

การดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟเพื่อใช้เป็นสารเคลือบ
สำหรับบอร์ดแกนเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต



นางสาววนาลี ตันศิริ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODIFICATION OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) BY REACTIVE EXTRUSION TECHNIQUE
AS A COUPLING AGENT FOR ORGANOCCLAY/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) COMPOSITES

Miss Vanalee Tansiri



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile
Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตัดแปรรูปพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟเพื่อใช้เป็นสารเคลือบสำหรับออร์แกนอเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต
โดย	นางสาววนาลี ต้นศิริ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อัจจงค์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีภูทิจ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

วนาลี ต้นศิริ : การดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟเพื่อใช้เป็นสารคู่ควบสำหรับออร์แกนอเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต (MODIFICATION OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) BY REACTIVE EXTRUSION TECHNIQUE AS A COUPLING AGENT FOR ORGANOCLAY/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราช, 147 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการนำเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟมาดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นสารคู่ควบสำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต รวมทั้งศึกษาผลของชนิดและปริมาณการใช้สารคู่ควบที่เตรียมได้ต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ออร์แกนอเคลย์คอมพอสิต งานวิจัยเริ่มจากการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยการต่อกิ่งในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลต จากนั้นวิเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีเพื่อยืนยันผลของการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยหมู่ฟังก์ชันทั้งสองชนิด ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลตลงบนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ จากนั้นนำสารคู่ควบดังกล่าวมาเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต โดยใช้ออร์แกนอเคลย์ในปริมาณสัดส่วนต่างๆ เป็นสารเสริมแรง แล้วเปรียบเทียบผลของการใช้สารคู่ควบแต่ละชนิดต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต พบว่าคอมพอสิตที่ใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควรมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ อีกทั้งยังเพิ่มอุณหภูมิการหลอมผลึกของคอมพอสิตได้เล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าคอมพอสิตที่ใช้สารคู่ควบไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและสารเสริมแรงออร์แกนอเคลย์ที่ 5 และ 0.5 phr ตามลำดับ มีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทกดีที่สุด เนื่องจากสารคู่ควบไปช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกนอเคลย์ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบสัณฐานวิทยา สำหรับสมบัติทางความร้อนเมื่อใช้สารคู่ควบชนิดนี้พบว่าไม่ส่งผลต่อค่าของอุณหภูมิการสลายตัวของคอมพอสิต

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
เทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2557

5672173723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLY(BUTYLENE SUCCINATE) / COMPOSITE / ORGANOCCLAY / COUPLING AGENT

VANALEE TANSIRI: MODIFICATION OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) BY REACTIVE EXTRUSION TECHNIQUE AS A COUPLING AGENT FOR ORGANOCCLAY/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) COMPOSITES. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 147 pp.

In this research, the reactive extrusion technique was applied in order to modify poly(butylene succinate) with appropriate functional groups which was then utilized as a coupling agent for poly(butylene succinate) composites. The effects of types and amounts of the prepared coupling agents on the properties of organoclay/poly(butylene succinate) composites were also investigated. Initially, the modification of poly(butylene succinate) was carried out by grafting with maleic anhydride and glycidyl methacrylate in a twin-screw extruder. The obtained maleic anhydride grafted poly(butylene succinate) and glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) were analyzed by FTIR and NMR spectroscopy techniques to confirm the successful grafting. The results illustrated that both functional groups could be grafted onto poly(butylene succinate) by this technique. After that, the coupling agents were used for preparing poly(butylene succinate) composites filled with organoclay at various ratios as a reinforcement. The mechanical and thermal properties of poly(butylene succinate) composites with two different coupling agents were compared. It was found that the composites with glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) as a coupling agent showed better mechanical properties than those of composites with maleic anhydride grafted poly(butylene succinate) as a coupling agent. The melting temperature of composites with glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) as a coupling agent also slightly increased. Furthermore, the composites with glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) and organoclay at respectively 5 and 0.5 parts per hundred resin (phr) exhibited the highest mechanical properties, namely, tensile strength, elongation at break and impact strength due to the fact that the coupling agent promotes interaction between poly(butylene succinate) and organoclay. The results were in agreement with the morphological study. As for the thermal property, the utilization of coupling agent did not significantly affect the thermal degradation temperature of the composites.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งการให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การสนับสนุนเงินทุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนจนถึงการดูแลเอาใจใส่และเสียสละเวลาในการตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา ที่สละเวลามาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจและรองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข ที่สละเวลามาเป็นกรรมสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุน Project to Form a Hub for Human Resources development and New Industry Creation และ Professor Takaomi Kobayashi จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีนาคาโอกะ ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยที่ต่างประเทศ

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ตลอดมาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	3
2.1.1 ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	3
2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	4
2.1.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	5
2.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต.....	8
2.2.1 นิยามของคอมพอสิต.....	8
2.2.2 ประเภทของคอมพอสิต.....	9
2.2.3 ข้อดีของคอมพอสิต.....	10
2.2.4 ตัวเติมเสริมแรง.....	11
2.3 มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรหรือออร์แกโนเคลย์.....	11
2.3.1 การกระจายตัวของออร์แกโนเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	13

2.3.2	เทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์	14
2.3.3	ลักษณะของเคลย์/พอลิเมอร์คอมพอสิต	15
2.4	สารคู่ควบ	16
2.4.1	กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างตัวเติมหรือสารเสริมแรงกับพอลิเมอร์โดยการใช้สารคู่ควบ	16
2.4.2	วิธีการนำสารคู่ควบไปใช้งาน	17
2.4.3	พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	17
2.4.4	พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต	18
2.5	กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน	19
2.5.1	การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยกระบวนการอัดรีด	19
2.5.2	กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการฉีด	22
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย	27
3.2	วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	27
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.4	ขั้นตอนการทดลอง	30
3.4.1	การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซึกซิเนต	30
3.4.2	ขั้นตอนการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซิดิลเมทาคริเลต	31
3.4.2.1	การกราฟต์พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	31
3.4.2.2	การกราฟต์พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต	33
3.4.3	การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซิดิลเมทาคริเลต	34

3.4.3.1 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	34
3.4.3.2 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	34
3.4.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	35
3.4.5 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์และชิ้นงาน.....	36
3.4.6 การทดสอบสมบัติของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	41
3.4.6.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	41
3.4.6.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา.....	42
3.4.6.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	43
3.4.6.4 การทดสอบสมบัติด้านความเหนียว.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	46
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์.....	46
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	46
4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ ¹ H-NMR.....	47
4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	47
4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	47
4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ ¹ H-NMR.....	48
4.2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ ¹³ C-NMR.....	49
4.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	50

4.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	50
4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^1\text{H-NMR}$	51
4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^{13}\text{C-NMR}$	52
4.4 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	53
4.5 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต.....	54
4.6 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์เพื่อศึกษาชนิดของสารคู่ควบที่ใช้.....	55
4.6.1 สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์.....	56
4.6.1.1 สมบัติด้านแรงดึง.....	56
4.6.1.2 ความทนแรงดัดโค้ง.....	59
4.6.1.3 ความทนแรงกระแทก.....	60
4.6.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์.....	61
4.6.3 ความหนืด.....	62
4.7 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์เพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและสารเสริมแรง.....	64
4.7.1 สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์.....	64
4.7.1.1 สมบัติด้านแรงดึง.....	64
4.7.1.2 ความทนแรงดัดโค้ง.....	67
4.7.1.3 ความทนแรงกระแทก.....	68
4.7.2 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์.....	69
4.7.2.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	69
4.7.2.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	73
4.7.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์.....	76

4.7.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	76
4.7.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก ก สมบัติด้านแรงดึง	91
ภาคผนวก ข ความทนแรงดัดโค้ง.....	106
ภาคผนวก ค ความทนแรงกระแทก	110
ภาคผนวก ง TGA Thermogram ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต	114
ภาคผนวก จ DSC Thermogram ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต.....	124
ภาคผนวก ฉ XRD pattern ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต.....	134
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	147

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	33
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์.....	37
ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	39
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ที่ใช้ในการศึกษาชนิดของสาร คู่ควบ	39
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ที่ใช้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างสาร คู่ควบและตัวเติมเสริมแรง	40
ตารางที่ 4.1 ผลการไทเทรตเพื่อหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	54
ตารางที่ 4.2 ผลการไทเทรตเพื่อหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วย ไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	55
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คอมพอสิต.....	61
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Bragg.....	75
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกโนเคลย์ และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	77
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิการหลอมผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึก และ ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกโนเคลย์และสารคู่ควบใน ปริมาณต่างๆ.....	80

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	5
รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี.....	6
รูปที่ 2.3 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมัก.....	6
รูปที่ 2.4 การแบ่งประเภทของคอมพอสิตและสารเสริมแรง.....	10
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	12
รูปที่ 2.6 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์.....	13
รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของแร่ดินในพอลิเมอร์.....	13
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBS-g-MA).....	17
รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารเสริมแรงและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	18
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA).....	18
รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารเสริมแรงและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	19
รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด.....	20
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว.....	20
รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	21
รูปที่ 2.15 สกรูคู่แบบหมุนทางเดียว (co-rotating twin screw).....	21
รูปที่ 2.16 สกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin screw).....	21
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก.....	22
รูปที่ 2.18 ปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ (a) PE-g-MA และ (b) PE-g-GMA	25

รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	31
รูปที่ 3.2 เทคนิคการรีฟลักซ์.....	32
รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28.....	32
รูปที่ 3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์	35
รูปที่ 3.5 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ของ JEOL รุ่น AL-400.....	36
รูปที่ 3.6 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ของ JEOL รุ่น ECA-400.....	36
รูปที่ 3.7 เครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery รุ่น A25	38
รูปที่ 3.8 เครื่องฉีดพลาสติกของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC	38
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR100K	41
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR500.....	42
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD	42
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV	43
รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BRUKER AXS รุ่น Diffraktometer D8.....	43
รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851.....	44
รูปที่ 3.15 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Rigaku.....	44
รูปที่ 3.16 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo.....	45
รูปที่ 3.17 เครื่องรีโอมิเตอร์ของ Anton Paar รุ่น Physica MCR 301	45
รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สังเคราะห์ (Synthesized PBS) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า (Commercial PBS)	46
รูปที่ 4.2 ¹ H-NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สังเคราะห์ (Synthesized PBS) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า (Commercial PBS).....	47
รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า.....	48

รูปที่ 4.4 ¹ H-NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า.....	49
รูปที่ 4.5 ¹³ C-NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า.....	50
รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า.....	51
รูปที่ 4.7 ¹ H-NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า.....	52
รูปที่ 4.8 ¹³ C-NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า.....	53
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	57
รูปที่ 4.10 โมดูลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	58
รูปที่ 4.11 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต ...	59
รูปที่ 4.12 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	60
รูปที่ 4.13 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	61
รูปที่ 4.14 ความหนืดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	63
รูปที่ 4.15 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.16 โมดูลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	66
รูปที่ 4.17 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.18 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	68

รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	69
รูปที่ 4.20 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ	70
รูปที่ 4.21 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของออร์แกนอเคลย์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีออร์แกนอเคลย์ในปริมาณต่างๆ.....	74
รูปที่ 4.22 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของออร์แกนอเคลย์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ	74
รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.24 TGA เทอร์โมแกรมของออร์แกนอเคลย์.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะพลาสติกสะสมเพราะเป็นพลาสติกประเภทกำจัดได้ยากหรือต้องใช้เวลาในการสลายตัวเป็นเวลานาน ซึ่งนับวันปัญหาดังกล่าวนับแต่จะทวีความรุนแรงมากขึ้น อีกทั้งพลาสติกโพลีเอทิลีน (commodity plastics) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้นส่วนใหญ่สังเคราะห์จากสารประเภทฟอสซิลปิโตรเลียม ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่จำกัดและไม่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ทันต่อปริมาณความต้องการการใช้งานของพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดงานวิจัยและการพัฒนาเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพ (bioplastics) ขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยล้วนมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาพลาสติกชีวภาพให้มีสมบัติที่เทียบเท่าและสามารถนำไปใช้งานทดแทนพลาสติกโพลีเอทิลีนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยคาดหวังว่าการใช้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) จะช่วยบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นนี้ได้ และสามารถแก้ปัญหาการขาดแคลนปิโตรเลียมที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยสังเคราะห์ขึ้นได้ทั้งจากการใช้สารปิโตรเลียมเป็นสารตั้งต้น และจากแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติที่สร้างขึ้นใหม่ทดแทนได้ (renewable resource) ซึ่งขณะนี้มีการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในระดับอุตสาหกรรมและมีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเด่นคือมีความยืดหยุ่นสูง มีความทนแรงกระแทกที่ดี ความทนทานต่อสารเคมีที่สูงและยังมีกระบวนการขึ้นรูปที่ง่ายอีกด้วย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มาจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เช่น ถุงพลาสติก ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร ขวดและถ้วยกาแฟพลาสติก อย่างไรก็ตามพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังคงมีข้อจำกัดอยู่บางประการ โดยเฉพาะในเรื่องของความแข็งแรงเชิงกลเนื่องจากยังคงมีความอ่อนนุ่มเกินไปทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางเท่าที่ควร ดังนั้นจึงมีงานวิจัยต่างๆ พยายามปรับปรุงสมบัติเหล่านี้ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น การใช้สารเติมแต่ง (additive) ชนิดต่างๆ หรือแม้กระทั่งการทำให้เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยการใช้ตัวเติม (filler) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาการทำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารประกอบคอมพอสิตนั้นจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงและปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้เป็นอย่างดี แต่ทั้งนี้จะสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้มากน้อยเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของตัวเติมในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องจาก

ตัวเติมส่วนใหญ่ เช่น ซิลิกา ทัลก์ เส้นใย ออร์แกโนเคลย์ เป็นสารอินทรีย์มีความเป็นขั้วที่ต่างจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งเป็นสารอินทรีย์อย่างมาก ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของตัวเติมด้วยตัวเอง โดยส่งผลให้สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตลดลงเนื่องจากความไม่เข้ากันของทั้งสองเฟส ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ตัวเติมมีลักษณะการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงได้ก็คือการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) นั่นเอง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเติมให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสองเฟสเพิ่มสูงขึ้นและให้มีการเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้สมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมได้นั้นดีมากยิ่งขึ้นเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาสารคู่ควบจากการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้มีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต โดยใช้เทคนิคการอัตรัดแบบรีแอกทีฟ เพื่อนำสารคู่ควบที่เตรียมได้ไปใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ แล้วทำการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการใช้สารคู่ควบที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการประยุกต์เทคนิคการอัตรัดแบบรีแอกทีฟสำหรับดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้มีหมู่ฟังก์ชันสำหรับใช้เป็นสารคู่ควบของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

1.2.2 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณการใช้สารคู่ควบที่เตรียมได้ต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้สารคู่ควบที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการอัตรัดแบบรีแอกทีฟ โดยสามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติม

1.3.2 ได้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.1.1 ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ปัจจุบันมีการให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

(1) ตามมาตรฐาน ASTM D6400-99 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่ถูกย่อยสลายได้จากการทำงานของจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

(ASTM D6400-99 - biodegradable plastic is a degradable plastic in which the degradation results from the action of naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi and algae.)

(2) ตามมาตรฐาน ISO 472:1998 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ส่งผลให้สมบัติบางอย่างสูญหายไปซึ่งสามารถทดสอบสมบัติเหล่านี้ได้ด้วยวิธีการตามมาตรฐานที่เหมาะสมกับพลาสติกและการประยุกต์การใช้งานนั้นๆ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวจะต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ

(ISO 472:1998 - Biodegradable plastics are plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions resulting in a loss of some properties that may vary as measured by standard test methods appropriate to the plastics and application in a period of time that determines its classification. The change in chemical structure results from the action of naturally occurring microorganisms.)

(3) ตามมาตรฐาน BPS Japan (1994) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง วัสดุพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลให้เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง โดยในกระบวนการย่อยสลายนี้จะต้องมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนที่เกิดผ่านกระบวนการเผาผลาญจากจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ

(BPS Japan (1994) - Biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism.)

(4) ตามมาตรฐาน DIN FNK103.2 (1993) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง วัสดุพลาสติกที่ถูกเรียกว่าสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น จะต้องมีสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ทั้งหมดด้วยสภาวะแวดล้อมที่เฉพาะ และมีอัตราการย่อยสลายที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน

(DIN FNK103.2 (1993) - A plastic materials is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process Environmental condition and rates of biodegradation are to be determined by standardized test methods.)

(5) ตามมาตรฐาน CEN (1993) วัสดุที่ย่อยสลายได้เมื่อเกิดการย่อยสลายจากการทำงานของจุลินทรีย์แล้วทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือก๊าซมีเทน และมวลชีวภาพใหม่

(CEN (1993) – A degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials is converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass.)

อย่างไรก็ตามสำหรับคำว่า biodegradation (การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) นั้นมาจากคำว่า biotic degradation ตามคำจำกัดความของมาตรฐานต่างๆ อาศัยหลักพื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ การย่อยสลายนั้นจะต้องเป็นการทำงานที่มาจากจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ [1]

2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

โดยทั่วไปพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการทางเคมี หรือจากกระบวนการทางชีวภาพของวัฏจักรการเจริญเติบโตในจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามแหล่งกำเนิดของวัตถุดิบออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

(1) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่มีวัตถุดิบมาจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถถูกไฮโดรไลซิสได้ เช่น หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ เอไมด์ และยูรีเทน ตัวอย่างพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone, PCL) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA) พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรปธาเลต

(poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพต (poly(butylene succinate adipate), PBSA)

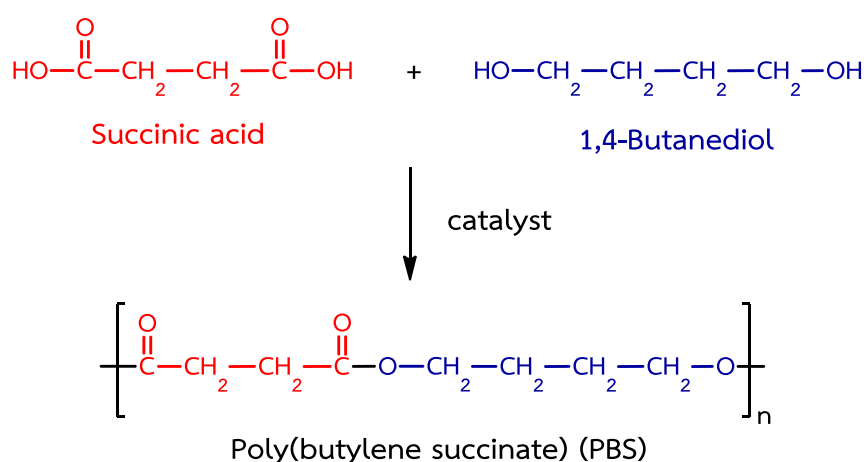
(2) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio-based biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่มีวัตถุดิบมาจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถสร้างทดแทนขึ้นใหม่ได้ (renewable resources) ในระยะเวลาสั้น ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ตัวอย่างพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, PHA) พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS)

ซึ่งปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพเป็นพลาสติกที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากสามารถผลิตได้จากพืช หรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนขึ้นมาใหม่ได้โดยอาศัยกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งใช้พลังงานต่ำ นอกจากนี้ยังเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเมื่อฝังกลบภายหลังจากการใช้งานได้อีกด้วย [2-4]

2.1.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

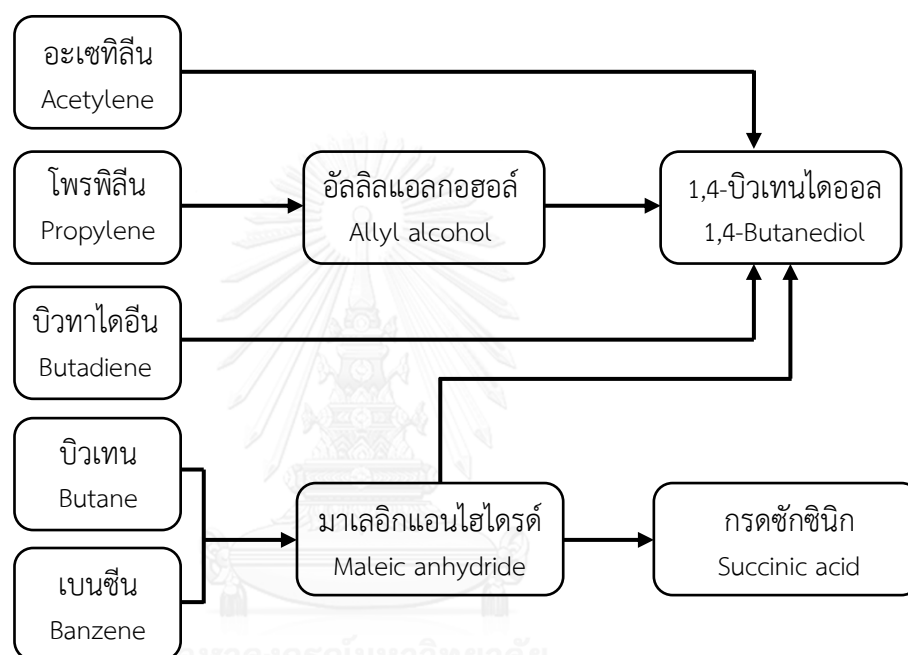
2.1.3.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นพอลิเอสเทอร์เชิงเส้นชนิดหนึ่ง (linear aliphatic polyester) สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างกรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) โดยมีเททระบิวทิลไททาเนต (tetra-*n*-butyl titanate) หรือเททระไอโซโพรพิลไททาเนต (tetraisopropyl titanate) เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.1

