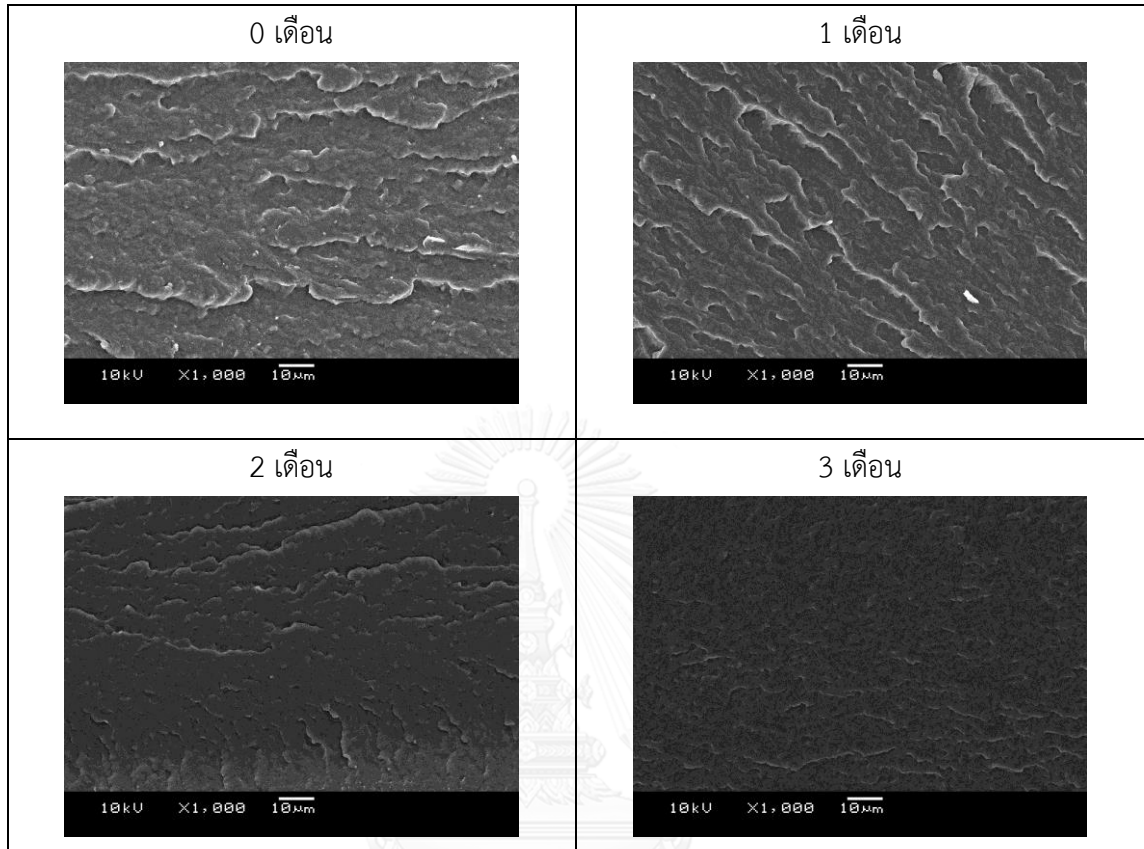
## ภาคผนวก ง

สัณฐานวิทยาของพีวีซี,พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, พอลิเมอร์ผสม PVC/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิเมอร์คอมพอลสิต PVC/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

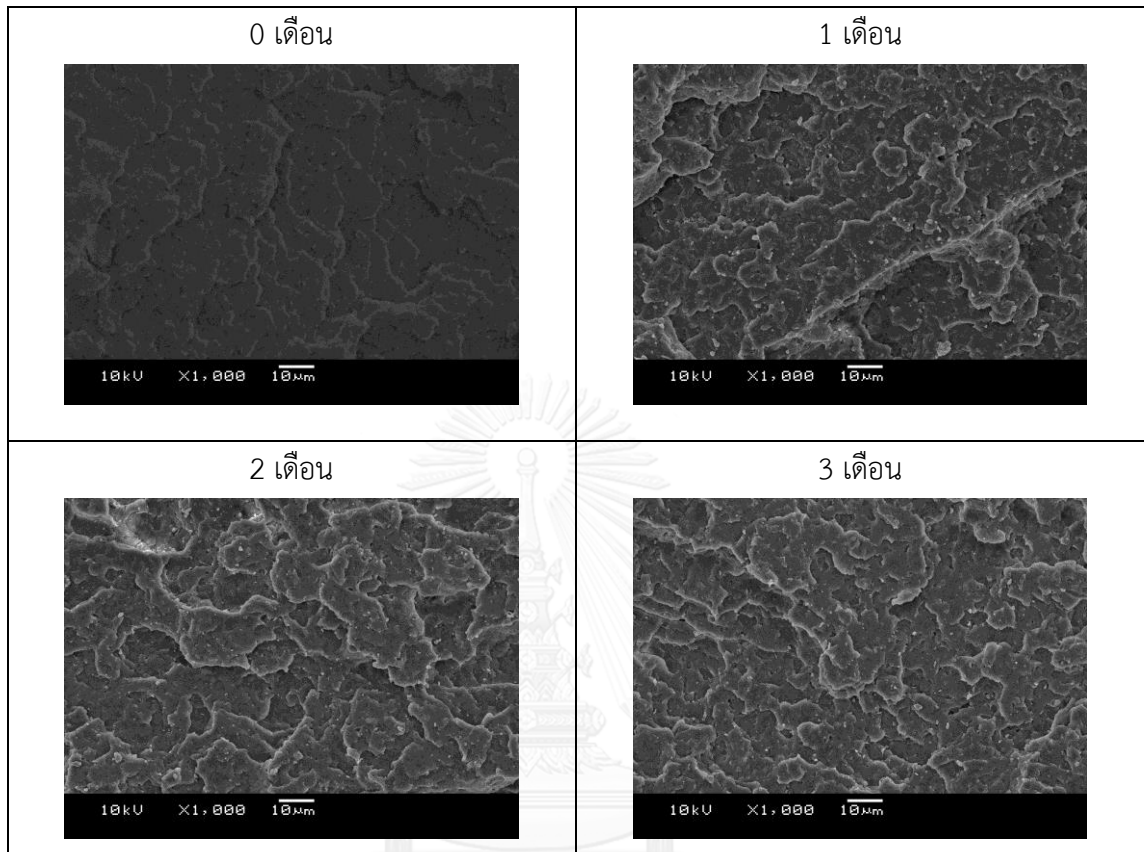
รูปที่ ง-1 สัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบ PVC จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



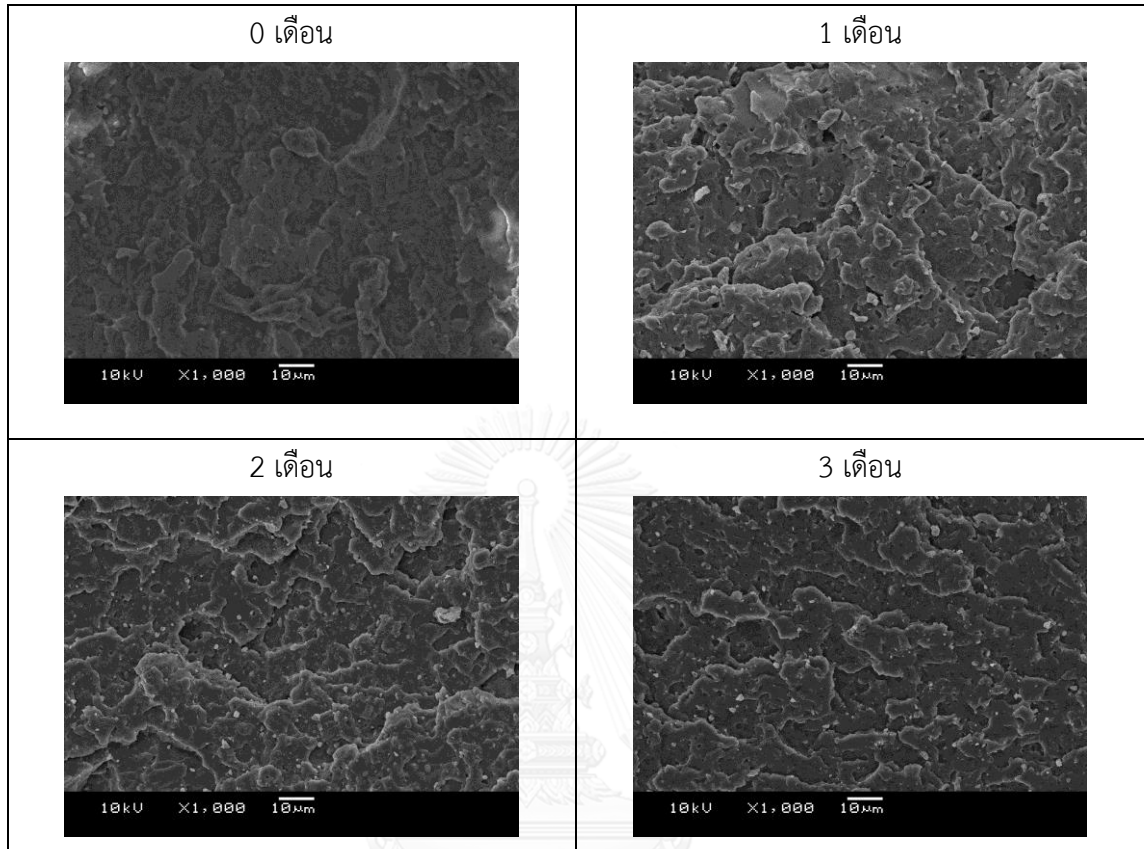
รูปที่ ง-2 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบ PBS จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