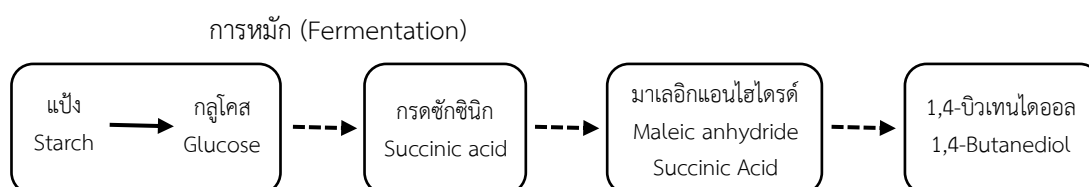


รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

โดยกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดโอลลนี้สามารถเตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี และจากวัตถุดิบธรรมชาติ สำหรับการผลิตจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีนั้นมาจากก๊าซบิวเทน ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์แล้วถูกเปลี่ยนอีกครั้งไปเป็นกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดโอลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนการผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติที่สร้างทดแทนใหม่ได้ เช่น แป้ง มันสำปะหลัง ข้าวโพดและอ้อย เป็นต้น สามารถทำโดยผ่านกระบวนการหมักแป้งและน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดซัคซินิก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิต 1,4-บิวเทนไดโอล ผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [5-8]



รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี



รูปที่ 2.3 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมัก

วิธีการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) และปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (polycondensation) ซึ่งในระหว่างปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้นจะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันโดยทำภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน และใช้อุณหภูมิในปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอยู่ที่ช่วง 150-190 องศาเซลเซียส หลังจากเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาด้วยซึ่ง

ต้องกำจัดออกจากระบบ จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นด้วยการเพิ่มความดันให้แก่ระบบที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สูงขึ้น [8]

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง [9] คือ

- การกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันออกจากระบบ
- ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะต้องเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม
- การเพิ่มความดันควรมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะสามารถกำจัดบิวเทนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น
- ตัวเร่งที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาควรมีความว่องไว เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาควรไม่นาน และมีความทนต่อการถูกไฮโดรไลซิส ในขณะเดียวกันควรมีความทนต่อความร้อนที่ดี เพื่อป้องกันการสลายตัวระหว่างเกิดปฏิกิริยา

2.1.3.2 สมบัติทั่วไปของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะทางกายภาพสีขาว มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิด แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิดมาก และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วที่ต่ำมาก โดยทั่วไปพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลสูงซึ่งใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) และพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) มีความสามารถในการทนความร้อนได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ และมีความยืดหยุ่น (flexibility) อีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายและย่อยสลายได้ดี รวมทั้งสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งเป็นลักษณะเด่นที่สำคัญอย่างมาก [10, 11]

2.1.3.3 การนำไปใช้งานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับพอลิโอลิฟิน ได้แก่ พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้งานสามารถใช้แทนที่พลาสติกโพลีเอทิลีนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปได้ เช่น ในอุตสาหกรรมเกษตรมีการนำไปผลิตเป็นฟิล์มคลุมดิน คลุมกระถางต้นไม้ ทำเป็นวัสดุห่อหุ้มหรือปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ฆ่าวัชพืช เป็นต้น หรือในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทำเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง เช่น ฟิล์มเคลือบแก้ว กระดาษหรือขวดน้ำ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์และอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยและการพัฒนาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ใน

งานหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง หรือแม้แต่ อุตสาหกรรมอุปกรณ์การกีฬา เป็นต้น [11]

2.1.3.4 การย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพมีกระบวนการหลักอยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการที่ จุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำให้มีขนาดเล็กลง หรือ อาจเกิดจากปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การถูกไฮโดรไลซิส การสลายตัวทาง ความร้อนหรือแสง ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งการย่อยสลายครั้งแรกนี้จะเกิดขึ้น ภายนอกเซลล์โดยเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หมายถึง เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกของพันธะ ภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หมายถึง เอนไซม์ที่ทำให้เกิด การแตกพันธะทีละหน่วยจากหน่วยที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์ถูกแตกพันธะ จนมีขนาดเล็กพอก็จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปย่อยสลายครั้งที่ 2 ภายในเซลล์ เมื่อเกิดการย่อยสลาย ที่สมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงานและ สารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซ มีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) [1, 12]

ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสลายตัวของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [13] ได้แก่

- (1) สิ่งมีชีวิต เช่น ความเหมาะสมของชนิดเอนไซม์ที่ถูกปล่อยจากสิ่งมีชีวิต รวมทั้งปริมาณของเอนไซม์ ที่เหมาะสม
- (2) โครงสร้างทางเคมีของชนิดพลาสติก รวมทั้งความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและ น้ำหนักโมเลกุลของพลาสติก
- (3) สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่างของสภาวะ แวดล้อมที่ใช้ในการย่อยสลาย เป็นต้น

2.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต

2.2.1 นิยามของคอมพอสิต

คอมพอสิต (composite) หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยสารที่มีองค์ประกอบทางเคมี แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมารวมกัน ซึ่งไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถจำแนกความ แตกต่างระหว่างสองเฟสได้แม้ในระดับจุลภาค (microscopic) โดยทั่วไปแล้วคอมพอสิตจะมี องค์ประกอบชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และองค์ประกอบอื่นที่ทำหน้าที่ เป็นสารเสริมแรง (reinforcement) ซึ่งอาจจะมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาคทรงกลม หรือเส้นใย เป็น ต้น [6, 14]

2.2.2 ประเภทของคอมพอสิต

เมทริกซ์จะเป็นองค์ประกอบส่วนที่สำคัญในวัสดุคอมพอสิตทำหน้าที่เป็นตัวประสานหรือตัวยึดเกาะให้กับสารเสริมแรง นอกจากนี้ยังช่วยปกป้องสารเสริมแรงจากรอยขีดข่วน สามารถส่งผ่านแรงที่ถูกกระทำหรือความเค้นระหว่างสารเสริมแรงได้ ทัวไปแล้วแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

(1) วัสดุคอมพอสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (polymer matrix composites, PMCs) และเรียกคอมพอสิตที่ได้ว่าพอลิเมอร์คอมพอสิต ซึ่งวัสดุคอมพอสิตประเภทนี้ได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตได้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ นำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวก ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์เป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก ตัวอย่างเช่น พอลิเอสเตอร์ พอลิโพรพิลีน ไนลอน อะครีโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ เป็นต้น

(2) วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ (metal matrix composites, MMCs) ส่วนใหญ่มีการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิเมอร์เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวที่สูงกว่า แต่มีข้อเสียคือคอมพอสิตที่ได้มีน้ำหนักมากและราคาแพง ทำให้มีการนำไปใช้งานไม่กว้างขวางเท่าที่ควร โดยทั่วไปคอมพอสิตประเภทนี้จะใช้โลหะอัลลอยด์เป็นเมทริกซ์ ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ แมกนีเซียมอัลลอยด์ ทองแดง เป็นต้น

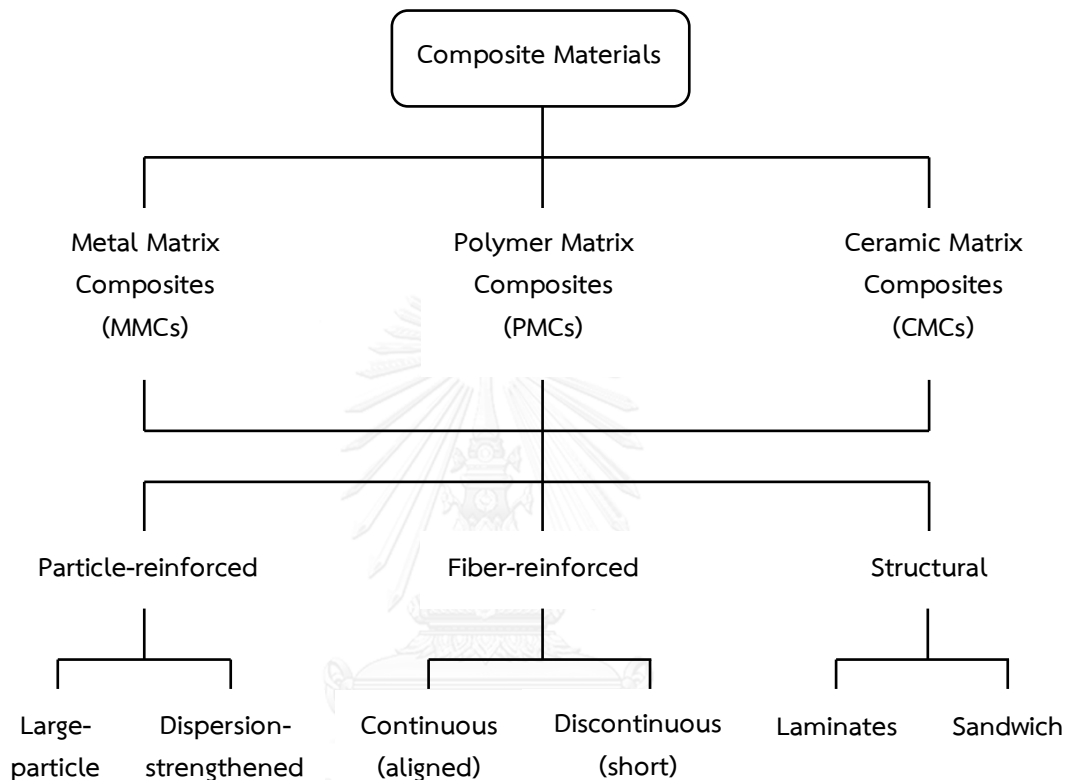
(3) วัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramics matrix composites, CMCs) มีการนำเซรามิกมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูง และในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียของเซรามิก คือ เปราะและแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย เซรามิกที่ใช้ตัวอย่างเช่น อะลูมินา ซิลิกอนไนไตรด์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

ส่วนสารเสริมแรงซึ่งทำหน้าที่ในการดูดซับแรงที่ถูกกระทำจากภายนอกโดยถูกส่งผ่านมาจากเนื้อเมทริกซ์ในวัสดุคอมพอสิตนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

(1) วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดเป็นอนุภาค (particle-reinforced) ประกอบด้วยเฟสของเมทริกซ์และเฟสของตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค โดยอนุภาคจะมีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น แผ่นบางๆ (flake) อนุภาคกลม (particle) หรือเม็ดขนาดใหญ่ (filler) เป็นต้น

(2) วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดเส้นใย (fiber-reinforced) เนื่องจากเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความยาวมากกว่าพื้นที่หน้าตัดมากจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงได้ โดยเส้นใยมีทั้งมาจากธรรมชาติ เช่น ฝ้ายและไหม เป็นต้น และเส้นใยที่มาจากสารสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีนและพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น โดยเส้นใยที่จะนำมาใช้นั้นสามารถใช้ได้ทั้งเส้นใยยาวต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในวัสดุคอมพอสิตได้

(3) วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดโครงสร้าง (structural) ซึ่งสามารถแบ่งคอมพอสิตโครงสร้างได้ 2 ประเภท คือ คอมพอสิตแบบชั้น (laminates) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (sandwich) โดยสมบัติของคอมพอสิตโครงสร้างขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุและรูปแบบโครงสร้างของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย



รูปที่ 2.4 การแบ่งประเภทของคอมพอสิตและสารเสริมแรง

2.2.3 ข้อดีของคอมพอสิต

ในปัจจุบันนี้คอมพอสิตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตจากสารเสริมแรงและเมทริกซ์ได้หลากหลายชนิด ส่งผลให้นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตได้อย่างหลากหลายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น เพิ่มความแข็งแรง และคงรูปร่างของคอมพอสิตได้ดี สามารถเพิ่มความเหนียวและความทนแรงกระแทกได้ ยืดอายุการใช้งาน มีอิลาสติกมอดุลัสและความแข็งตึง (stiffness) สูงขึ้น และในบางกรณีช่วยลดการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้อีกด้วย ซึ่งสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้ [15]

- แรงยึดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารเสริมแรง
- สมบัติของสารเสริมแรง
- ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรง
- ปริมาณสารเสริมแรงในพอลิเมอร์
- การเรียงตัวหรือการกระจายตัว (alignment or distribution) ของสารเสริมแรงในพอลิเมอร์เมทริกซ์
- เทคนิคการขึ้นรูป

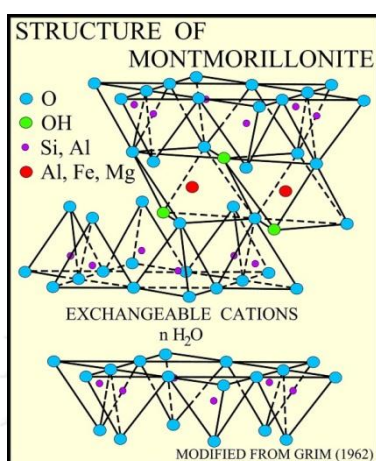
2.2.4 ตัวเติมเสริมแรง

เป็นสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง (strength) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนแรงดึง และความแข็งดึง (stiffness) ให้แก่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วสารเติมแต่งที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนาสูง (high aspect ratio) เช่น สารเติมแต่งที่มีรูปร่างของอนุภาคเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้พอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างตัวเติมเสริมแรงได้แก่ เกล็ดดิน ทัลค์ ไมกา เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และออร์แกโนเคลย์ (organoclay) เป็นต้น [15] โดยในงานวิจัยนี้เลือกออร์แกโนเคลย์ในการใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซีกซีเนต เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าสามารถหาซื้อขายได้ เป็นวัสดุดิบที่มาจากธรรมชาติมาทำการดัดแปรเพื่อให้เข้ากับพอลิเมอร์ได้ง่าย อีกทั้งออร์แกโนเคลย์ยังมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนาที่มากพอเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงได้

2.3 มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรหรือออร์แกโนเคลย์

มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เป็นแร่ดินเหนียว (clay mineral) ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขี้ที่สามารนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง มีบทบาทที่สามารถใช้ในการเป็นสารเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสำหรับการปรับปรุงวัสดุคอมพอสิต เพื่อให้มีความแข็งแรงเนื่องจากมีอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาที่สูงทำให้ใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงได้ สามารถพบได้ง่ายตามธรรมชาติ มีปริมาณมาก นอกจากนี้เมื่อใช้ร่วมกับพอลิเมอร์บางชนิดยังพบว่าสามารถเพิ่มความทนร้อนและความสามารถสกัดกั้นก๊าซได้ อีกทั้งมอนต์มอริลโลไนต์ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยมอนต์มอริลโลไนต์มีโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ ซึ่งมีรูปแบบผลึกอยู่ในกลุ่มของสมกไทต์ (smectite) กล่าวคือมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นชนิด 2:1 ฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicate) โดยหนึ่งแผ่นประกอบด้วยชั้นทรงแปดหน้า (octahedral sheet) ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide) ที่ถูกประกบทั้งสองด้านด้วยชั้นทรงสี่หน้า (tetrahedral sheets) ของซิลิกาออกไซด์ (silica oxide) แต่ละแผ่นจะมี

ความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร และขนาดพื้นผิว (lateral dimension) ประมาณ 100-200 นาโนเมตร ระหว่างแผ่นชั้นของซิลิกาจะซ้อนกันเป็นชั้นที่ถูกยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงอย่างอ่อนหรือแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals force) และที่บริเวณผิวหน้าของแต่ละชั้นจะมีประจุเป็นลบ จึงทำให้มีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และธาตุอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นผลึกที่เรียกว่า gallery เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ และช่วยยึดแต่ละชั้นของผลึกที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน [16, 17] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [16]

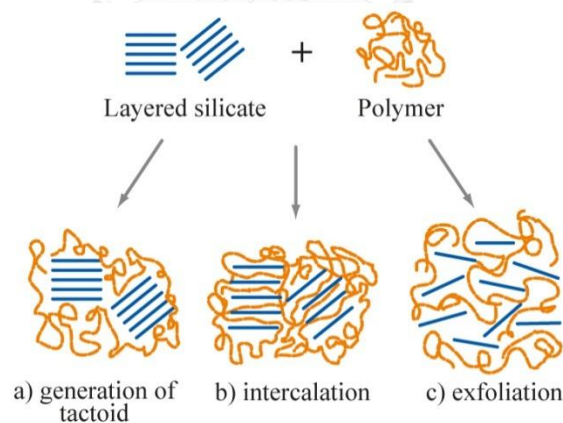
มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติความเป็นขั้วสูงเนื่องจากประกอบด้วยอะตอมของธาตุออกซิเจนเป็นจำนวนมาก ทำให้มีสมบัติที่ชอบน้ำและสามารถดูดน้ำได้มาก จึงมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่ต่ำและยากต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ให้เข้ากับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นด้วยการปรับเปลี่ยนให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ วิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมมากคือการนำมอนต์มอริลโลไนต์มาดัดแปรด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างประจุบวกในชั้นดินกับสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (cation exchanging) โดยที่นิยมใช้กันมากคือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมแคตไอออน (quaternary ammonium cation) ประกอบด้วยประจุบวกของแอมโมเนียมแคตไอออน (ส่วนที่ชอบน้ำ) และไฮโดรคาร์บอนสายยาว (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) ซึ่งส่วนของแอมโมเนียมแคตไอออนนั้นจะเข้าไปแลกเปลี่ยนกับประจุบวกของโลหะที่อยู่ระหว่างแผ่นของแร่ดินส่งผลทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายยาวสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นผลึกได้ ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นของแร่ดินขยายกว้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถสอดแทรกเข้าไปได้มากขึ้นและมีความเข้ากันได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ดีขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้ผ่านการดัดแปรแล้วเรียกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (organically modified montmorillonite, OMMT) หรือออร์แกนโอเคลย์



รูปที่ 2.6 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ [18]

2.3.1 การกระจายตัวของออร์แกนโอเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต

โดยทั่วไปการใช้ตัวเติม เช่น ออร์แกนโอเคลย์ ร่วมกับพอลิเมอร์จะไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากเป็นการผสมที่มีความแตกต่างระหว่างเฟสกล่าวคือสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำและสารประกอบอนินทรีย์ซึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomeration) ของเฟสที่เป็นสารอนินทรีย์ด้วยกันเองจึงทำให้วัสดุยังคงมีข้อด้อย ดังนั้นลักษณะการกระจายตัวของออร์แกนโอเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิตจึงมีความสำคัญในการปรับปรุงสมบัติ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของประจุที่ใช้ในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ ชนิดของพอลิเมอร์ รวมถึงวิธีการเตรียมออร์แกนโอเคลย์/พอลิเมอร์คอมพอสิต โดยลักษณะการกระจายตัวทั่วไปของแร่ดินในพอลิเมอร์คอมพอสิตจะแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของแร่ดินในพอลิเมอร์ [19]

2.3.1.1 คอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบทั่วไป (generation of tactoid composite)

สายโซ่ของพอลิเมอร์มีลักษณะไม่สามารถสอดแทรกหรือเกิดอันตรกิริยากับแร่ดินได้ เนื่องจากแร่ดินยังคงเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ได้แค่ล้อมรอบอนุภาคของแร่ดินอยู่

ภายนอกเท่านั้น ส่งผลให้คอมพอสิตเกิดการแยกเฟสขึ้น ซึ่งจะพบลักษณะแบบนี้ในการใช้เคลือบที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

2.3.1.2 คอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแทรก (intercalation composite)

สายโซ่พอลิเมอร์ตั้งแต่หนึ่งสายโซ่เกิดการสอดแทรกเข้าไประหว่างแผ่นของแร่ดินได้ แล้วทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นขยายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แร่ดินมีการขยายตัวที่มากขึ้น แต่ยังคงมีลักษณะการซ้อนกันเป็นชั้นปรากฏอยู่ ซึ่งจะพบว่าพอลิเมอร์กับแร่ดินนั้นจะมีการสลับเป็นชั้นต่อเนื่องกันไป โดยการที่สายโซ่พอลิเมอร์แทรกตัวเข้าไปนั้นจะทำให้แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างชั้นของแร่ดินลดลง