รูปที่ ง-3 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 90/10 จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

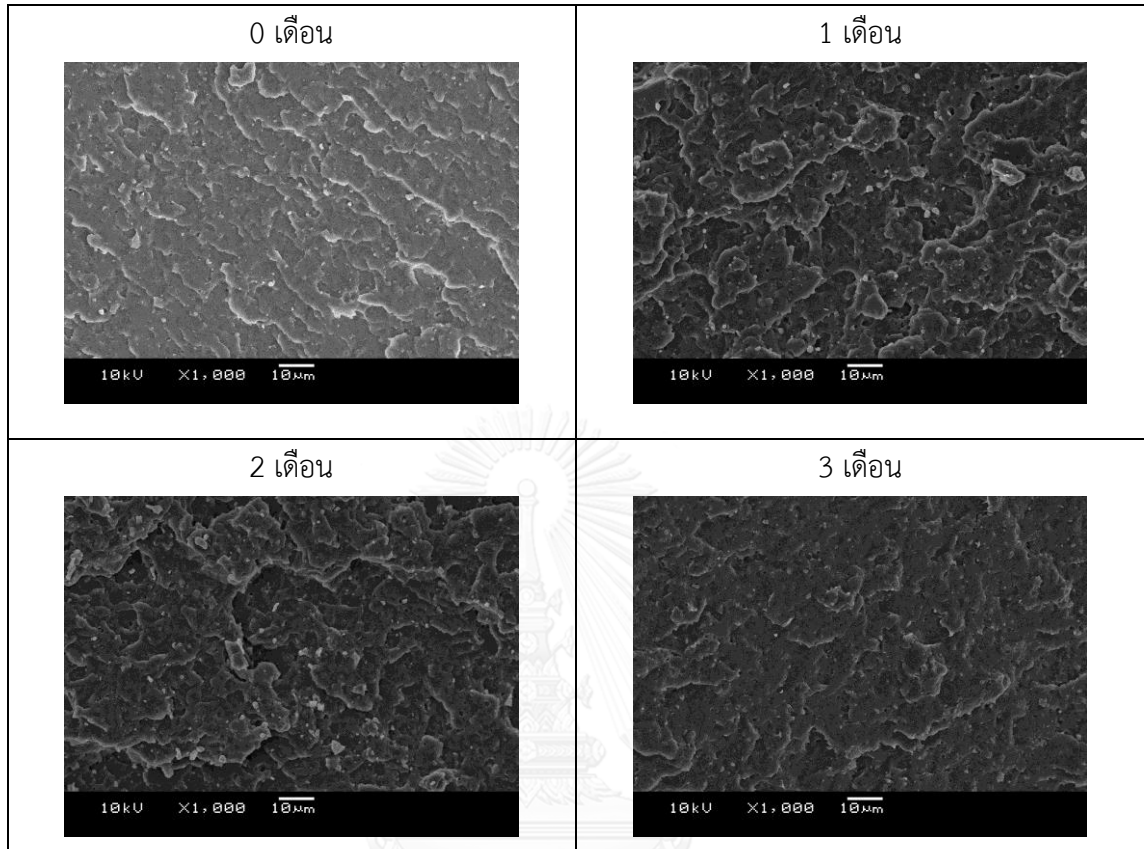


รูปที่ ง-4 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 80/20 จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

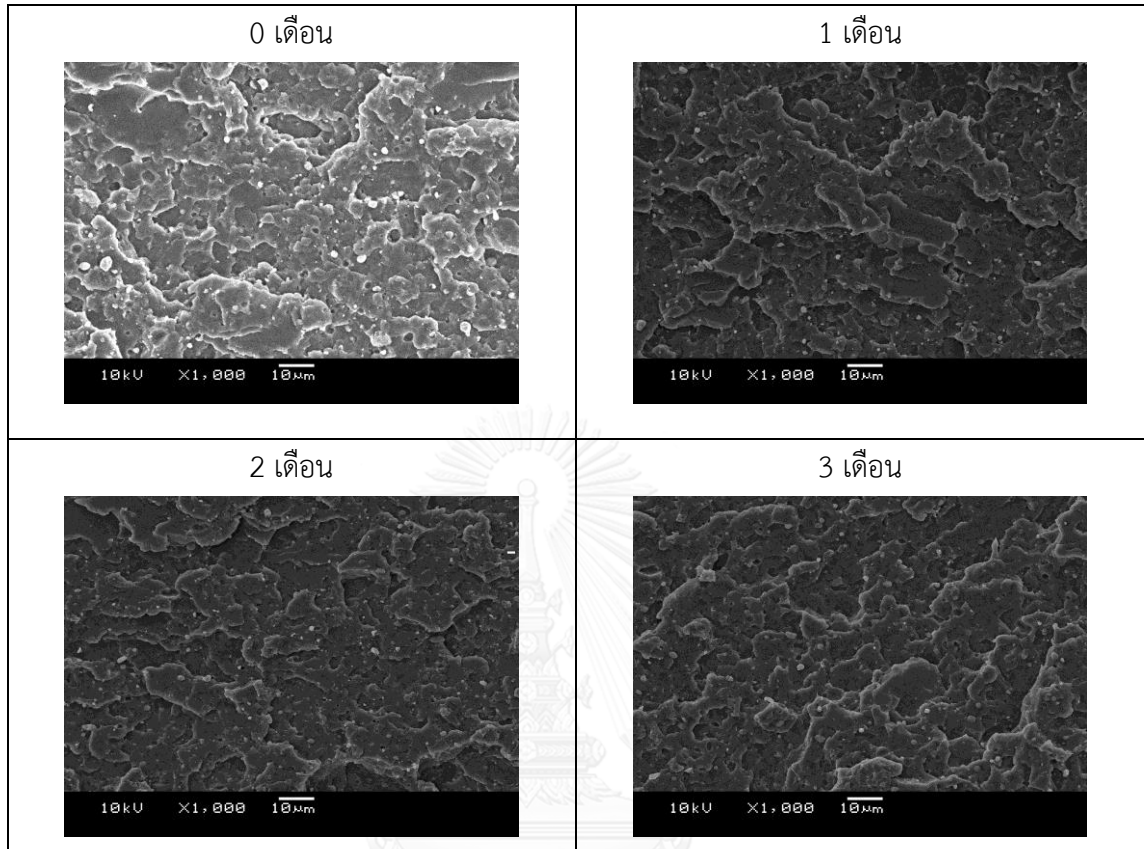




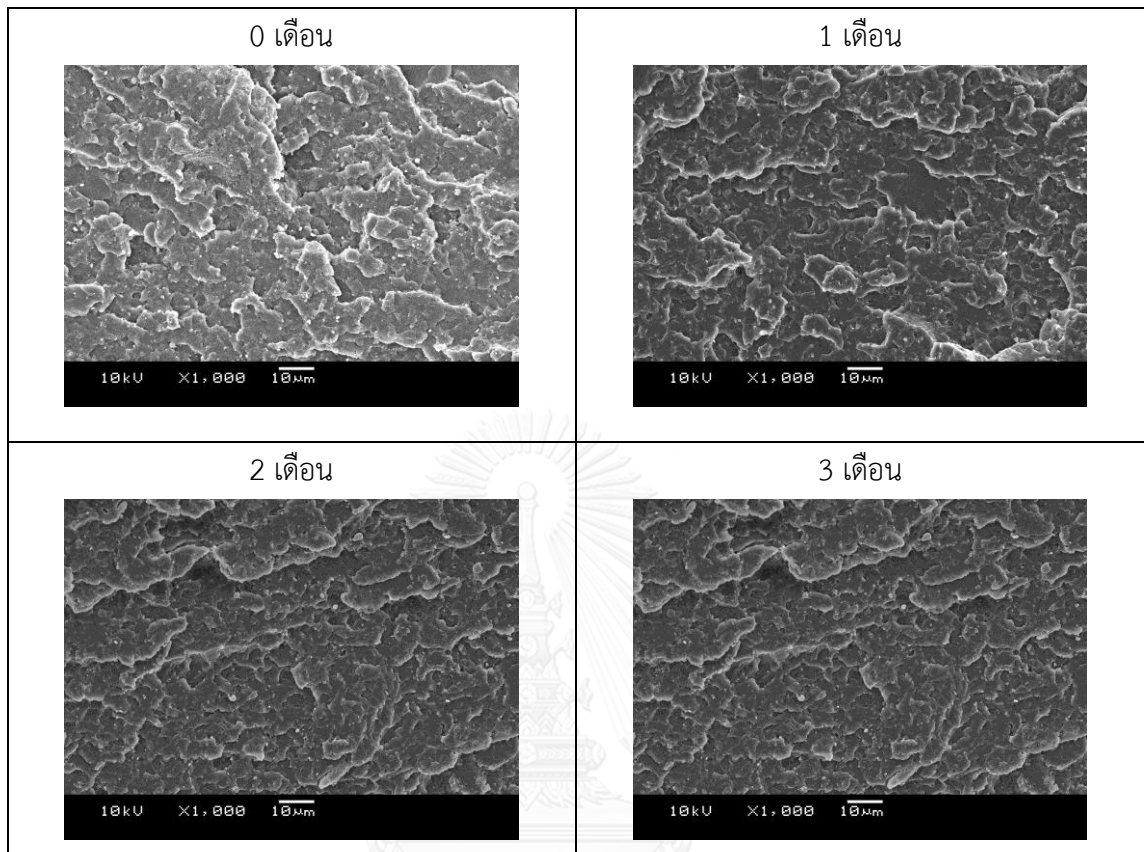
รูปที่ ง-5 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 70/30 จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