2.3.1.3 คอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแยกเป็นแผ่น (exfoliation composite)

แต่ละแผ่นของแร่ดินมีลักษณะการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ไม่มีการซ้อนกันเป็นชั้น สายโซ่พอลิเมอร์จะแทรกเข้าไปในระหว่างแผ่นของแร่ดินจะทำให้ระยะห่างขยายกว้างขึ้นจนแร่ดินเกิดการแตกออกเป็นแผ่นเดี่ยว ทำให้พอลิเมอร์เข้าไปปกคลุมล้อมรอบแต่ละแผ่นของแร่ดินเอาไว้ได้ ซึ่งระยะห่างแต่ละแผ่นของแร่ดินขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ดินที่ใช้ โดยทั่วไปแล้วแร่ดินที่จะเกิดลักษณะแบบนี้จะมีปริมาณที่น้อยกว่าแบบที่ 2.3.1.2 ลักษณะการเกิดแบบนี้จะยิ่งทำให้มีอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาสูงมากขึ้นและเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และแร่ดินได้อย่างดี ส่งผลให้สามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมพอสิตได้อย่างมาก

โดยวัสดุคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแทรกและแบบแยกเป็นแผ่นจะทำให้ได้สมบัติของวัสดุที่ดีมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในกรณีที่มีโครงสร้างแบบแยกเป็นแผ่นซึ่งมีการใช้ปริมาณแร่ดินเพียงเล็กน้อยจะแสดงสมบัติต่างๆของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.3.2 เทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์

ในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์มี 3 เทคนิค ได้แก่

2.3.2.1 เทคนิคการผลิตร่วมกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (*in situ* intercalative polymerization)

เป็นการนำเอาแร่ดินทำให้เกิดการบวมตัวในสารละลายของมอนอเมอร์ โดยทำให้มอนอเมอร์แทรกเข้าไประหว่างแผ่นของแร่ดินได้แล้วทำให้เกิดการสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้น (polymerization) ด้วยความร้อน รังสี หรือตัวเร่งปฏิกิริยากก็ตาม ซึ่งพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนั้นจะแทรกตัวอยู่ระหว่างแผ่นของแร่ดิน เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้นจะทำให้แผ่นของแร่ดินนั้นเกิดการแตกแยกออกจากกันเป็นแผ่นๆ

2.3.2.2 เทคนิคสารละลาย (solution intercalation)

เป็นการนำพอลิเมอร์ไปละลายในตัวทำละลายที่มีแร่ดินเกิดการบวมตัวอยู่ในตัวทำละลายเดียวกัน เนื่องจากระหว่างแผ่นของแร่ดินนั้นถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงอ่อนๆ จึงทำให้ตัวทำละลายสามารถแพร่เข้าไปได้ รวมทั้งสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลายแล้วจะสามารถแทรกเข้าไประหว่างแผ่นของแร่ดินได้ จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออกจะได้วัสดุคอมพอสิตที่มีพอลิเมอร์แทรกอยู่ระหว่างแผ่นของแร่ดิน แต่จะไม่สามารถทำให้แผ่นของแร่ดินแตกแยกออกจากกันเป็นแผ่นๆ ได้

2.3.2.3 เทคนิคการหลอมเหลว (melt intercalation)

เป็นการผสมแร่ดินกับพอลิเมอร์ที่กำลังถูกหลอมเหลว ซึ่งถ้ามีสภาวะที่เหมาะสมและแร่ดินที่ใช้มีความสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์นั้น จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไประหว่างแผ่นของแร่ดินได้ โดยจะไปทำให้ระยะระหว่างแผ่นขยายกว้างขึ้น หรืออาจจะทำให้แผ่นของแร่ดินเกิดการแตกแยกออกจากกันได้

ซึ่งเทคนิคการหลอมเหลวนี้นี้กำลังเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถทำการเตรียมแร่ดิน/พอลิเมอร์คอมพอสิตได้ด้วยเทคนิคการอัดรีด (extrusion) โดยสามารถเตรียมได้ง่าย สามารถทำการผสมระหว่างแร่ดินและพอลิเมอร์ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนทำการหลอมผสมได้ อีกทั้งเครื่องผสมที่ใช้ในการเตรียมด้วยเทคนิคนี้มีใช้ในทางการค้าโดยตรง เช่น เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) เครื่องอัดรีดแบบสกรู (screw extruder) เป็นต้น นอกจากนี้เทคนิคการหลอมเหลวไม่ต้องใช้ตัวทำละลายซึ่งเป็นพิษและสิ้นเปลืองอีกด้วย [20, 21]

2.3.3 ลักษณะของเคลย์/พอลิเมอร์คอมพอสิต

วัสดุจากเคลย์/พอลิเมอร์คอมพอสิตมีลักษณะที่สำคัญ [22] ดังนี้

- (1) มีความแข็งแรง โมดูลัสและความยืดหยุ่นสูง หนา จุดขาดสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม
- (2) มีความสามารถในการทนความร้อนสูงได้ขึ้นและป้องกันการลุกลามของไฟได้ดี เพราะการมีองค์ประกอบที่เป็นซิลิเกตจะทำให้เป็นฉนวนที่ดี เมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่บริเวณผิวหน้า จึงไม่เกิดการลามไฟ และช่วยทำให้ไฟดับได้รวดเร็ว
- (3) มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำที่ดี
- (4) เมื่อผสมในพอลิเมอร์บางชนิดที่นำไฟฟ้า จะช่วยทำให้นำไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ขึ้น เพราะเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้อยู่ในสถานะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมาทำให้มีพื้นที่มากขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

2.4 สารคู่ควบ

ในการใช้ตัวเติมหรือสารเสริมแรงเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตนั้น จะสามารถปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นได้มากถ้าหากทำให้ตัวเติมหรือสารเสริมแรงนั้นมีลักษณะการกระจายตัวหรือมีแรงยึดเกาะกับเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี โดยวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ก็คือการเคลือบหรือปรับแต่งพื้นผิวของตัวเติมหรือสารเสริมแรงด้วยสารที่สามารถเข้ากันได้กับทั้งสองเฟส แต่เทคนิคนี้อาจจะส่งผลให้ราคาวัสดุสูงมากขึ้น ประกอบกับขั้นตอนในการปรับแต่งอาจจะยุ่งยากมีความซับซ้อน ดังนั้นอีกวิธีการหนึ่งที่จะสามารถปรับปรุงการยึดระหว่างตัวเติมหรือสารเสริมแรงกับพอลิเมอร์ก็คือการใช้สารเติมแต่งอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งก็คือสารคู่ควบหรือสารช่วยยึด (coupling agent) โดยสารประเภทนี้จะมีการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับพอลิเมอร์และตัวเติมหรือสารเสริมแรงเพื่อเป็นสะพานหรือตัวกลางในการเชื่อมระหว่างทั้งสองเฟส ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างสองเฟสดีขึ้น [15]

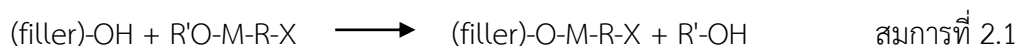
2.4.1 กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างตัวเติมหรือสารเสริมแรงกับพอลิเมอร์โดยการใช้สารคู่ควบ

สารคู่ควบมีสูตรทั่วไปคือ $(R'O)_x-M-(R-X)_y$

โดย	M	คือ	โลหะ ได้แก่ ซิลิกอน ไททาเนียมหรือเซอร์โคเนียม
	X	คือ	หมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์
	R	คือ	หมู่อินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ M
	R'O	คือ	หมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับตัวเติมหรือสารเสริมแรง

ในการยึดระหว่างสารคู่ควบกับสารเสริมแรงอาจเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ ได้แก่

(1) เกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างหมู่ OR' ของสารคู่ควบกับหมู่ OH ที่พื้นผิวของสารเสริมแรง ดังสมการที่ 2.1



(2) เกิดจากการที่หมู่ OR' ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้น (น้ำ) ที่พื้นผิวของสารเสริมแรงได้เป็นหมู่ OH ดังสมการที่ 2.2 แล้วเข้าทำปฏิกิริยากับสารเสริมแรง ดังแสดงสมการที่ 2.3



ในกรณีสำหรับการยึดระหว่างสารคู่ควบและพอลิเมอร์จะเกิดจากหมู่ X ของสารคู่ควบเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ ทั้งนี้หมู่ X สามารถมีได้หลากหลายชนิดเพื่อให้มีความเหมาะสม

ในการนำไปใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น สารคู่ควบที่มีหมู่ X คือหมู่ไวนิล (vinyl) หรืออะคริลิล (acrylyl) ก็จะนำไปใช้กับพอลิเมอร์ที่เป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวหรือพอลิโอเลฟินชนิดเชื่อมขวาง (crosslinked polyolefins) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารทั้งสองจะเป็นแบบเรดิคัลอิสระ

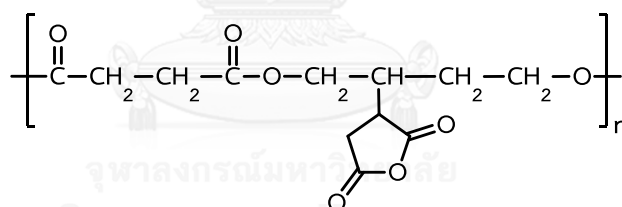
2.4.2 วิธีการนำสารคู่ควบไปใช้งาน

ในการใช้สารคู่ควบมี 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่

- (1) นำสารคู่ควบไปเคลือบหรือปรับแต่งที่พื้นผิวของสารเสริมแรงแล้วนำไปผสมกับพอลิเมอร์
- (2) นำสารคู่ควบมาผสมกับพอลิเมอร์และสารเสริมแรงโดยตรงระหว่างกระบวนการคอมพาวนด์ดิง

2.4.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ในกรณีของพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น พอลิแล็กติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่าการใช้สารคู่ควบที่ได้จากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะทำให้สารเสริมแรงยึดเกาะกับพอลิเมอร์เหล่านี้ได้ดี โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBS-g-MA) สังเคราะห์ได้จากการนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยการทำให้เกิดเรดิคัลอิสระบนสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

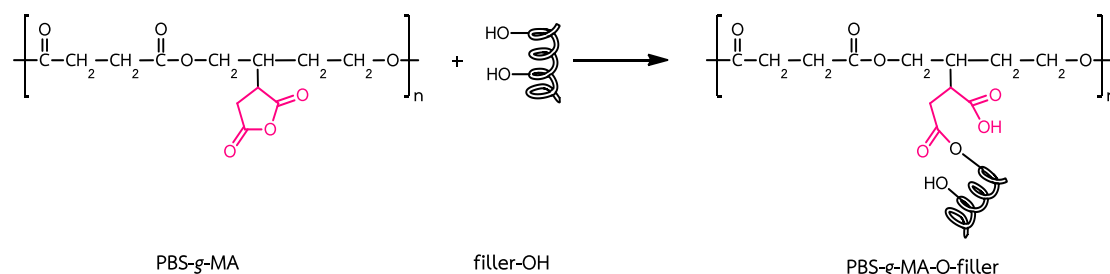


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBS-g-MA)

โดยสามารถเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้หลายกระบวนการ เช่น

- (1) การรีฟลักซ์ เป็นการทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มาเลอิกแอนไฮไดรด์และเปอร์ออกไซด์ที่ใช้เป็นสารเร่งในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง [23]
- (2) กระบวนการหลอมเหลว ซึ่งทำได้โดยการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มาเลอิกแอนไฮไดรด์และใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารเร่งในการเกิดปฏิกิริยามาผสมเข้าด้วยกันแล้วให้เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องผสมแบบปิดผ่านการหลอมเหลวของพอลิเมอร์และสารเคมีที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส หรือเกิดปฏิกิริยาผ่านเครื่องอัดรีดด้วยการหลอมเหลวของสารที่อุณหภูมิ 120-130 องศาเซลเซียส [24, 25]

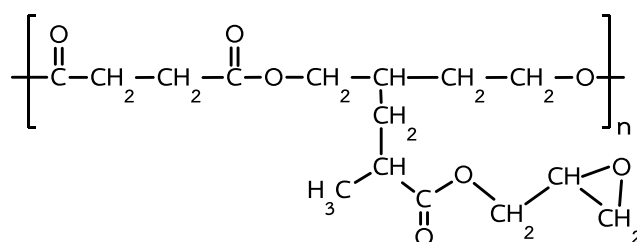
จากโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคือแอนไฮไดรด์จะสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้วของสารเสริมแรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ส่วนบริเวณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่กับส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารเสริมแรงและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ดัดแปลงจาก [26])

2.4.4 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต

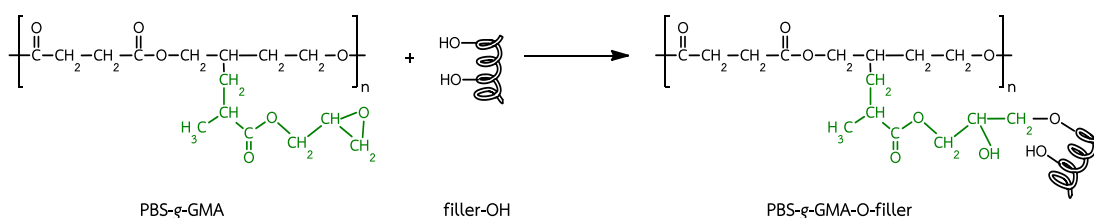
นอกจากการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคู่ควบแล้ว ยังพบว่ามีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA) เป็นสารคู่ควบได้อีกด้วย แต่ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาศาสตร์คู่ควบชนิดนี้ไม่มากนัก พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตสามารถเคราะห์ได้ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์กล่าวคือเป็นนำไกลซีดิลเมทาคริเลตไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยการทำให้เกิดเรดิคัลอิสระบนสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA)

การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่นเดียวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยสามารถเตรียมได้จากการรีฟลักซ์ [27] และผ่านกระบวนการหลอมเหลว [28]

เนื่องจากโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตที่มีหมู่ฟังก์ชันคืออีพ็อกซีที่จะสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีซิวของสารเสริมแรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ส่วนบริเวณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตก็จะสามารถเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่กับส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้มีความเข้ากันได้



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารเสริมแรงและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (ดัดแปลงจาก [27])

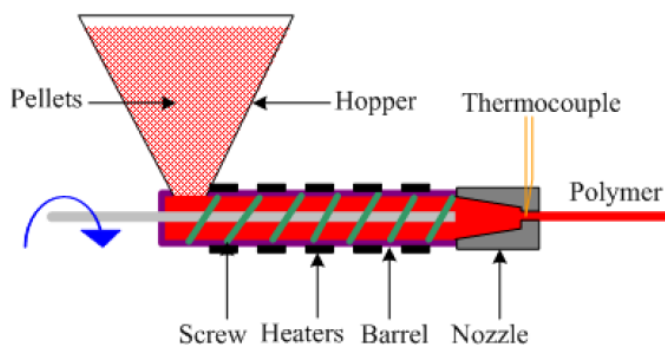
2.5 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน

ในกระบวนการเตรียมสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้สารละลาย (solution method) การพอลิเมอไรเซชันแบบอินซิตู (*in situ* polymerization) และการเตรียมด้วยการหลอมเหลว (melt method) ซึ่งกระบวนการเตรียมที่นิยมใช้กันมากก็คือการผสมพอลิเมอร์ด้วยวิธีการหลอมเหลว เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม และไม่ต้องเสียเวลาในการระเหยและควบคุมตัวทำละลาย โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การผสมภายในแบบที่ละชุด (internal batch mixer) เช่น เครื่องผสมแบบบานบูรี (banbury mixer) และการผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing) เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) [6, 29] โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกเทคนิคการผสมแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่หรือเรียกเทคนิคนี้ว่าเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ (reactive extrusion technique) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ใ้ในอุตสาหกรรม ประหยัดเวลา สะดวกและรวดเร็ว

2.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยกระบวนการอัดรีด

ในกระบวนการอัดรีด (extrusion process) เป็นกระบวนการผสมอย่างหนึ่งที่มีความต่อเนื่อง ใช้สำหรับการเตรียมหรือผสมตัวเติมหรือสารเสริมแรงกับพลาสติกซึ่งเรียกว่าการคอมพาวนด์ดิง (compounding) ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มตั้งแต่การผสมเชิงกลภายนอกเครื่องผสมนี้ก่อนแล้วตามด้วยการใส่ส่วนผสมเข้าไปในเครื่องผ่านกรวยเติม (hopper) จากนั้นส่วนผสมดังกล่าวจะลงไปยังสกรู (screw) ภายในเครื่องแล้วแรงจากสกรูจะทำให้ส่วนผสมนั้นเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในกระบอกอัดรีด (barrel) ที่มีการให้ความร้อน

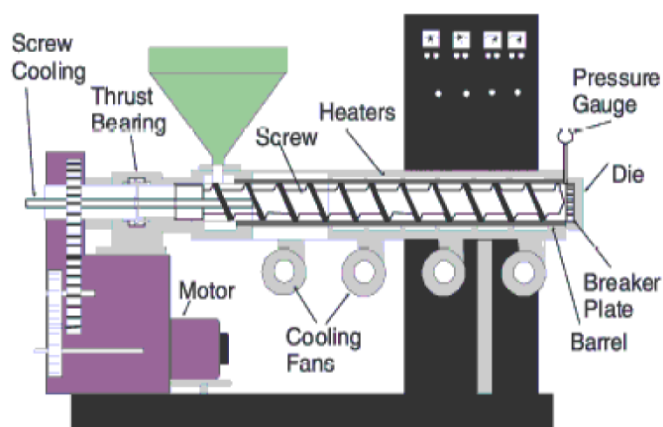
อย่างต่อเนื่องจากแถบให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการหลอมเหลวและเกิดการผสมของสาร นอกจากนี้ยังมีความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของพอลิเมอร์ด้วยกันเอง และความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างพอลิเมอร์และสกรู โดยความลึกของร่องสกรูจะลดลงตามความยาวของสกรู เพื่อเป็นการเพิ่มความดันให้แก่พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวสามารถไหลผ่านออกจากหัวตาย (die) ได้ ซึ่งหัวตายอาจมีได้หลากหลายรูปแบบและเป็นตัวกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น พิล์ม แผ่นหรือท่อ เป็นต้น [29]



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด [30]

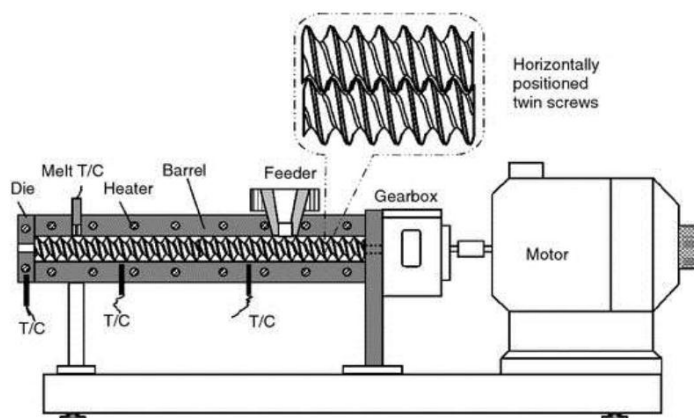
เครื่องอัดรีดที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด [29, 31] ได้แก่

(1) เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) เป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เมื่อทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะเกิดลักษณะการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบลากพา (drag flow) ที่บริเวณสกรูกับผนังของกระบอกอัดรีด ส่งผลให้เกิดความร้อนจากการเสียดสี ยากต่อการควบคุมอุณหภูมิขณะทำการหลอมเหลว รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว [32]

(2) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) มีสกรู 2 ตัวซึ่งหมุนคู่กันในกระบอกอัดรีด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะมีการให้ความร้อนจากแถบทำความร้อนที่ผนังของกระบอกอัดรีด ทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่พอลิเมอร์หลอมที่เคลื่อนที่ในกระบอกอัดรีดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เหมาะแก่การนำมาใช้ในกระบวนการผสมมากกว่า โดยสามารถแบ่งเครื่องอัดรีดสกรูคู่ได้เป็น 2 ชนิดตามการพิจารณาจากส่วนพื้นของสกรูที่ขบกันอยู่ คือ เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียว (co-rotating twin screw extruder) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งนิยมใช้ในการทำคอมพาวนด์ดี เนื่องจากมีการขบเกลียวของสกรูได้อย่างสนิททำให้เกิดการบดผสมที่ดี และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin extruder) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ [32]



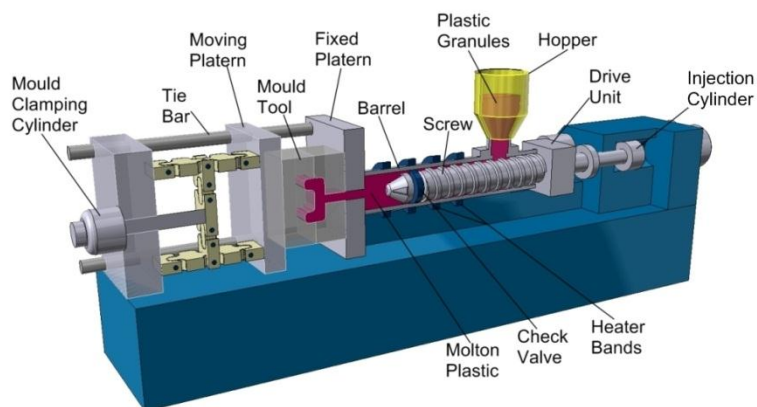
รูปที่ 2.15 สกรูคู่แบบหมุนทางเดียว (co-rotating twin screw) [33]



รูปที่ 2.16 สกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin screw) [33]

2.5.2 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการฉีด

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการฉีด (injection molding) เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความรวดเร็วในการผลิต สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายลักษณะ มีขั้นตอนในการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และมีกำลังในการผลิตที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งมีความสามารถในการผลิตซ้ำ (reproducibility) ที่ดี ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดพลาสติกนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก [34]

ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดเริ่มจากการเติมเม็ดพลาสติกที่จะทำการขึ้นรูปใส่ในเครื่องผ่านกรวยเติม (hopper) เม็ดพลาสติกจะถูกหลอมและผสมกันด้วยการหมุนของสกรู (screw) จากนั้นพลาสติกหลอมจะถูกผลักดันเคลื่อนที่ตามสกรูไปยังหัวตาย (die) เข้าสู่แม่พิมพ์แบบ (mold) เมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าไปในแม่แบบจะเริ่มแข็งตัว เป็นผลมาจากน้ำหล่อเย็นในแม่แบบ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกนำออกมาโดยการเปิดแม่แบบ ซึ่งขั้นตอนที่สำคัญก็คือ ส่วนการฉีดและส่วนการยึดแม่แบบ โดยส่วนการฉีดจะต้องฉีดหรืออัดพลาสติกหลอมเข้าไปในแม่แบบด้วยความดันสูง เพื่อให้พลาสติกหลอมไหลเข้าเต็มแม่แบบจนเต็มเนื่องจากพลาสติกหลอมมีความหนืดที่ค่อนข้างสูง ส่วนที่เป็นการยึดแม่แบบจะต้องทำการยึดแม่แบบที่ประกบกันอยู่ด้วยแรงที่มากพอ เพื่อไม่ทำให้พลาสติกหลอมดันแม่แบบจนเปิดป้องกันการเกิดครีบ (flashing) ขึ้นที่ผลิตภัณฑ์ [14, 29]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงพัฒนาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้นนั้นทำได้หลายวิธีการ เช่น การทำเป็นพอลิเมอร์ผสม การใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ หรือแม้กระทั่งการทำเป็นวัสดุคอมพอสิต

งานวิจัยของ Bhatia และคณะ [35] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทริกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สัดส่วนต่างๆ ตั้งแต่ร้อยละ 0-100 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พบว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทริกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สัดส่วน ร้อยละ 90/10 และ 80/20 โดยน้ำหนักมีความสามารถเข้ากันได้ดี แต่เมื่อมีสัดส่วนผสมของ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตตั้งแต่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักขึ้นไปจะแสดงความสามารถเข้ากันไม่ค่อยดี ดังจะ เห็นได้จากค่าความทนแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดุลัส (modulus) ที่ลดลง นอกจากนี้ จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะเห็นความแตกต่างของทั้งสองเฟสได้อย่างชัดเจน และ จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ตั้งแต่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักขึ้นไปจะเห็นอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกสองค่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ทั้งสองที่สัดส่วนดังกล่าวมีความสามารถที่ไม่เข้ากัน

มีงานวิจัยที่ผ่านมาพยายามพัฒนาสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยการเตรียมเป็น คอมพอสิต เช่น งานวิจัยของ Makhatha และคณะ [36] รายงานว่าการใช้ไมก้าที่ผ่านการดัดแปรแล้ว (organically modified synthetic fluorine mica, OMSFM) เป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จะสามารถเพิ่มค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus) และมอดุลัสดึง (tensile modulus) ได้มากขึ้น แต่ความเค้น ณ จุดคราก (strength at yield) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อมีการเติม OMSFM ลงไป เนื่องมาจาก ตัวเติมเสริมแรงนี้จะทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีลักษณะเปราะมากขึ้น และยังมีการวิจัยที่ พยายามดัดแปรตัวเติมเสริมแรงให้มีความสามารถเข้ากันได้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากขึ้นโดยใช้ สารคู่ควบ ดังเช่นงานวิจัยของ Calabria และคณะ [37] ศึกษาผลของการดัดแปรบริเวณผิวของเส้นใย ฝ้ายด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) ซึ่งใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรผิวในปริมาณร้อยละ 10-40 จะมีค่าความทนแรงดึงได้เพิ่มถึงร้อยละ 15-78 และสามารถเพิ่มมากขึ้นได้ถึงร้อยละ 25-118 เมื่อมี การใช้เส้นใยที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนเป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องมาจากเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปรผิวมีความเข้ากันได้ดีกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากขึ้น ซึ่ง สังเกตได้จากภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบริเวณรอยแตกหัก (fracture surface) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการย่อยสลายของ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการใช้เส้นใยทั้งที่ผ่านหรือไม่ผ่านการดัดแปรผิวนั้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีตัวเติมเสริมแรง

นอกจากนี้การใช้ออร์แกโนเคลย์เป็นสารเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นที่ได้รับความ สนใจมากดังเช่น ในปี 2010 Phua และคณะ [38] ศึกษาผลของการใช้ออร์แกโนเคลย์ใน

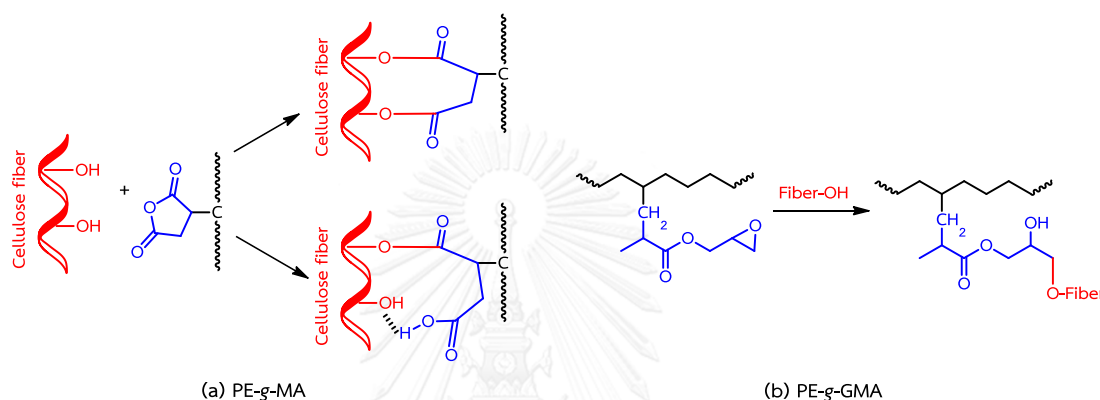
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณต่างๆ โดยศึกษาปริมาณในช่วงร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ออร์แกโนเคลย์ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง ความยืดสูงสุด อนุจุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และความทนแรงกระแทก (impact strength) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้ดีที่สุด โดยหากใช้ปริมาณออร์แกโนเคลย์ตั้งแต่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักขึ้นไปจะทำให้สมบัติต่างๆ เหล่านี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการใช้ออร์แกโนเคลย์ที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomeration) ของสารได้มากยิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีนัก

ต่อมา Phua และคณะ [24] มีความสนใจในการศึกษาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBS-*g*-MA) เพื่อใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) 10 phr และไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) เป็นตัวริเริ่ม (initiator) ที่ปริมาณต่างกัน ได้แก่ 1 phr และ 1.5 phr จากนั้นทำการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการรีแอกทีฟด้วยเครื่องผสมแบบปิด พบว่าสามารถทำการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้ โดยประสิทธิภาพการกราฟต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการหาปริมาณการกราฟต์ด้วยวิธีการไทเทรต พบว่าเมื่อใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ 1 phr สามารถทำการกราฟต์ได้เท่ากับร้อยละ 3.89 และเมื่อใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr จะทำการกราฟต์ได้เท่ากับร้อยละ 4.84 โดยสามารถพิสูจน์การกราฟต์ได้ด้วยเทคนิค FTIR และ NMR นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีออร์แกโนเคลย์เป็นสารเสริมแรงมีแนวโน้มให้ค่าที่ดีขึ้นเมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ เนื่องจากช่วยให้ออร์แกโนเคลย์และพอลิเมอร์มีการเชื่อมติดระหว่างทั้งสองเฟสได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ยังพบอีกว่าปริมาณการกราฟต์ที่มากขึ้นจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้ากันได้ให้มากยิ่งขึ้นด้วย

งานวิจัยของ Mani และคณะ [39] พบว่าปริมาณการกราฟต์ของพอลิเอสเทอร์กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการทำให้เกิดเรดิกัลได้มากที่สุดจะเป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้เกิดการกราฟต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นั่นก็คือการหาปริมาณสัดส่วนระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์มากขึ้นปริมาณการกราฟต์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งการเพิ่มปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก็ส่งผลต่อการกราฟต์ที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน

ในปี 2013 Aggarwal และคณะ [40] ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้สองชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-*g*-MA) และพอลิเอทิลีน

กราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต (PE-g-GMA) โดยใช้เส้นใยเปลือกไม้ (wood flour) เป็นตัวเสริมแรง และมีพอลิเอทิลีนเป็นเมทริกซ์ จากการศึกษาพบว่าคอมพอสิตที่ใช้ PE-g-GMA จะช่วยเพิ่มค่าความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งได้มากกว่าคอมพอสิตที่ใช้ PE-g-MA ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ที่ปรากฏอยู่ใน PE-g-MA มีความไวต่อการถูกไฮโดรไลซิสได้ง่าย แต่สำหรับปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในเส้นใยและ PE-g-GMA เป็นการสร้างพันธะที่เกิดขึ้นผ่านการเปิดวงของหมู่ฟังก์ชันอีพอกซีและพันธะนี้มีความทนต่อความชื้นได้มากกว่า โดยปฏิกิริยาของ PE-g-MA และ PE-g-GMA ที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิเอทิลีนดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ
(a) PE-g-MA และ (b) PE-g-GMA

Liu และคณะ [41] ได้ศึกษาปริมาณการกราฟต์ของพอลิแล็กติกแอซิดกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต (PLA-g-GMA) ที่จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเสริมแรงด้วยแป้ง โดยเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตด้วยเครื่องผสมแบบปิดใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำการวิเคราะห์สารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค NMR พบว่ามีสัญญาณเกิดขึ้นใหม่ช่วงประมาณ 1.1-4.4 ppm และมีปริมาณการกราฟต์ในช่วงร้อยละ 1.8-11.0 ขึ้นกับปริมาณของไกลซิดิลเมทาคริเลต ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณของสารในร้อยละ 5-20 จากนั้นทำการเตรียม PLA/starch/PLA-g-GMA ในสัดส่วนร้อยละ 50/50/1.5 โดยน้ำหนักด้วยเครื่องผสมแบบปิด จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า PLA/starch ที่ไม่มี PLA-g-GMA มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์และสารเสริมแรง (interfacial adhesion) ที่ไม่ดี โดยเห็นอนุภาคของแป้งอย่างชัดเจน แต่จะมีลักษณะการกระจายตัวของแป้งที่ดีในพอลิแล็กติกแอซิดเมื่อใช้ PLA-g-GMA เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลที่ได้มีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มี PLA-g-GMA ในคอมพอสิต เช่น ความทนแรงดึงจาก 18.6 MPa เพิ่มขึ้นเป็น 29.3 MPa ค่ามอดุลัสแรงดึงจาก 510 MPa เพิ่มเป็น 901 MPa และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เพิ่มจากร้อยละ 1.8 เป็น 3.4

นอกจากนี้ Chuai และคณะ [28] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยเปรียบเทียบผลของการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ระหว่าง PLA-g-GMA และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เตรียม PLA-g-GMA และ PBS-g-GMA โดยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องผสมแบบปิด มีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นทำการผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด PLA-g-GMA หรือ PBS-g-GMA และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้สัดส่วนของผสม PLA/PLA-g-GMA/PBS คือ 65/15/20 และ PLA/PBS-g-GMA/PBS คือ 80/15/5 แล้ววิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าการผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อมีการเติม PLA-g-GMA หรือ PBS-g-GMA ลงไป ซึ่งจะเห็นขนาดอนุภาคของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่กระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดมีขนาดที่เล็กลงและมีกระจายตัวที่ดีขึ้น นอกจากนี้ผลของกราฟต์โคพอลิเมอร์ทั้งสองที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพบว่าการเติม PBS-g-GMA ลงไป จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ PLA-g-GMA เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

ในขณะที่งานวิจัยของ Wu และคณะ [27] สังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตขึ้นสำหรับใช้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยปาล์มและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้มากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้สังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการรีฟลักซ์ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ซึ่งใช้ปริมาณไกลซีดิลเมทาคริเลตร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก แล้ววิเคราะห์ปริมาณการกราฟต์ได้ร้อยละ 2.16 จากนั้นพิสูจน์ปฏิกิริยาการกราฟต์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค FTIR พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตจะเห็นพีคของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลสองตำแหน่ง ได้แก่ 1718 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่เอสเทอร์ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และ 1731 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันอะคริเลตในโครงสร้างของไกลซีดิลเมทาคริเลต นอกจากนี้ทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตและเส้นใยปาล์มให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยปาล์ม แสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า และจากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของคอมพอสิตทั้งสอง พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตและเส้นใยปาล์ม และคอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยปาล์มมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีการใช้เส้นใยปาล์มเป็นตัวเติมเสริมแรง โดยคอมพอสิตที่เตรียมได้นี้จะมีความสามารถย่อยสลายได้มากขึ้นเมื่อมีปริมาณของเส้นใยปาล์มในคอมพอสิตที่มากขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- 3.1.1 สืบค้นข้อมูลทางวิชาการและทบทวนวรรณกรรม
- 3.1.2 ออกแบบการทดลองและจัดหาอุปกรณ์/สารเคมี
- 3.1.3 ดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลตโดยเทคนิคการอัตรัดแบบรีแอกทีฟในเครื่องอัตรัดสกรูคู่และพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร
- 3.1.4 เตรียมคอมพาวนด์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ออร์แกโนเคลย์ และสารคู่ควบที่เตรียมได้ในเครื่องอัตรัดสกรูคู่ที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วนำมาฉีดเป็นชิ้นงานทดสอบ
- 3.1.5 ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้

3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
 - 3.2.1.1 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) จากบริษัท TCI Chemicals ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.2 ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (succinic anhydride) จากบริษัท TCI Chemicals ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.3 ไททาเนียมบิวทอกไซด์ (titanium(IV) butoxide) บริษัท Nacalai Tesque ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) จากบริษัท TCI Chemicals ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.5 ไกลซีดิลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) จากบริษัท TCI Chemicals ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.6 เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) จากบริษัท TCI Chemicals ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.7 คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl_3) จากบริษัท Nacalai Tesque ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.8 เอทานอล (ethanol) จากบริษัท Nacalai Tesque ประเทศญี่ปุ่น
 - 3.2.1.9 แอซีโตน (acetone) จากบริษัท Nacalai Tesque ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมพอสิต
 - 3.2.2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เกรด AZ71TN สำหรับงานฉีด จากบริษัท Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) ประเทศญี่ปุ่น

- 3.2.2.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2.3 ไกลซิديلเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2.4 ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2.5 คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl₃) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย
- 3.2.2.6 แอซีโตน (acetone) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย
- 3.2.2.7 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) จากบริษัท Panreac ประเทศไทย
- 3.2.2.8 ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) จากบริษัท Quality Reagent Chemical ประเทศไทย
- 3.2.2.9 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย
- 3.2.2.10 ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย
- 3.2.2.11 ออร์แกโนเคลย์ (organoclay, cloisite 30B, MLS) จากบริษัท Southern Clay Product ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยแคตไอออน $[N(CH_3)(C_2H_4OH)_2R]^+$ โดย R คืออะลิฟาติกที่มีคาร์บอน 14-18 อะตอม [21]

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
- 3.3.1.1 ขวดก้นกลมสามคอ (three-neck round bottom flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.3.1.2 คอนเดนเซอร์ (condenser)
- 3.3.1.3 ชุดกลั่นสกัดน้ำ (Dean-Stark apparatus, D-S)
- 3.3.1.4 ท่อก๊าซไนโตรเจน (nitrogen inlet)
- 3.3.1.5 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate and magnetic stirrer)
- 3.3.1.6 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)
- 3.3.1.7 หลอดหยดสาร (dropper)
- 3.3.1.8 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 600 มิลลิลิตร
- 3.3.1.9 ชุดกรองบุชเนอร์แบบสุญญากาศ (Büchner funnel, Büchner flask and vacuum pump)

- 3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดแปรรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอรัคคอมพอสิต
- 3.3.2.1 ขวดสามคอแก้วกลม (three-neck round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
 - 3.3.2.2 คอนเดนเซอร์ (condenser)
 - 3.3.2.3 กระจกตวง (graduated cylinder) ขนาด 10 และ 200 มิลลิลิตร
 - 3.3.2.4 ท่อก๊าซไนโตรเจน (nitrogen inlet)
 - 3.3.2.5 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate and magnetic stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
 - 3.3.2.6 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)
 - 3.3.2.7 หลอดหยดสาร (dropper)
 - 3.3.2.8 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 600 มิลลิลิตร
 - 3.3.2.9 ชุดกรองบูชเนอร์แบบสุญญากาศ (Büchner funnel, Büchner flask and vacuum pump)
 - 3.3.2.10 ตู้อบ (hot air oven)
 - 3.3.2.11 เดซิเคเตอร์ (desiccator)
 - 3.3.2.12 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร
 - 3.3.2.13 ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร และบิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร (pipette and burette)
 - 3.3.2.14 เครื่องชั่งสารทศนิยมสองตำแหน่ง (analytical balance)
 - 3.3.2.15 ตู้อบ (hopper dryers) ของ SHINI[®] plastics technologies รุ่น SHD-100T จากเมืองไทเป ประเทศไต้หวัน
 - 3.3.2.16 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28 จากเมืองดีส์บูร์ก ประเทศเยอรมนี
 - 3.3.2.17 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (pelletizer cutting machine) ของ Lab tech engineering company รุ่น LZ-80/VS จากเมืองสมุทรปราการ ประเทศไทย
 - 3.3.2.18 เครื่องฉีดพลาสติก (injection molding) ของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25 จากเมือง New Territories เกาะฮ่องกง
 - 3.3.2.19 เครื่องฉีดพลาสติก (injection molding) ของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC จากเมืองเวียนนา ประเทศออสเตรีย
 - 3.3.2.20 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ของ Thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 จากเมืองแมดิสัน ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 3.3.2.21 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR) ของ JEOL รุ่น ECA-400 และ AL-400 จากเมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.2.22 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K จากเมืองแฟร์อัม ประเทศอังกฤษ
- 3.3.2.23 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR500 จากเมืองแฟร์อัม ประเทศอังกฤษ
- 3.3.2.24 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD จากเมืองไทจง ประเทศไต้หวัน
- 3.3.2.25 เครื่องเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyser, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 จากเมือง Greifensee ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.3.2.26 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Mettler Toledo รุ่น DSC 1 STAR^e System จากเมือง Greifensee ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.3.2.27 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Rigaku รุ่น Thermo plus EVO DSC 8230 จากประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.2.28 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV จากประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.2.29 เครื่องวิเคราะห์การเบี่ยงเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ของ BRUKER AXS รุ่น Diffraktometer D8 จากเมืองคาร์ลสรูเออ ประเทศเยอรมนี
- 3.3.2.30 เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) ของ Anton Paar รุ่น Physica MCR 301 จากเมืองฮาโนเวอร์ ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่าง 1,4-บิวเทนไดออลและกรดซัคซินิก มีไททานเนียมบิวทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำ 1,4-บิวเทนไดออล 0.11 โมล กรดซัคซินิก 0.1 โมล และไททานเนียมบิวทอกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มาผสมให้เข้ากันในขวดก้นกลมสามคอต่อกับคอนเดนเซอร์ประกอบด้วยชุดกลั่นสกัดน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตั้งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ

180 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200-220 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง [42, 43] สังเกตการดำเนินไปของปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยการเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง หลังจากทำปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดให้สกัดสารตั้งต้นที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกด้วยการเติมคลอโรฟอร์ม แล้วตกตะกอนด้วยเอทานอล จากนั้นนำตะกอนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