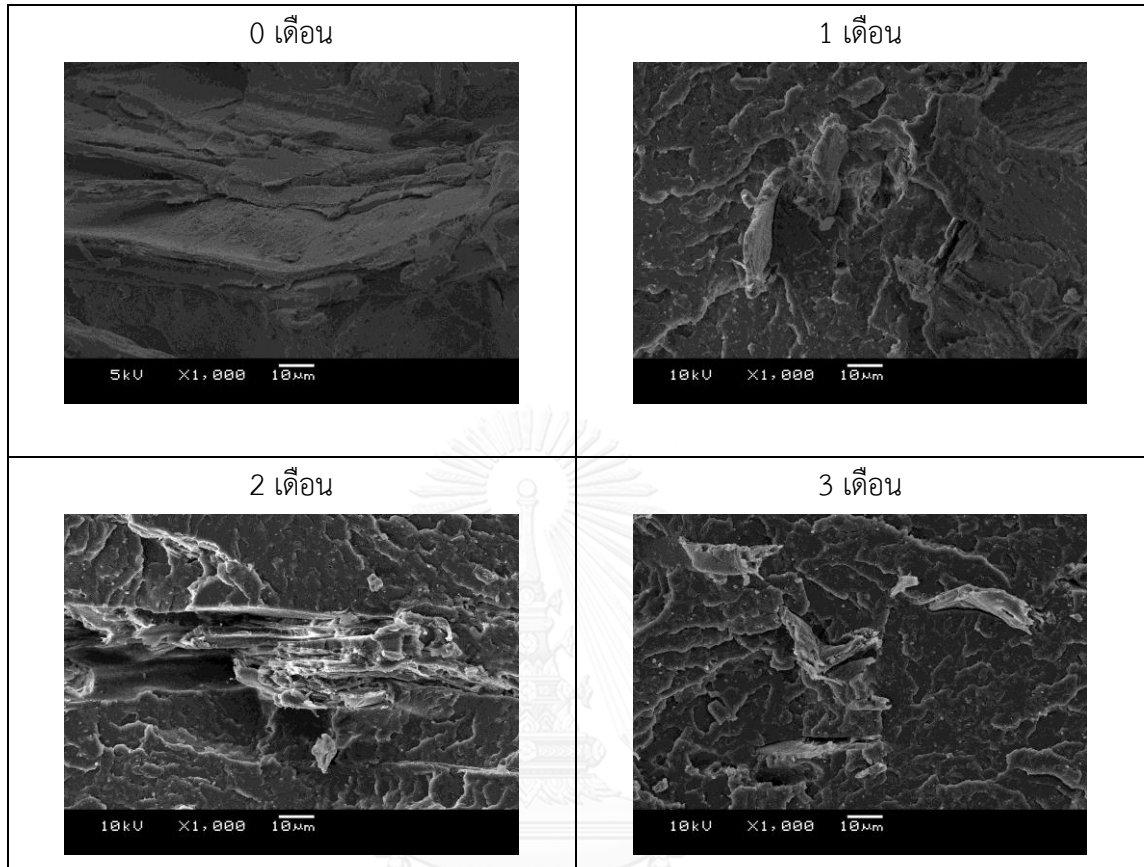
รูปที่ ง-6 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 60/40 จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