3.4.2 ขั้นตอนการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลต

3.4.2.1 การกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

(1) เทคนิคการรีฟลักซ์

ละลายพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ในขวดก้นกลมสามคอด้วยคลอโรฟอร์มที่มีการกวนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งต่อคอนเดนเซอร์และท่อก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และไดควิมิลเปอร์ออกไซด์หรือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr ลงไป แล้วทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ล้างสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกด้วยการนำสารละลายที่ได้มาละลายด้วยคลอโรฟอร์มเพิ่ม รีฟลักซ์ต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตกตะกอนด้วยเอซีโตนเย็น ล้างตะกอนด้วยเอซีโตนเย็นหลายๆ ครั้ง นำตะกอนที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [23]



รูปที่ 3.2 เทคนิคการรีฟลักซ์

(2) เทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ

อบเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้นำเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่อบแล้วใส่ในเตาเคเตอร์ แล้วผสมเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr ให้เข้ากัน จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยใช้อุณหภูมิในการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 [25] ล้างสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกด้วยการนำ สารละลายที่ได้มาละลายด้วยคลอโรฟอร์มเพิ่ม รีฟลักซ์ต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตากตะกอนด้วย แอซีโตนเย็น ล้างตะกอนด้วยแอซีโตนเย็นหลายๆ ครั้ง นำตะกอนที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

โซน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Feed	100
1	120
2	130
3	124
4	122
ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)	35

3.4.2.2 การกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

(1) เทคนิคการรีฟลักซ์

ละลายพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ในขวดก้นกลมสามคอด้วยคลอโรฟอร์มที่มีการกวนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งต่อคอนเดนเซอร์และท่อก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเติมไกลซิดิลเมทาคริเลตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และไดควิมิลเปอร์ออกไซด์หรือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr ลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ล้างสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกด้วยการนำสารละลายที่ได้มาละลายด้วยคลอโรฟอร์มเพิ่ม รีฟลักซ์ต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตกตะกอนด้วยแอสिटอนเย็น ล้างตะกอนด้วยแอสिटอนเย็นหลายๆ ครั้ง นำตะกอนที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [27]

(2) เทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ

อบเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้อยู่ในเดซีเคเตอร์ แล้วผสมเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ไกลซิดิลเมทาคริเลตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr ให้เข้ากัน จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิในการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เช่นเดียวกันกับการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ล้างสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกด้วยการนำสารละลายที่ได้มาละลายด้วยคลอโรฟอร์มเพิ่ม รีฟลักซ์ต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตกตะกอนด้วยแอสिटอนเย็น ล้างตะกอนด้วยแอสिटอนเย็นหลายๆ ครั้ง นำตะกอนที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.3 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลต

3.4.3.1 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

นำสารที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2.1 ซึ่งผ่านการล้างสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกแล้ว มาละลายด้วยคลอโรฟอร์มทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 10 มิลลิลิตร ตามด้วยฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยดที่ใช้เป็นสารอินดิเคเตอร์ นำสารละลายที่ยังอ่อนๆมาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ทันที สังเกตการเปลี่ยนสีของฟีนอล์ฟทาลีนจากสารละลายใสเป็นสารละลายสีชมพูจึงทำการหยุดการไทเทรต อ่านค่าของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณการกราฟต์ดังแสดงในสมการที่ 3.1 [44]

$$G_d[\%] = \frac{N(V_1 - V_0) \cdot 98.06}{2 \cdot w \cdot 1000} \cdot 100\% \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

- เมื่อ G_d หมายถึง ร้อยละการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์
 N หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)
 V_1 หมายถึง ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (มิลลิลิตร)
 V_0 หมายถึง ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (มิลลิลิตร)
 w หมายถึง น้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (กรัม)

3.4.3.2 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

นำสารที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2.2 ซึ่งผ่านการล้างสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกแล้ว มาละลายด้วยคลอโรฟอร์มทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 30 นาทีเช่นเดียวกัน จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกในไดเอทิลอีเทอร์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ลงไป 5 มิลลิลิตร ตามด้วยฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยดที่ใช้เป็นสารอินดิเคเตอร์ นำสารละลายมาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ทันที สังเกตการเปลี่ยนสีของฟีนอล์ฟทาลีนจากสารละลายใสเป็นสารละลายสีชมพูจึงทำการหยุดการไทเทรต อ่านค่าของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณการกราฟต์ดังแสดงในสมการที่ 3.2 [27]

$$G_d[\%] = \frac{(0.6 \cdot 10^{-3} - 0.025 \cdot 10^{-3} V_S) \cdot 142.15}{w} \cdot 100\% \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

- เมื่อ G_d หมายถึง ร้อยละการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต
- V_s หมายถึง ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (มิลลิลิตร)
- w หมายถึง น้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (กรัม)

3.4.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลต

3.4.4.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลต โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) ในช่วงเลขคลื่น (wavenumber) $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ใช้จำนวนสแกน (scanning times) เท่ากับ 64 และใช้ความละเอียดของภาพ (resolution) เท่ากับ 4 cm^{-1}



รูปที่ 3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ของ Thermo scientific รุ่น Nicolet 6700

3.4.4.2 วิเคราะห์หาโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดิลเมทาคริเลตด้วยการพิจารณาโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$) ในโครงสร้างสาร โดยใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR) ของ JEOL รุ่น AL-400 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยนำสารที่เตรียมจากข้อ 3.4.2.2 ใช้คลอโรฟอร์มไอโซโทปดิวทีเรียม (chloroform-d) เป็นตัวทำละลาย วิเคราะห์ที่ความถี่ 400 MHz ช่วง 0-10 ppm จำนวนสแกนเท่ากับ 64



รูปที่ 3.5 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ของ JEOL รุ่น AL-400

3.4.4.3 วิเคราะห์หาโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซิดิลเมทาคริเลตด้วยการพิจารณาคาร์บอน-13 (^{13}C -NMR) ในโครงสร้างสาร โดยใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR) ของ JEOL รุ่น ECA-400 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยนำสารที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2.2 มาทำการบดให้เป็นผงละเอียดแล้ววิเคราะห์ที่ความถี่ 400 MHz ในช่วง 0-200 ppm จำนวนสแกนเท่ากับ 1000



รูปที่ 3.6 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ของ JEOL รุ่น ECA-400

3.4.5 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์และชิ้นงาน

(1) นำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBS-g-MA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA) และออร์แกโนคลีย์ (organoclay) อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์

(2) ผสมส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต และออร์แกโนเคลย์ ใน อัตราส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์

สูตรที่	ชื่อสูตร	PBS (phr)	PBS-g-MA (phr)	PBS-g-GMA (phr)	Organoclay (phr)
1	PBS	100	-	-	-
2	PBS/PgM5	100	5	-	-
3	PBS/PgG3	100	-	3	-
4	PBS/PgG5	100	-	5	-
5	PBS/PgG10	100	-	10	-
6	PBS/O0.5	100	-	-	0.5
7	PBS/PgG3/O0.5	100	-	3	0.5
8	PBS/PgG5/O0.5	100	-	5	0.5
9	PBS/PgG10/O0.5	100	-	10	0.5
10	PBS/O1	100	-	-	1
11	PBS/PgG3/O1	100	-	3	1
12	PBS/PgG5/O1	100	-	5	1
13	PBS/PgG10/O1	100	-	10	1
14	PBS/O2	100	-	-	2
15	PBS/PgM5/O2	100	5	-	2
16	PBS/PgG3/O2	100	-	3	2
17	PBS/PgG5/O2	100	-	5	2
18	PBS/PgG10/O2	100	-	10	2
19	PBS/O6	100	-	-	6
20	PBS/PgM5/O6	100	5	-	6
21	PBS/PgG3/O6	100	-	3	6
22	PBS/PgG5/O6	100	-	5	6
23	PBS/PgG10/O6	100	-	10	6

- (3) นำส่วนผสมที่เตรียมไว้มาทำเป็นพอลิเมอร์คอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรู ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เช่นเดียวกับภาวะที่ใช้ในการกราฟต์พอลิวิทิลีนซัลไฟเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์หรือไกลซีดิลเมทาคริเลต
- (4) นำพอลิวิทิลีนซัลไฟเนตคอมพาวนด์ที่ได้จากข้อ (3) มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (5) นำพอลิวิทิลีนซัลไฟเนตคอมพาวนด์ที่อบแล้วไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (injection molding) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (กรณีศึกษาชนิดของสารคู่ควบ) และ 3.8 (กรณีศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและตัวเติมเสริมแรง) โดยขึ้นรูปตามภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 เครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery รุ่น A25



รูปที่ 3.8 เครื่องฉีดพลาสติกของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

โซน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	0
2	0
3	0
4	135
5	135
6	135
7	135
ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)	45

โดยการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

(1) ผลของชนิดสารคู่ควบ ได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริลเลต ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ โดยเปรียบเทียบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ต่างๆ ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ที่ใช้ในการศึกษาชนิดของสารคู่ควบ

ชื่อสูตร	PBS (phr)	PBS-g-MA (phr)	PBS-g-GMA (phr)	Organoclay (phr)
PBS	100	-	-	-
PBS/PgM5	100	5	-	-
PBS/PgG5	100	-	5	-
PBS/O2	100	-	-	2
PBS/PgM5/O2	100	5	-	2
PBS/PgG5/O2	100	-	5	2
PBS/O6	100	-	-	6
PBS/PgM5/O6	100	5	-	6
PBS/PgG5/O6	100	-	5	6

(2) ผลของอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบที่เลือกได้จากข้อ (1) และออร์แกโนเคลย์ที่ใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต โดยเปรียบเทียบพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพาวนด์ต่างๆ ตามตารางที่ 3.5

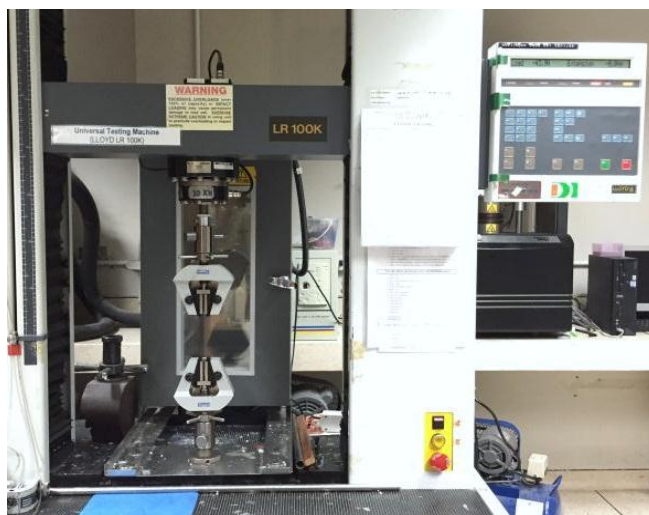
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพาวนด์ที่ใช้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและตัวเติมเสริมแรง

ชื่อสูตร	PBS (phr)	PBS-g-GMA (phr)	Organoclay (phr)
PBS	100	-	-
PBS/PgG3	100	3	-
PBS/PgG5	100	5	-
PBS/PgG10	100	10	-
PBS/O0.5	100	-	0.5
PBS/PgG3/O0.5	100	3	0.5
PBS/PgG5/O0.5	100	5	0.5
PBS/PgG10/O0.5	100	10	0.5
PBS/O1	100	-	1
PBS/PgG3/O1	100	3	1
PBS/PgG5/O1	100	5	1
PBS/PgG10/O1	100	10	1
PBS/O2	100	-	2
PBS/PgG3/O2	100	3	2
PBS/PgG5/O2	100	5	2
PBS/PgG10/O2	100	10	2
PBS/O6	100	-	6
PBS/PgG3/O6	100	3	6
PBS/PgG5/O6	100	5	6
PBS/PgG10/O6	100	10	6

3.4.6 การทดสอบสมบัติของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดฉีด

3.4.6.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

(1) การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties) ได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) ซึ่งใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน อัตราที่ใช้ในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที มีระยะห่างระหว่างหัวจับและชิ้นงานเท่ากับ 115 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR100K

(2) การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) แบบ three-point bending ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials) ซึ่งใช้ load cell ขนาด 2500 นิวตัน อัตราที่ใช้ในการดึง 15 มิลลิเมตรต่อนาที มีระยะห่างระหว่างหัวจับและชิ้นงานเท่ากับ 55 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR500

(3) การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength) แบบไอซอด (Izod) ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact-pendulum tester) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 (Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics) ซึ่งใช้หัวค้อนขนาด 5.5 และ 2.75 จูล



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD

3.4.6.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา

(1) ศึกษาขนาดและลักษณะการกระจายตัวของออร์แกโนเคลย์ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งทดสอบบริเวณรอยแตกหัก (fracture surface) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง โดยนำชิ้นงานมาทำการเคลือบทอง ใช้ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 15 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV

(2) ศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นออร์แกนิกในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่มีการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยใช้รังสี $\text{Cu-K}\alpha$ ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.154 นาโนเมตร ทดสอบในช่วง 1 ถึง 10° อัตราในการสแกนเท่ากับ 2.4 องศาต่อนาที



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BRUKER AXS รุ่น Diffraktometer D8

3.4.6.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

(1) การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM E2550 โดยเครื่องเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyser, TGA) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 10 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851

(2) การวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และปริมาณผลึก (percent of crystallinity, χ_c) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี ตามมาตรฐาน ASTM D7426 โดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ซึ่งขั้นตอนในการศึกษาชนิดของสารคู่ควบระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิลิลเมทาคริเลตใช้เครื่อง Rigaku รุ่น Thermo plus EVO DSC 8230 ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 150 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะอากาศ ส่วนขั้นตอนการศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและตัวเติมเสริมแรงนั้นทำการศึกษาด้วยเครื่อง Mettler Toledo รุ่น DSC 1 STAR^c System ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 10 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.15 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Rigaku รุ่น Thermo plus EVO DSC 8230



รูปที่ 3.16 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo รุ่น DSC 1 STAR[®] System

3.4.6.4 การทดสอบสมบัติด้านความหนืด

ในขั้นตอนการศึกษาชนิดของการใช้สารควบคู่กันได้ทำการศึกษาถึงผลของการใช้สารควบคู่แต่ ละชนิดที่มีต่อความหนืดของพอลิบิวทิลีนซกซีเนตคอมพอสิตด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) ดัง แสดงในรูปที่ 3.17 โดยทดสอบอัตราแรงเฉือน (shear rate) ในช่วง 0.1 ถึง 10 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.17 เครื่องรีโอมิเตอร์ของ Anton Paar รุ่น Physica MCR 301

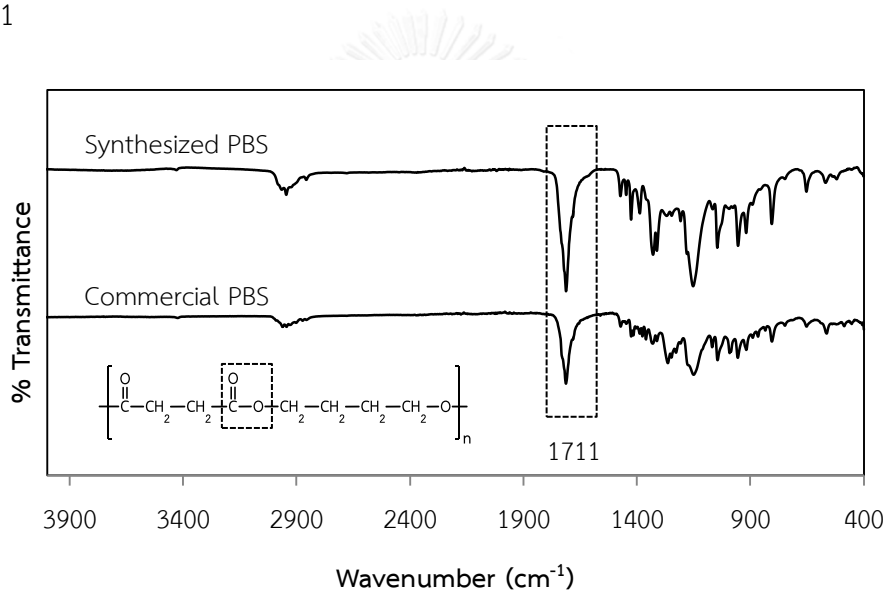
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

จากการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยปฏิกิริยาการควบแน่นพบว่าได้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นของแข็งสีขาว โดยผลของการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สังเคราะห์ได้และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้าโดยเทคนิค FTIR มีความคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1

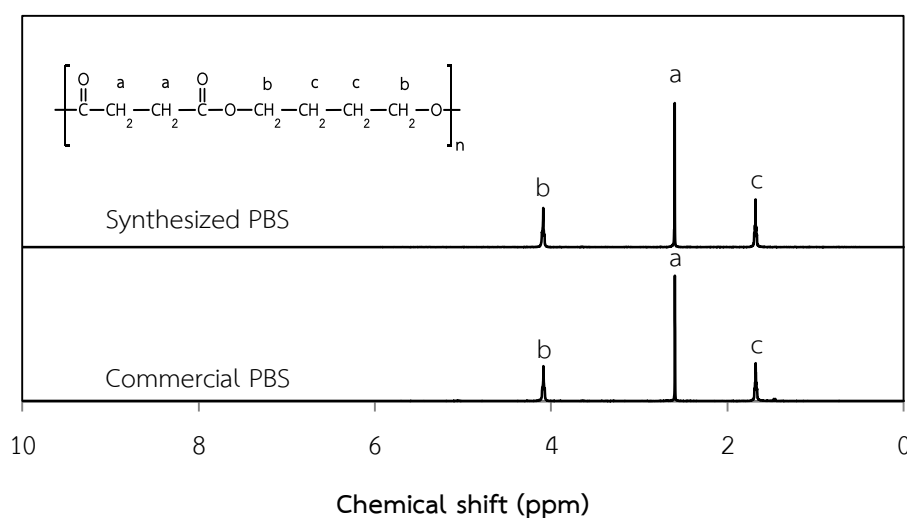


รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สังเคราะห์ (Synthesized PBS) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า (Commercial PBS)

จาก FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทั้งสอง จะเห็นว่าในช่วงตำแหน่งเลขคลื่น 3000-2850 cm⁻¹ แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H (C-H stretching) และแสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O (C=O stretching) ซึ่งเป็นพิกของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1711 cm⁻¹ ส่วนในช่วง 1470-1000 cm⁻¹ แสดงการสั่นแบบโค้งงอในระนาบเดียวกันของพันธะ C-H (C-H bending in-plane) และยังพบพิกในช่วง 1000-400 cm⁻¹ ซึ่งแสดงการสั่นแบบโค้งงอต่างระนาบของพันธะ C-H (C-H bending out-of-plane) [24] ดังนั้นจะเห็นว่าสามารถสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ด้วยวิธีการดังกล่าว

4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^1\text{H-NMR}$

พิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ โดยเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตทางการค้า พบว่าลักษณะพีคทั้งสองมีความสอดคล้องคล้ายกัน โดยปรากฏพีคที่ 2.60 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งโปรตอนของหมู่เมทิลีนที่มาจากหน่วยของกรดซักซินิก (H_a) ส่วนพีคที่ 4.09 และ 1.67 ppm แสดงตำแหน่งโปรตอนของหมู่เมทิลีนที่มาจากหน่วยของ 1,4-บิวเทนไดออล (H_b และ H_c) [24, 43] ดังปรากฏในรูปที่ 4.2



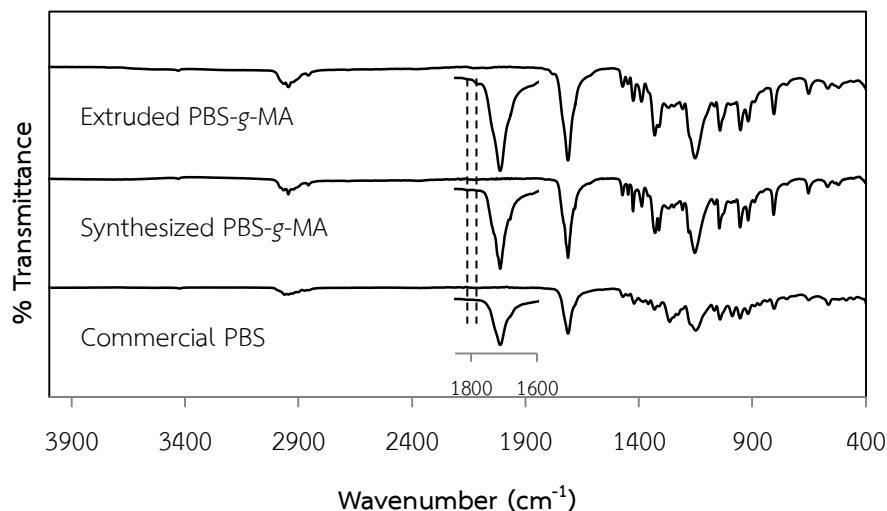
รูปที่ 4.2 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่สังเคราะห์ (Synthesized PBS) และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตทางการค้า (Commercial PBS)

4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

เมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ระหว่างเทคนิคการรีฟลักซ์จากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตสังเคราะห์และเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตทางการค้า พบว่า FTIR สเปกตรัมทั้งสองสอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์พบพีคที่เกิดขึ้นใหม่เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่บริเวณ 1780 และ 1812 cm^{-1} ซึ่งแสดงการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ($\text{C}=\text{O}$ stretching) ของหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์จากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่