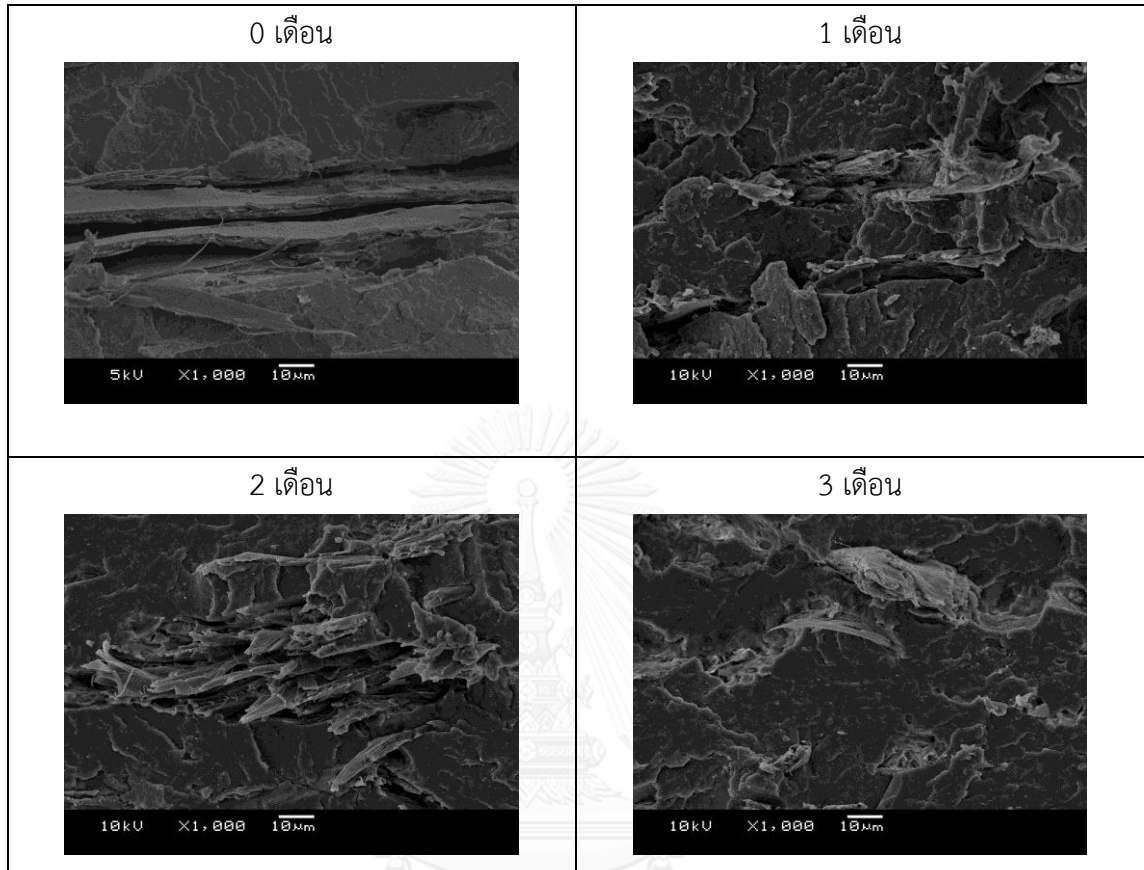
รูปที่ ง-7 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม PVC/PBS 50/50 จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



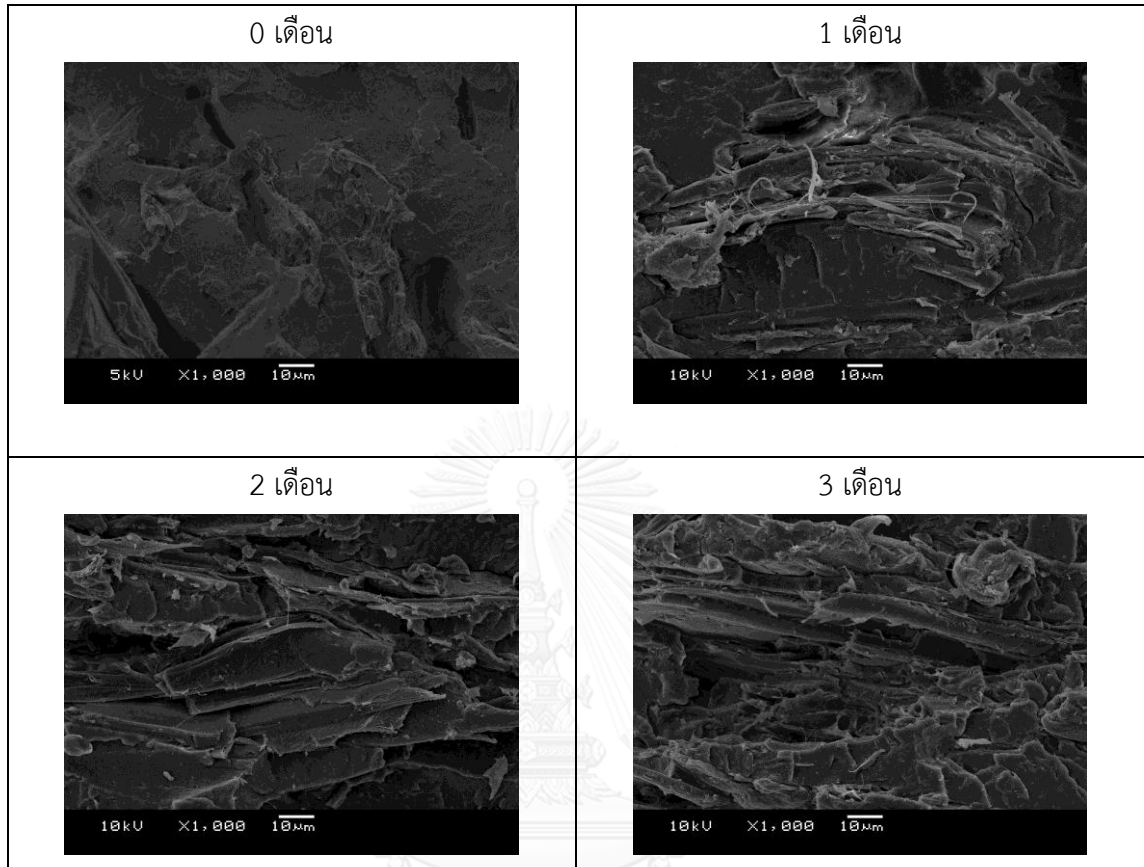
รูปที่ ง-8 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS /WF 80/20/10 จาก การทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



รูปที่ ง-9 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS /WF 80/20/20 จาก การทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



รูปที่ ง-10 สันฐานวิทยาของชั้นทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต PVC/PBS /WF 80/20/30  
จากการทดสอบความทนแรงกระแทกหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจุไรรัตน์ คงทัน เกิดเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2555 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2558 โดยเข้าร่วมเสนอผลงานในงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 41 (วทท 41) (The 41 st Congress on Science and Technology of Thailand (STT 41)) ระหว่างวันที่ 5-8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย