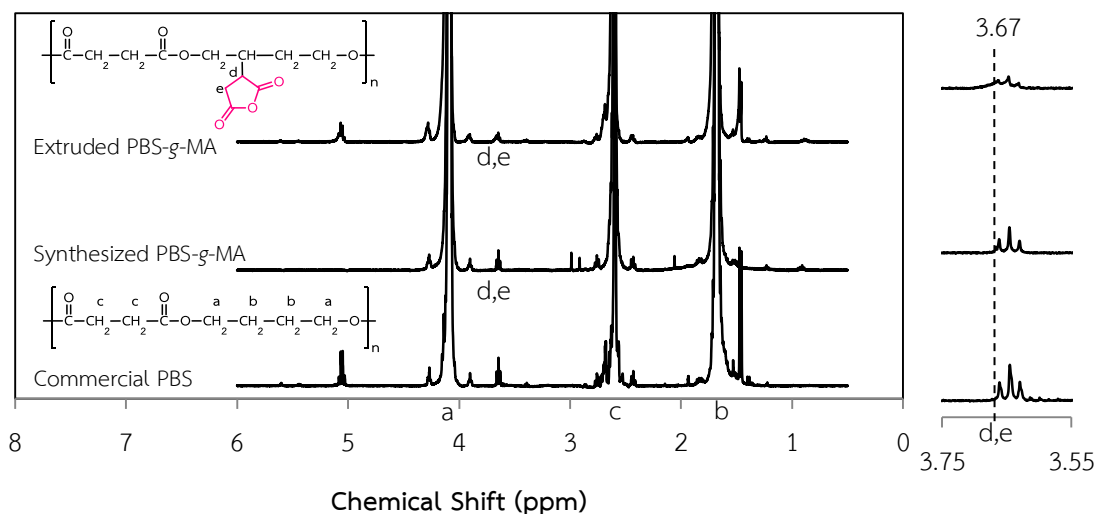
กราฟต์แล้ว [24] แสดงให้เห็นว่ามีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรากฏอยู่ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่กราฟต์จากวิธีการเตรียมทั้งสอง



รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า

4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^1\text{H-NMR}$

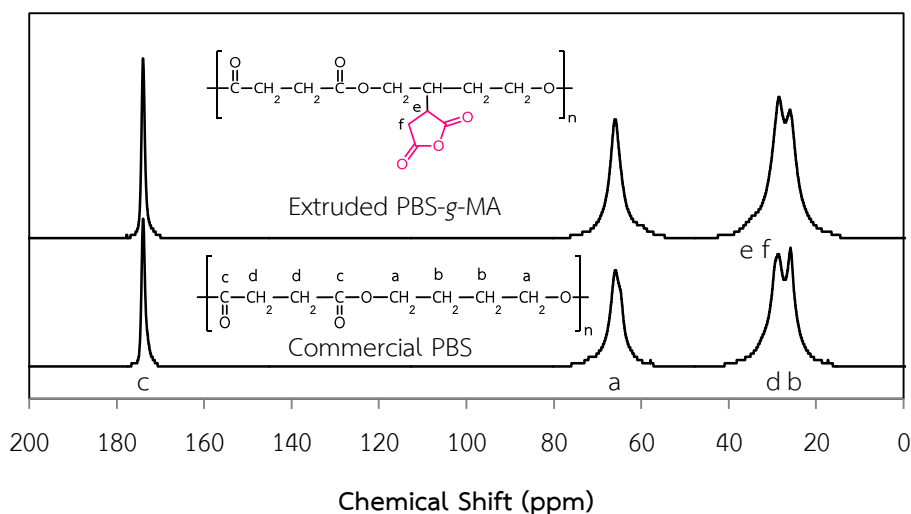
นอกจากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ เพื่อเปรียบเทียบการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากการเตรียมทั้งสองเทคนิค ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าสเปกตรัมทั้งสองมีพีคใหม่ปรากฏขึ้นที่บริเวณ 3.67 ppm ซึ่งเป็นการเกิดลักษณะเรโซแนนซ์ของโปรตอนที่มาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เกิดการกราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (H_d และ H_e) [24] แต่สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่กราฟต์จากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟเห็นพีคไม่ชัดเจน อาจเนื่องมาจากปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีปริมาณอยู่น้อย



รูปที่ 4.4 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตทางการค้า

4.2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^{13}\text{C-NMR}$

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^{13}\text{C-NMR}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตจะมีพีคเกิดขึ้น 4 พีค ได้แก่ 65.91 ppm และ 25.90 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของคาร์บอนในหมู่เมทิลีนของหน่วย 1,4-บิวเทนไดออล (C_a และ C_b) ส่วน 28.68 ppm เป็นตำแหน่งของคาร์บอนชนิดเมทิลีนของหน่วยกรดซึกซิินิก (C_d) และ 173.93 ppm แสดงถึงคาร์บอนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C_c) ส่วนสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่ทำการกราฟต์จากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟจะเห็นพีคใหม่เกิดขึ้นซ้อนทับอยู่ในฐานของพีคพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต ซึ่งเห็นได้จากที่บริเวณฐานช่วง 30-40 ppm จะมีลักษณะฐานที่ค่อนข้างกว้างเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต ซึ่งบริเวณช่วงดังกล่าวแสดงถึงการเกิดการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต (H_e และ H_f) [23] โดยปริมาณการกราฟต์ที่น้อยส่งผลทำให้เห็นพีคที่ไม่ชัดเจน

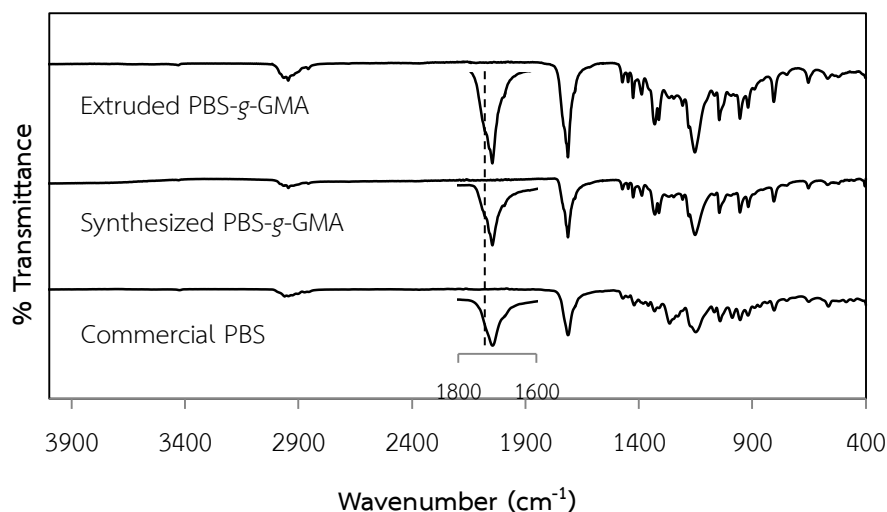


รูปที่ 4.5 ^{13}C -NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า

4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต

4.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

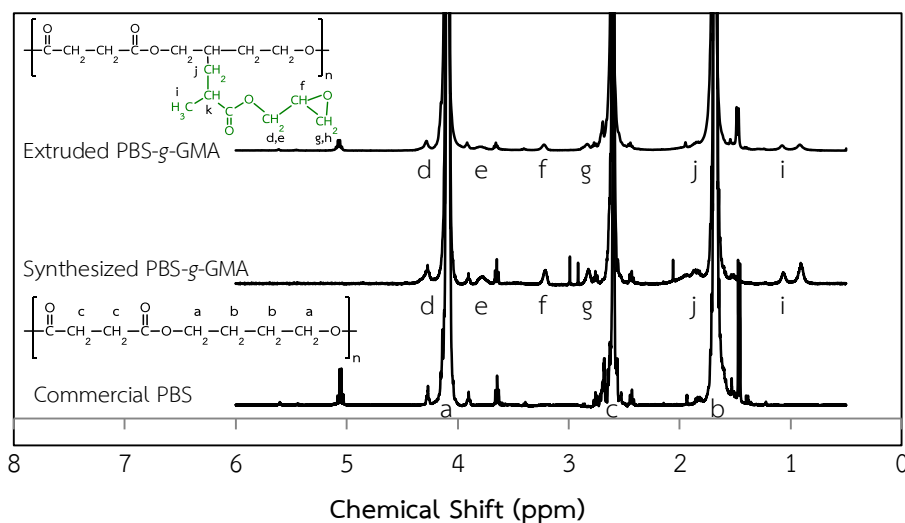
จากการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตเพื่อใช้เป็นสารคู่ควบด้วยเทคนิคการรีฟลักซ์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่กราฟต์ด้วยเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าสเปกตรัมทั้งสองมีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือมีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 1730 และ 1152 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ C=O และ C-O (C=O stretching และ C-O stretching) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะของหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ที่เพิ่มมาจากส่วนไกลซีดิลเมทาคริเลต นอกจากนี้ยังพบพีคของหมู่ฟังก์ชันอีพ็อกซีของไกลซีดิลเมทาคริเลตปรากฏอยู่บนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่กราฟต์แล้วบริเวณ 1150 (C-O stretching) และ 856 cm^{-1} (C-H bending) [45] จากสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตได้จากทั้งสองเทคนิค



รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า

4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^1\text{H-NMR}$

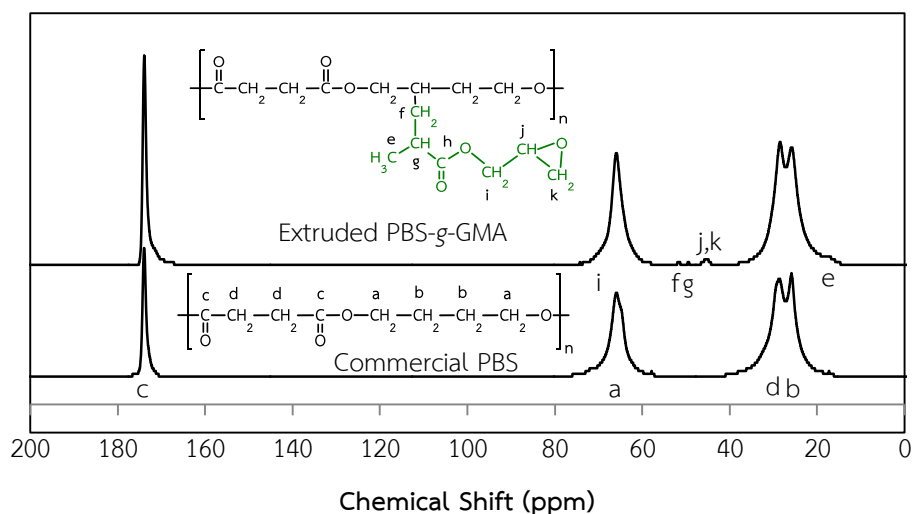
ผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ (รูปที่ 4.7) พบว่าสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตจากเทคนิคการรีฟลักซ์และเทคนิคการอัดรีดแบบปรีเอกทีพีมี่พีดปรากฏขึ้นใหม่ในช่วง 2.69-2.83 ppm ($-\text{OCH}_2$), (H_g) และ 3.22 ppm ($-\text{CH}-$), (H_f) ซึ่งเป็นพีคของโปรตอนในหมู่ฟังก์ชันอีพ็อกซี นอกจากนี้มีพีคที่ 1.08 ppm เป็นสัญญาณของโปรตอนของหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$), (H_i) และที่ 3.79 ppm แสดงพีคของโปรตอนของหมู่เมทิลีน ($-\text{CH}_2-$), (H_e) ซึ่งเป็นพีคของโปรตอนที่มาจากไกลซีดีลเมทาคริเลต อีกทั้งสเปกตรัมทั้งสองที่ได้ี้มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมที่รายงานมาก่อนหน้านี้จากงานวิจัยของ Xu และคณะ [46] ซึ่งเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต แสดงให้เห็นว่าสามารถกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลตบนโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้



รูปที่ 4.7 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต จากพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตสังเคราะห์และจากพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตทางการค้า

4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy แบบ $^{13}\text{C-NMR}$

จากการวิเคราะห์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตโดยเทคนิค $^{13}\text{C-NMR}$ พบว่าสเปกตรัมของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตที่กราฟต์จากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟจะเห็นพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 18.67 ppm เป็นตำแหน่งคาร์บอนชนิดเมทิล ($-\text{CH}_3$), (C_e) ที่ 51.74 ppm เป็นตำแหน่งคาร์บอนชนิดเมทิลีน ($-\text{CH}_2-$), (C_f) ที่กราฟต์อยู่บนโครงสร้างของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ที่ 49.54 ppm เป็นตำแหน่งของคาร์บอนชนิดมีโทไน ($-\text{CH}-$), (C_g) และที่ 45.39 ppm แสดงตำแหน่งของคาร์บอนของหมู่อีพอกซี ($\text{C}_{j,k}$) ในไกลซีดีลเมทาคริเลต ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยลักษณะสเปกตรัมของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตที่ได้มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองของ Wu และคณะ [27]



รูปที่ 4.8 ^{13}C -NMR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วย โกลซีติลเมทาคริเลตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทางการค้า

4.4 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ผ่านการตกตะกอนทำให้สารบริสุทธิ์มาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ นำปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตมาคำนวณตามสมการที่ 3.1 เพื่อหาปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เกิดขึ้น โดยปริมาณการกราฟต์ของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.1 กล่าวคือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟที่มีปริมาณการกราฟต์อยู่ที่ร้อยละ 0.29 ซึ่งมีปริมาณการกราฟต์ที่น้อยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ NMR ที่เห็นพีกของหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่กราฟต์ไม่ชัดเจน ซึ่งมีสาเหตุมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากความชื้นในบรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังคงมีปริมาณการกราฟต์ที่สูงกว่าเทคนิคการรีฟลักซ์ซึ่งมีปริมาณการกราฟต์เพียงร้อยละ 0.24 อาจเป็นเพราะเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟที่มีการให้อุณหภูมิที่สูงมากเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาการกราฟต์เกิดได้ดีกว่า อีกทั้งมีแรงเฉือนจากสกรูช่วยในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลการไทเทรตเพื่อหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นของ KOH (M)	ปริมาตรของ KOH (mL)	G _d (%)
PBS pure (Blank)	1	0.4732	0.0267	0.25	
	2	0.4824		0.35	
Extruded PBS-g-MA	1	0.5001		1.50	0.29
	2	0.5004		1.35	
Synthesized PBS pure (Blank)	1	0.2600		0.35	
	2	0.2547		0.40	
Synthesized PBS-g-MA	1	0.2108		0.70	0.24

4.5 การหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต

นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตที่ทำให้บริสุทธิ์มาทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วทำการไทเทรตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เหลือกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ นำปริมาตรที่ใช้ในไทเทรตมาคำนวณตามสมการที่ 3.2 จะได้ปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่กราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตจากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟมีปริมาณการกราฟต์สูงถึงร้อยละ 3.08 ส่วนการกราฟต์ด้วยเทคนิคการรีฟลักซ์มีเพียงร้อยละ 2.33 อาจเนื่องมาจากเหตุผลเดียวกันกับการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คืออุณหภูมิและแรงเฉือนจากสกรูที่ใช้ในเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟสามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี

ตารางที่ 4.2 ผลการไทเทรตเพื่อหาปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นของ KOH (M)	ปริมาตรของ KOH (mL)	G _d (%)
PBS pure (Blank)	1	0.4704	0.0267	28.50	3.08
	2	0.4715		28.05	
Extruded PBS-g-GMA	1	0.4913		25.70	
	2	0.5002		26.25	
Synthesized PBS pure (Blank)	1	0.2479		28.00	
	2	0.2513		28.35	
Synthesized PBS-g-GMA	1	0.2495		26.55	2.33
	2	0.2503		26.80	

จากผลการทดสอบหาปริมาณการกราฟต์ด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟและเทคนิคการรีฟลักซ์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และไกลซีดีลเมทาคริเลต แสดงให้เห็นถึงการประสบความสำเร็จในการกราฟต์ด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีด้วยการใช้อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่เหมาะสม อีกทั้งยังลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้น้อยลงและเป็นเทคนิคที่ลดการใช้ตัวทำละลาย ส่งผลให้ประหยัดทั้งเวลาและสารเคมีที่ใช้ในการกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้แล้วสามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมจริงได้เป็นการลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางด้วย

4.6 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเพื่อศึกษาชนิดของสารคู่ควบที่ใช้

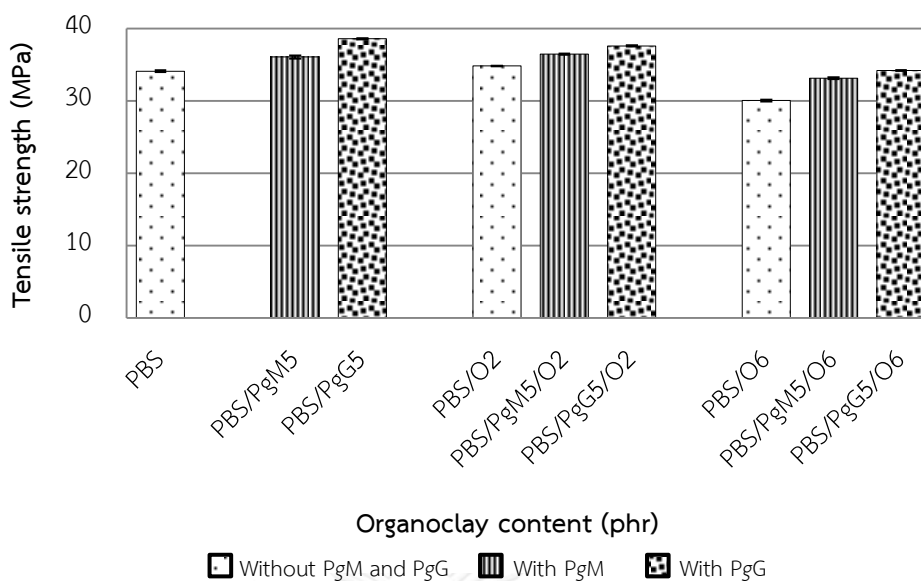
ผลจากการทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดพลาสติกของพอลิเมอร์คอมพาวนด์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25 โดยในขั้นตอนการศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบนี้ใช้ปริมาณของสารคู่ควบเท่ากับ 5 phr และออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ 2 และ 6 phr เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.6.1 สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.6.1.1 สมบัติด้านแรงดึง

(1) ความทนแรงดึง

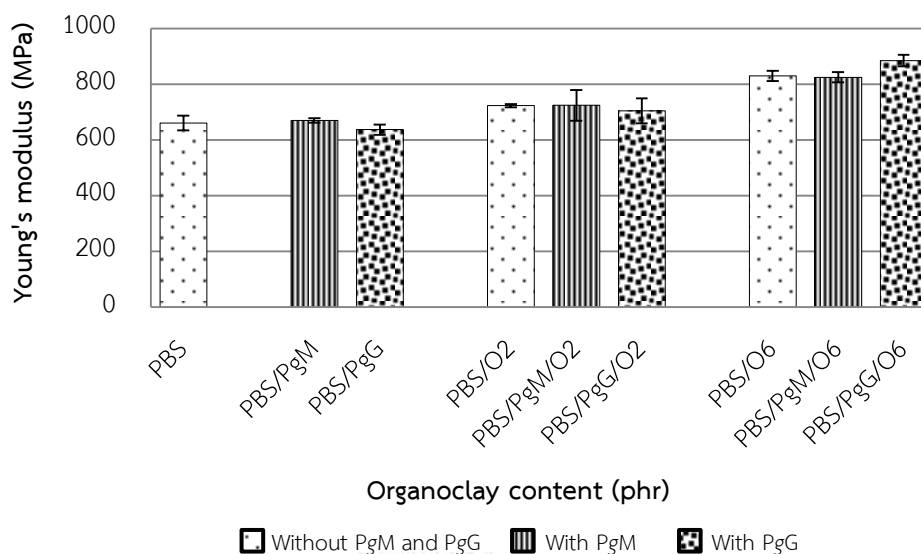
เมื่อนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมาทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เพื่อพิจารณาความทนแรงดึงของคอมพอสิต ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 34.11 MPa เมื่อมีการเติมออร์แกนโอคลอย์ในปริมาณ 2 และ 6 phr เป็นสารเสริมแรงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.86 และ 30.07 MPa ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเติมออร์แกนโอคลอย์ในปริมาณ 6 phr เพราะออร์แกนโอคลอย์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเข้ากันได้น้อย อันเนื่องมาจากความมีขั้วของออร์แกนโอคลอย์ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองระหว่างออร์แกนโอคลอย์ มีการกระจายตัวของสารเสริมแรงไม่ดีทำให้คอมพอสิตที่ได้มีข้อบกพร่องในชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงจากภายนอกมากระทำ การส่งแรงที่ถูกระงับจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสู่ออร์แกนโอคลอย์จึงทำได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงไม่ดีเท่าที่ควร ค่าความทนแรงดึงจึงน้อยลง เมื่อมีการใช้สารคู่ควบได้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต จะเห็นว่าสารทั้งสองสามารถเพิ่มค่าความทนแรงดึงให้กับคอมพอสิตให้สูงขึ้น โดยการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตจะช่วยเพิ่มความทนแรงดึงได้มากกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งค่าทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอคลอย์ในปริมาณ 2 และ 6 phr จะมีค่าเท่ากับ 36.49 และ 33.15 MPa ตามลำดับ และเมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 37.61 และ 34.22 MPa ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aggarwal และคณะ [40] รวมทั้ง Asgari และคณะ [47] เนื่องมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายกว่าไกลซิดีลเมทาคริเลตทำให้เกิดปฏิกิริยากับออร์แกนโอคลอย์ได้ยากกว่า และไกลซิดีลเมทาคริเลตมีหมู่ฟังก์ชันอีพอกซีซึ่งง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยากับออร์แกนโอคลอย์ได้ดีกว่า ส่งผลให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

(2) มอดุลัสของยัง

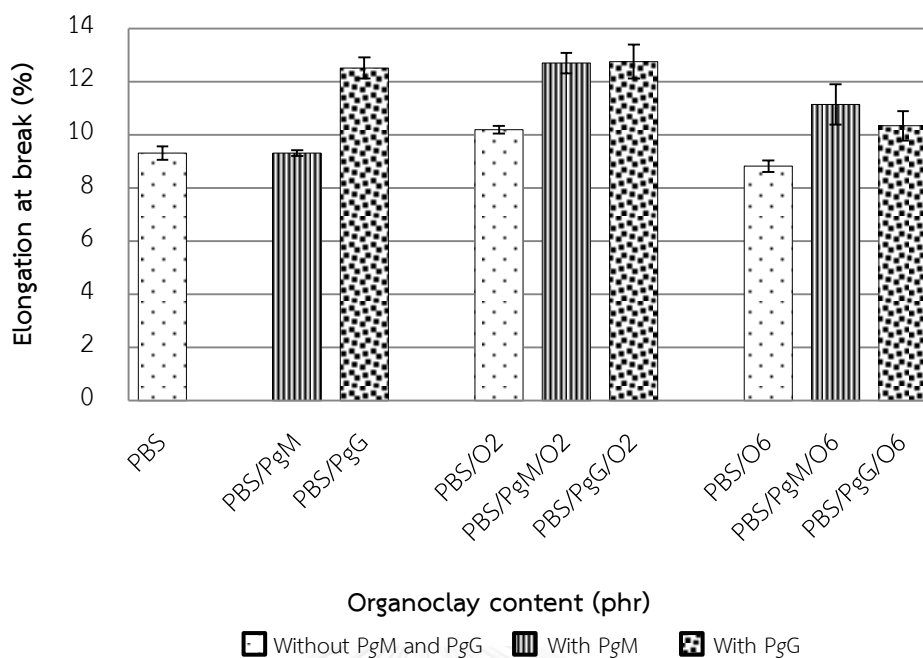
ผลการวิเคราะห์ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต ในรูปที่ 4.10 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 661.33 MPa และเมื่อเติม ออร์แกโนเคลย์เป็นสารเสริมแรงลงไปเป็นปริมาณ 2 และ 6 phr ส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นมีค่า เท่ากับ 724.10 และ 830.68 MPa ตามลำดับ เนื่องมาจากผลของการเติมอนุภาคที่มีลักษณะแข็ง เช่น ออร์แกโนเคลย์ ซึ่งมีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เป็นเมทริกซ์ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ ส่งผลให้คอมพอสิตมีค่ามอดุลัสสูงขึ้น [48] นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มี ออร์แกโนเคลย์เป็นปริมาณ 2 และ 6 phr เมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีค่าเท่ากับ 725.31 และ 825.22 MPa ซึ่งมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่ง ถูกไฮโดรไลซิสได้ง่าย ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออร์แกโนเคลย์ได้ไม่ดีส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะที่เปราะ ทำให้มีความเสียรูปง่ายเมื่อการถูกแรงกระทำจากภายนอก ดังนั้นค่ามอดุลัสของยังจึงลดลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสของยังที่ได้ของคอมพอสิตยังคงสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ในกรณีของการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตในคอมพอสิตที่มีออร์แกโนเคลย์ ปริมาณ 2 และ 6 phr พบว่าให้ค่ามอดุลัสของยังในคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 705.14 และ 885.31 MPa ตามลำดับ เนื่องมาจากมีความเข้ากันได้มากขึ้นของทั้งสองเฟสระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และออร์แกโนเคลย์



รูปที่ 4.10 มอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตและพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอลสิต

(3) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

จากการวิเคราะห์ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอลสิตปรากฏข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับร้อยละ 9.32 เมื่อทำการเติมออร์แกนอเคลย์ในปริมาณ 2 และ 6 phr เพื่อทำเป็นวัสดุคอมพอลสิตจะให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับร้อยละ 10.2 และ 8.83 ตามลำดับ ที่ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 6 phr มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงเนื่องมาจากการกระจายตัวในเนื้อพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตของออร์แกนอเคลย์ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้กลายเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงไม่สามารถกระจายแรงได้ แต่เมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์หรือพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบทำหน้าที่ประสานระหว่างเฟสทั้งสอง ส่งผลให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าที่ออร์แกนอเคลย์ 2 และ 6 phr เมื่อเติมใช้พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.71 และ 11.15 ตามลำดับ ส่วนพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลตจะให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับร้อยละ 12.76 และ 10.35 ตามลำดับ

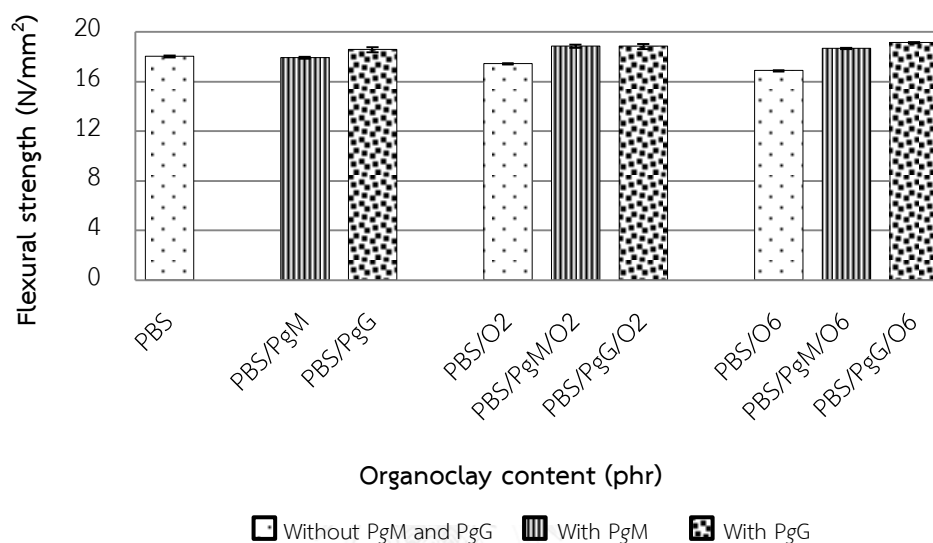


รูปที่ 4.11 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตและพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอลสิต

4.6.1.2 ความทนแรงดัดโค้ง

จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าการใช้อร์แกนโอคลีย์ในปริมาณ 2 และ 6 phr เป็นสารเสริมแรงจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มที่ลดลง โดยมีค่า 17.44 และ 16.89 N/mm² ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต ซึ่งมีค่า 18.03 N/mm² อาจเป็นเพราะว่าอร์แกนโอคลีย์เป็นสารที่มีขั้วสูง ยิ่งเพิ่มปริมาณอร์แกนโอคลีย์มากขึ้นอันตรกิริยาภายในอร์แกนโอคลีย์จึงมีมากขึ้น และมีมากกว่าอันตรกิริยาระหว่างอร์แกนโอคลีย์กับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วต่ำ ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันกลายเป็นข้อบกพร่องในชิ้นงาน เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกทำให้ไม่สามารถกระจายแรงที่รับเข้ามาได้ ชิ้นงานเกิดการเสียรูปได้ง่ายซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความทนแรงดัดโค้งที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อมีการใช้สารคู่ควบทั้งสองพบว่าสามารถเพิ่มค่าความทนแรงดัดโค้งให้กับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอลสิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอลสิตที่เสริมแรงด้วยอร์แกนโอคลีย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.85 และ 19.14 N/mm² ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าความทนแรงดัดโค้งได้ดีกว่า เนื่องจากสามารถกระจายแรงที่ถูกกระทำจากพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตส่วนที่เป็นเมทริกซ์ผ่านพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตไปยังอร์แกนโอคลีย์ได้ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าสารคู่ควบชนิดนี้สามารถใช้เป็นสารเพิ่มอันตรกิริยา

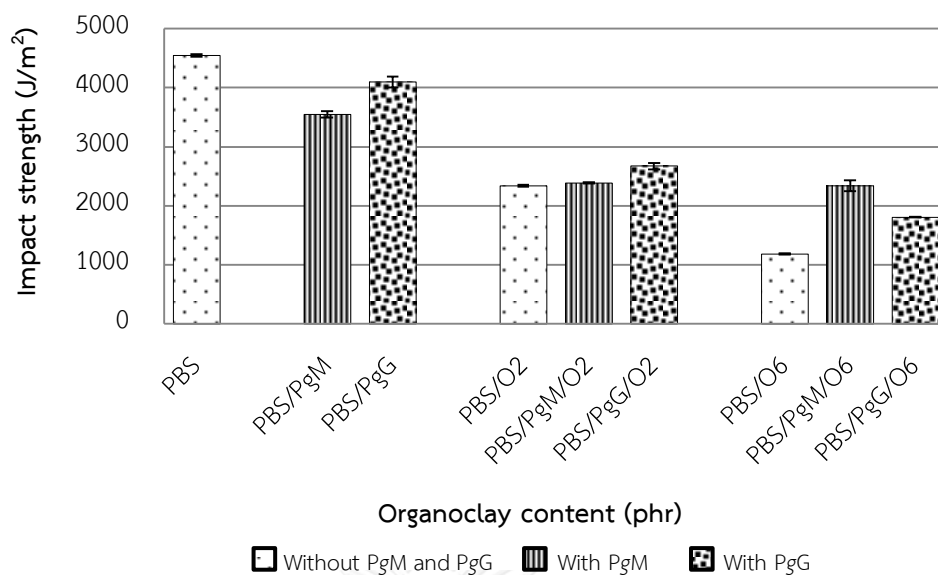
ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกนโอเคลย์ได้ ในกรณีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ก็สามารถกระจายแรงผ่านหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไปยังออร์แกนโอเคลย์ได้ เช่นเดียวกัน แต่ประสิทธิภาพยังไม่ดีเท่าที่ควรซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการถูกไฮโดรไลซิสจากการเตรียมทำให้ปริมาณการกราฟต์ไม่สูงเท่าที่ควร ดังนั้นจึงไม่สามารถเพิ่มค่าความทนแรงดัดโค้งได้มาก เท่ากับการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.12 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์

4.6.1.3 ความทนแรงกระแทก

เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เมื่อได้รับแรงในระยะเวลาสั้นๆ โดยนำชิ้นงานมาทำการทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) แบบ Notched Izod Impact Testing ใช้หัวค้อนขนาด 5.5 จูล ทดสอบส่งแรงกระแทก มาที่ชิ้นงานที่มีรอยบาก ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 4546.8 J/m^2 แสดงให้เห็นว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถดูดซับพลังงานได้ดี แต่เมื่อเติมออร์แกนโอเคลย์ลงไปปริมาณ 2 และ 6 phr จะให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลงเป็น 2337.95 และ 1182.4 J/m^2 ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของออร์แกนโอเคลย์ กลายเป็นจุดความเข้มแรงเค้น (stress concentration) ส่งผลให้เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงไม่สามารถกระจายแรงไปยังสารเสริมแรงได้ อย่างไรก็ตามการใช้สารคู่ควบในออร์แกนโอเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์สามารถช่วยเพิ่มค่าของความทนแรงกระแทกนี้ได้เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์ที่ไม่ใช้สารคู่ควบ แสดงให้เห็นว่าสารคู่ควบสามารถช่วยในการกระจายพลังงานจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ไปยังออร์แกนโอเคลย์ซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่จะช่วยดูดซับพลังงานได้ก่อนเกิดการแตกหัก



รูปที่ 4.13 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.6.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตนั้นสามารถพิจารณาได้จาก อุณหภูมิในการหลอมผลึก (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรีรุ่น Thermo plus EVO DSC 8230 โดยทดสอบภายใต้สภาวะอากาศ ผลปรากฏดังในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

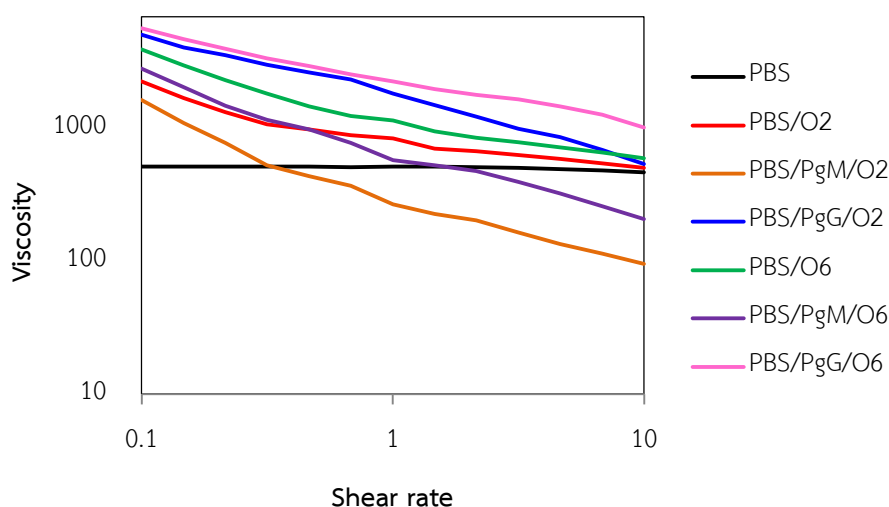
ชื่อสูตร	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	T_c (°C)
PBS	105.5	110.8	73.4
PBS/PBSgMA	101.5	109.6	76.6
PBS/PBSgGMA	104.8	110.6	73.8
PBS/O2	105.4	110.7	74.0
PBS/PBSgMA/O2	102.5	110.3	73.6
PBS/PBSgGMA/O2	106.9	110.7	77.1
PBS/O6	105.6	110.4	73.9
PBS/PBSgMA/O6	103.6	110.5	73.7
PBS/PBSgGMA/O6	107.3	110.5	81.5

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่า มีสองค่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 48] เนื่องจากมีความแตกต่างของชนิดผลึกที่พบในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต กล่าวคืออุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าต่ำกว่าจะเป็นค่าของการหลอมผลึกที่เป็นต้นแบบ (original crystals) ในขณะที่อุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าสูงกว่าจะแสดงถึงการหลอมผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (recrystallized crystals) จากผลการทดสอบเป็นอุณหภูมิที่ได้จากการให้ความร้อนในครั้งที่สอง เนื่องจากการให้ความร้อนในครั้งแรกจะเป็นการกำจัดประวัติทางความร้อน (thermal history) ของตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนในการให้ความร้อนครั้งที่สองพบว่า อุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าต่ำกว่า (T_{m1}) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบ เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงได้ดีกว่า ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันมากขึ้น ช่วยให้เฟสทั้งสองมีความเข้ากันได้มากขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวสูงขึ้น และจากการที่มีแรงยึดระหว่างกันทำให้ชิ้นงานมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็ง การเคลื่อนที่ของสายโซ่จึงเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้เกิดผลึกขณะให้ความเย็นจึงมีค่าที่สูงขึ้นด้วย แต่อุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าสูงกว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง อาจเป็นเพราะว่าผลึกในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์ทำให้ยากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 48] กรณีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคู่ควบให้ค่าอุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าต่ำกว่า (T_{m1}) ลดลง มีสาเหตุมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความไวต่อการถูกไฮโดรไลซิสส่งผลให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงจึงใช้อุณหภูมิในการหลอมผลึกของคอมพอสิตที่ลดลง อีกทั้งสารคู่ควบชนิดนี้มีปริมาณการกราฟต์ที่น้อยทำให้มีความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกนอเคลย์ไม่เต็มที่เท่าที่ควร อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึกจึงพบที่ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามออร์แกนอเคลย์ที่เติมลงไปเพื่อใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอุณหภูมิการหลอมผลึกทั้งสอง รวมทั้งอุณหภูมิการเกิดผลึกในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.6.3 ความหนืด

สมบัติด้านความหนืดสามารถช่วยให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตได้ โดยสมบัติด้านความหนืดนี้วิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ซึ่งทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพฤติกรรมของความหนืดแบบนิวโทเนียน (Newtonian) ทุกๆ ช่วงอัตราแรงเฉือน กล่าวคือค่าความหนืดของของไหลมีค่าคงที่ อุณหภูมิคงที่ ส่วนกรณีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

คอมพอลิเมอร์จะมีพฤติกรรมของความหนืดแบบนอนนิวโทเนียน (non-Newtonian) ในลักษณะแบบพฤติกรรมแรงเฉือนลด (shear thinning) กล่าวคือความหนืดลดลงเมื่อแรงเฉือนมากขึ้น ซึ่งจะพบตัวอย่างที่แสดงพฤติกรรมนี้ในพอลิเมอร์หลอมเกือบทั้งหมด [49, 50] เมื่อใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบสามารถเพิ่มค่าความหนืดให้กับคอมพอลิเมอร์ได้มากกว่าการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับปริมาณการกราฟต์ของหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่น้อยและถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายทำให้พอลิเมอร์ที่ถูกดัดแปรนี้มีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นทำให้ถูกหลอมเหลวได้ง่าย ส่งผลให้ความหนืดของคอมพอลิเมอร์นั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตที่อุณหภูมิเดียวกัน อีกทั้งยังพบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่เพิ่มมากขึ้นค่าความหนืดมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เนื่องจากการเติมออร์แกโนเคลย์ซึ่งเป็นอนุภาคที่แข็งกว่าเนื้อพอลิเมอร์จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ขณะที่ถูกหลอม เมื่อถูกแรงเฉือนมากขึ้นทำให้เกิดแรงต้านขึ้นมาเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 4.14 ความหนืดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์ทั้งหมดโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์ จะเห็นได้ว่าการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกโนเคลย์จะให้สมบัติของคอมพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นขั้นตอนต่อไปในการศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและสารเสริมแรงที่จะส่งผลต่อสมบัติพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์นั้นจะเลือกใช้สารคู่ควบคือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต โดยมีออร์แกโนเคลย์เป็นสารเสริมแรงเช่นเดิม

4.7 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและสารเสริมแรง

ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดพลาสติกของพอลิเมอร์คอมพาวนด์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC โดยในขั้นตอนการศึกษานี้เลือกใช้สารคู่ควบคือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตในปริมาณตั้งแต่ 3 ถึง 10 phr และออร์แกนอเคลย์ในปริมาณ 0.5 ถึง 6 phr เพื่อเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

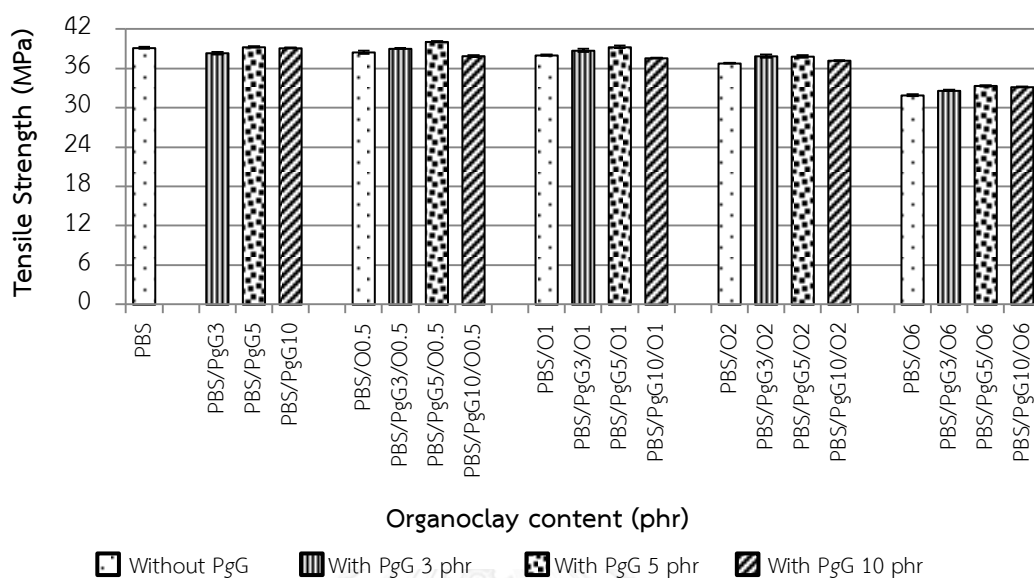
4.7.1 สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.7.1.1 สมบัติด้านแรงดึง

(1) ความทนแรงดึง

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตตามมาตรฐานแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าการใส่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตในปริมาณ 3 5 และ 10 phr ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะไม่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดึง แต่ผลของการใส่ออร์แกนอเคลย์ลงไปจะทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณออร์แกนอเคลย์ที่ใส่ลงไปตั้งแต่ 0.5 ถึง 6 phr โดยเฉพาะที่ออร์แกนอเคลย์ 6 phr จะทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของออร์แกนอเคลย์ด้วยตัวเอง เกิดความไม่เข้ากันของทั้งสองเฟส ทำให้กลายเป็นข้อบกพร่องในชิ้นงาน เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจึงไม่สามารถถ่ายโอนแรงไปยังสารเสริมแรงได้ แต่เมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบในออร์แกนอเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตจะเห็นได้ว่าการใช้สารคู่ควบในปริมาณ 3 และ 5 phr จะสามารถเพิ่มค่าความทนแรงดึงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้มากขึ้น แต่เมื่อใช้สารคู่ควบในปริมาณ 10 phr จะทำให้ค่าที่ได้มีแนวโน้มที่ลดลง อาจมีสาเหตุมาจากเมื่อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตมีปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้มีปริมาณสัดส่วนของไกลซิดีลเมทาคริเลตในเมทริกซ์ที่มากเกินไปไม่เหมาะสมกับสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์ และไกลซิดีลเมทาคริเลตที่เกินมานั้นอาจจะเกิดอันตรกิริยาด้วยตัวเองแทนที่การเกิดอันตรกิริยากับออร์แกนอเคลย์ ทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่าสัดส่วนของสารคู่ควบต่อออร์แกนอเคลย์ที่ให้ค่าความทนแรงดึงได้ดีที่สุดคือ 5 และ 0.5 phr ตามลำดับ เนื่องจากออร์แกนอเคลย์ในปริมาณ 0.5 phr จะลักษณะการกระจายตัวในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ดี ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกัน ประกอบกับการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตในปริมาณ 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมใน

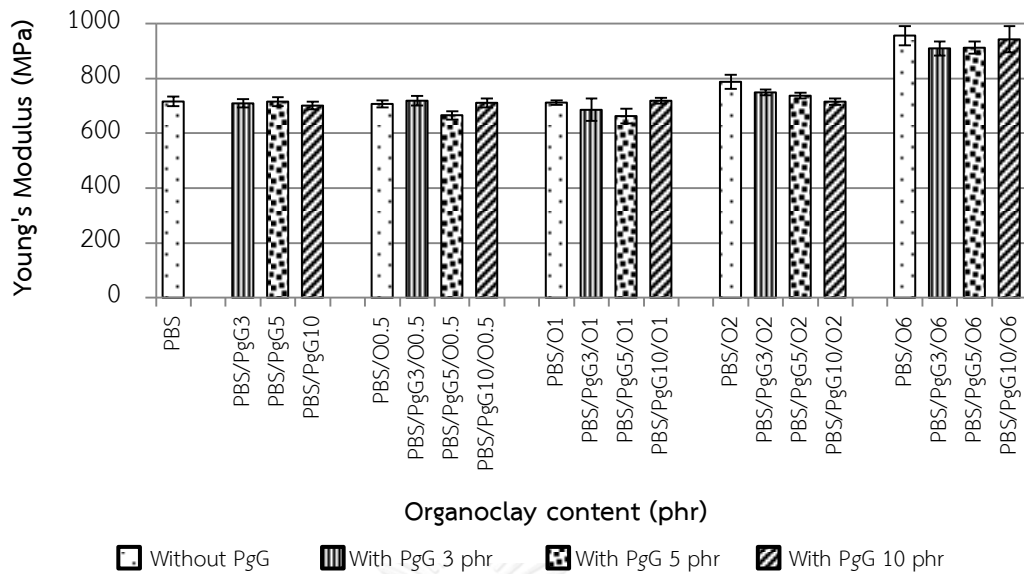
การใช้เป็นสารเชื่อมระหว่างพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตเมทริกซ์และออร์แกโนเคลย์โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างทั้งสองเฟสได้ดี ทำให้คอมพอสิตที่ได้มีความทนแรงดึงได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.15 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกโนเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

(2) มอดุลัสของยัง

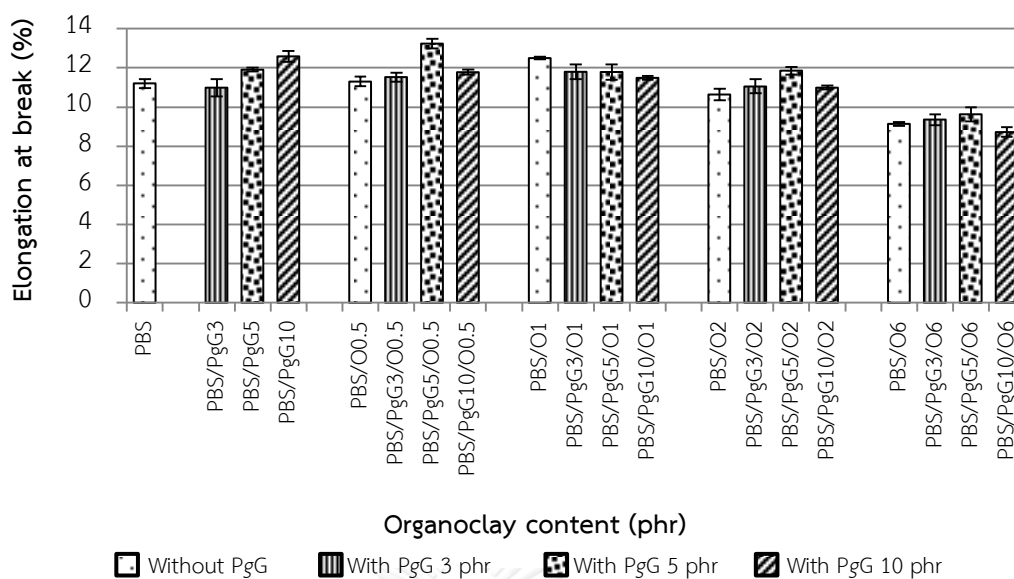
รูปที่ 4.16 แสดงผลมอดุลัสของยังที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมออร์แกโนเคลย์ลงไปในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่ปริมาณตั้งแต่ 2-6 phr ค่ามอดุลัสของยังมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่ 6 phr จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลมาจากการที่ออร์แกโนเคลย์มีลักษณะที่เป็นของแข็ง ซึ่งแข็งกว่าเมทริกซ์ที่เป็นพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต อีกทั้งยังมามีค่ามอดุลัสของยังที่สูงกว่าพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต ดังนั้นเมื่อใส่ออร์แกโนเคลย์ลงไปในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต จะทำให้ค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงแรง (stiffness) มากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้เกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารคู่ควบในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตค่ามอดุลัสของยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนการเติมออร์แกโนเคลย์ปริมาณ 0.5 และ 1 phr ยังคงมีค่ามอดุลัสของยังที่ใกล้เคียงกับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตแสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตที่มีสารคู่ควบในปริมาณดังกล่าวยังคงมีความยืดหยุ่นที่คล้ายคลึงกับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต เมื่อได้รับแรงกระทำจึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนเกิดการแตกหักเพื่อให้สามารถรับแรงที่มากกระทำจากภายนอกได้ โดยเฉพาะการใช้สารคู่ควบปริมาณ 5 phr ในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ 0.5 phr จะมีค่ามอดุลัสของยังที่ต่ำ แสดงว่ามีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อรับแรงได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.16 มอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกโนเคลย์ และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

(3) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

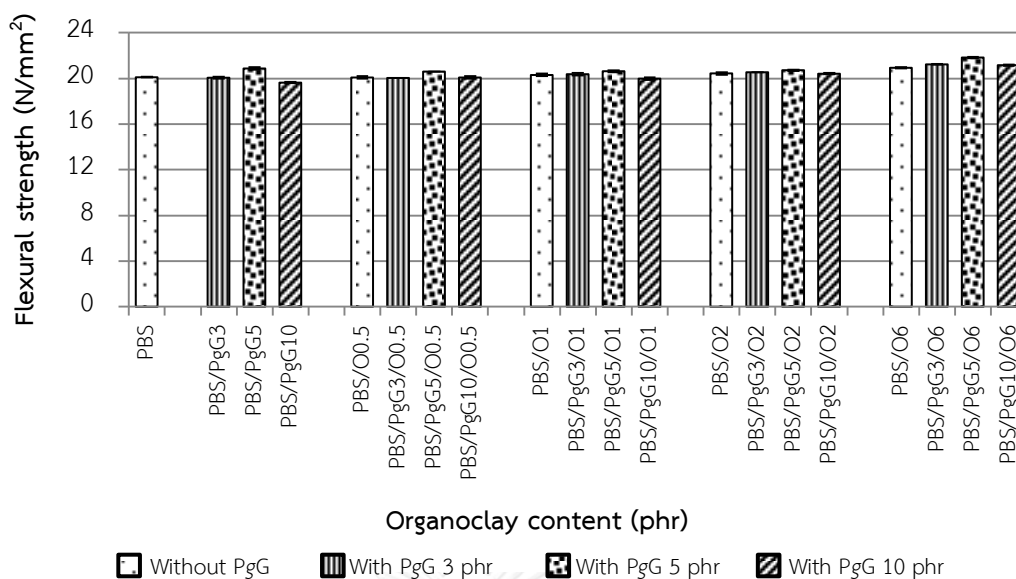
ผลการทดสอบหาค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าที่ออร์แกโนเคลย์ 0.5 phr เมื่อการใช้สารคู่ควบปริมาณ 5 phr จะให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 13.2 ซึ่งมีค่าสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 11.21 โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบการหาค่ามอดุลัสของยัง กล่าวคือคอมพอสิตดังกล่าวจะมีความสามารถในการยืดหยุ่นได้ดีที่สุดเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ส่งผลให้วัสดุนั้นมีความแข็งแรงหรือค่ามอดุลัสของยังที่ต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่มากขึ้น 1 ถึง 6 phr ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมพอสิตมีแนวโน้มที่ลดลง นั้นหมายถึงการที่วัสดุมีความแข็งแรงหรือมีค่ามอดุลัสของยังที่สูงขึ้น การที่มีออร์แกโนเคลย์มากขึ้นมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันเองมากขึ้น ทำให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงไม่ดีเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบในปริมาณ 5 phr ยังคงสามารถเพิ่มค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดให้แก่คอมพอสิตได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าสารคู่ควบชนิดนี้มีช่วยทำให้ออร์แกโนเคลย์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น สามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างทั้งสองเฟสได้ ทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถถ่ายโอนแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังอนุภาคออร์แกโนเคลย์ได้ ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 4.17 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิอีพ็อกซีเรซินคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนোকเลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

4.7.1.2 ความทนแรงดัดโค้ง

การทดสอบหาค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิอีพ็อกซีเรซินคอมพอสิตด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้ load cell ขนาด 2500 นิวตัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของค่าความทนแรงดัดโค้งไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มออร์แกนোকเลย์ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของระนาบในออร์แกนোকเลย์ไม่มีผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้งอย่างมีนัยสำคัญ เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในการทดสอบความทนแรงดัดโค้งนั้นจะประกอบไปด้วย 2 แบบ คือ การขยายออก (expansion) และการบีบอัด (compression) [38] แต่เมื่อปริมาณออร์แกนোকเลย์เพิ่มขึ้นถึง 6 phr ค่าความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการเติมสารเสริมแรงที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนาสูง (high aspect ratio) หรือการเติมอนุภาคที่เป็นของแข็งจะทำให้มีความแข็งแรงมากส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งสูงขึ้น [44] ส่วนผลจากการใช้พอลิอีพ็อกซีเรซินคอมพอสิตด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบสำหรับพอลิอีพ็อกซีเรซินคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลย์จะพบว่าสารคู่ควบชนิดนี้สามารถใช้ในการเพิ่มค่าความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตให้ดีขึ้นได้ โดยการใช้ปริมาณของสารคู่ควบที่ 5 phr จะเพิ่มค่าได้สูงที่สุด ซึ่งเป็นเพราะว่าสารคู่ควบช่วยในการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิอีพ็อกซีเรซินคอมพอสิตและออร์แกนোকเลย์ให้มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น [51] ซึ่งจะทำให้เมทริกซ์สามารถถ่ายโอนแรงที่ถูกระงับไปยังสารเสริมแรงได้ดี ส่งผลให้วัสดุมีความทนแรงดัดโค้งได้ดีขึ้น

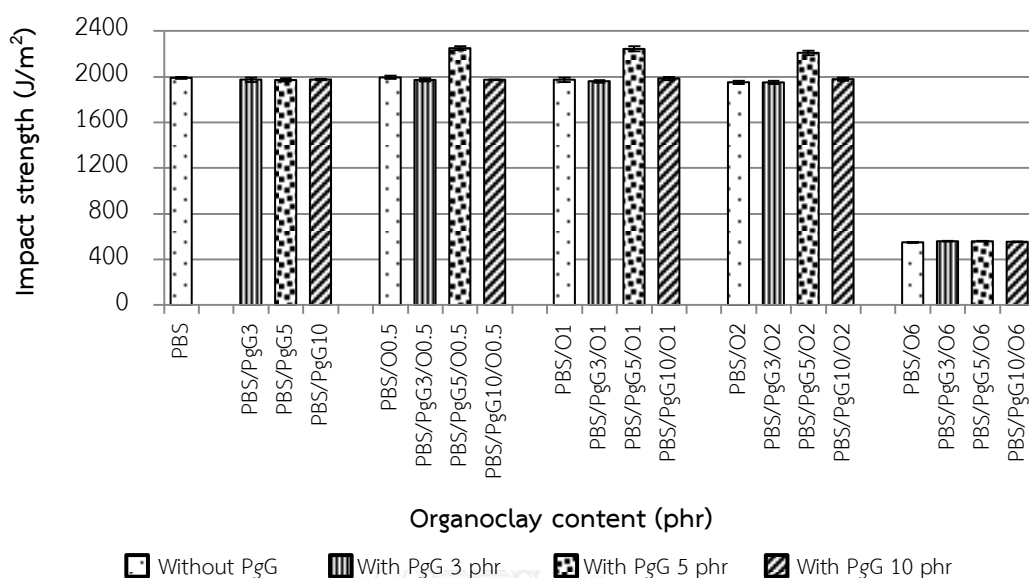


รูปที่ 4.18 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนোকเลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

4.7.1.3 ความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกแบบไอซอดด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact-pendulum tester) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งใช้หัวค้อนขนาด 2.75 จูลทดสอบส่งแรงกระแทกมาที่ชิ้นงานที่มีรอยบาก ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เทคนิคนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำในระยะเวลาสั้นๆ ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก โดยพบว่าเมื่อเติมออร์แกนোকเลย์ปริมาณ 1 ถึง 6 phr จะให้ค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันเองของอนุภาคออร์แกนোকเลย์ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสองเฟสขึ้น ส่งผลให้เมื่อได้รับแรงที่มากกระทำอย่างทันทีทันใดจึงไม่สามารถถ่ายโอนแรงไปยังสารเสริมแรงได้ วัสดุจึงเกิดการแตกหักทันที โดยเฉพาะที่ออร์แกนোকเลย์ปริมาณ 6 phr ซึ่งมีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำมากอย่างเห็นได้ชัด เป็นเพราะว่าการเกาะกลุ่มกันของออร์แกนোকเลย์ทำให้กลายเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงาน เกิดเป็นจุดความเข้มแรงเค้น (stress concentration) ในเมทริกซ์ จึงทำให้วัสดุแตกหักได้ง่าย แต่เมื่อมีการใช้สารคู่ควบแล้วจะเห็นว่าในปริมาณ 5 phr จะให้ค่าความทนแรงกระแทกได้สูงที่สุด เนื่องจากสามารถช่วยให้ออร์แกนোকเลย์มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตเมทริกซ์ และช่วยในการปรับปรุงให้เฟสทั้งสองมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยจากการศึกษาพบว่าที่สัดส่วนระหว่างออร์แกนোকเลย์และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตที่ปริมาณ 0.5 และ 5 phr ตามลำดับ จะมีความสามารถทนแรงกระแทกได้ดีที่สุด เนื่องมาจากมีปริมาณอยู่ในสัดส่วนที่ทำให้ออร์แกนোকเลย์มีการกระจายตัวในลักษณะที่สามารถ

ช่วยในการเสริมแรงได้และมีปริมาณเหมาะสมในการเป็นสารเชื่อมทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสองเฟสให้ส่งผ่านแรงที่ถูกระงับไปยังสารเสริมแรงได้ทันทีทันใด ทำให้วัสดุเกิดการดูดซับพลังงานก่อนเกิดการแตกหัก ดังนั้นสัดส่วนปริมาณของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [38]

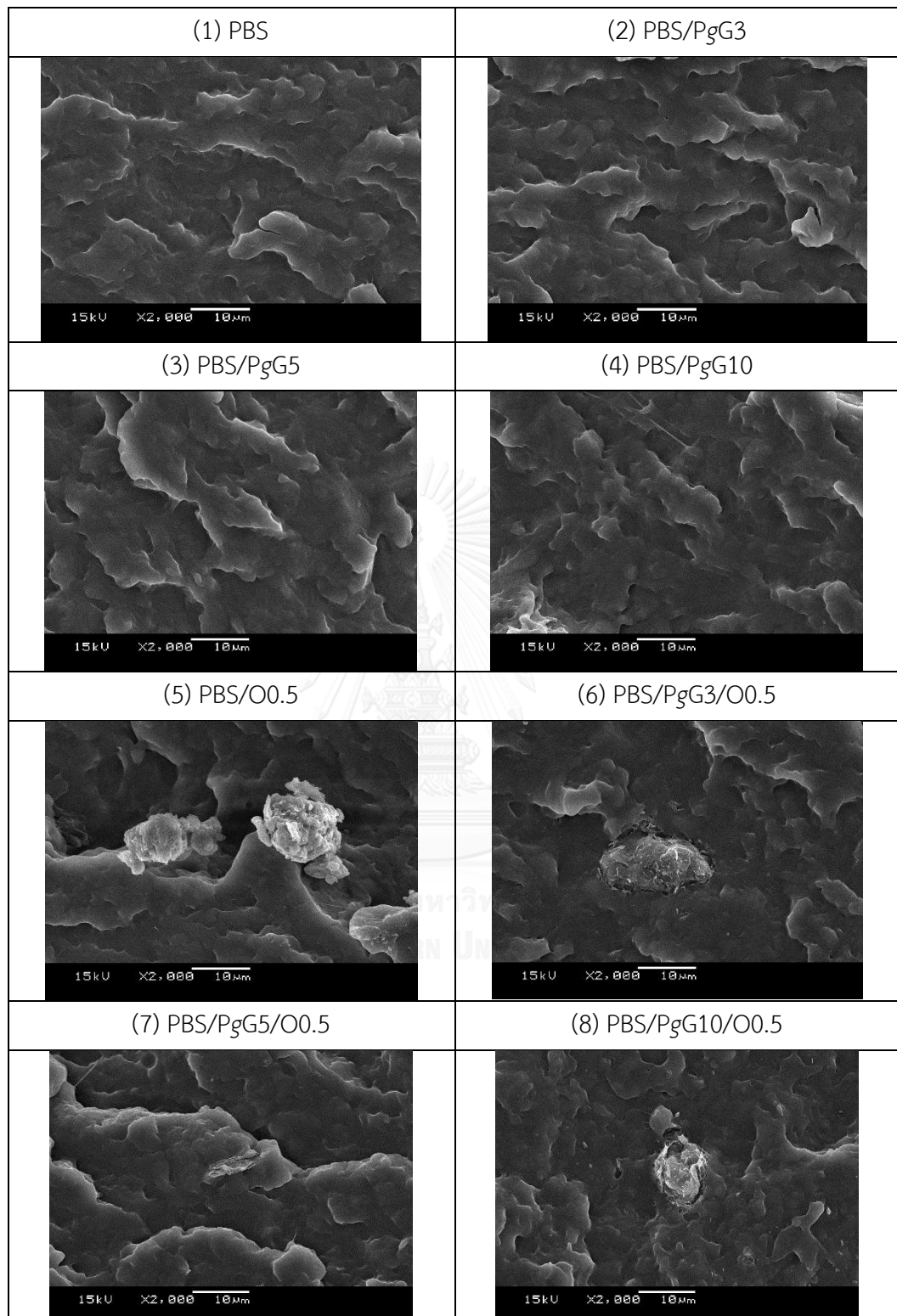


รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

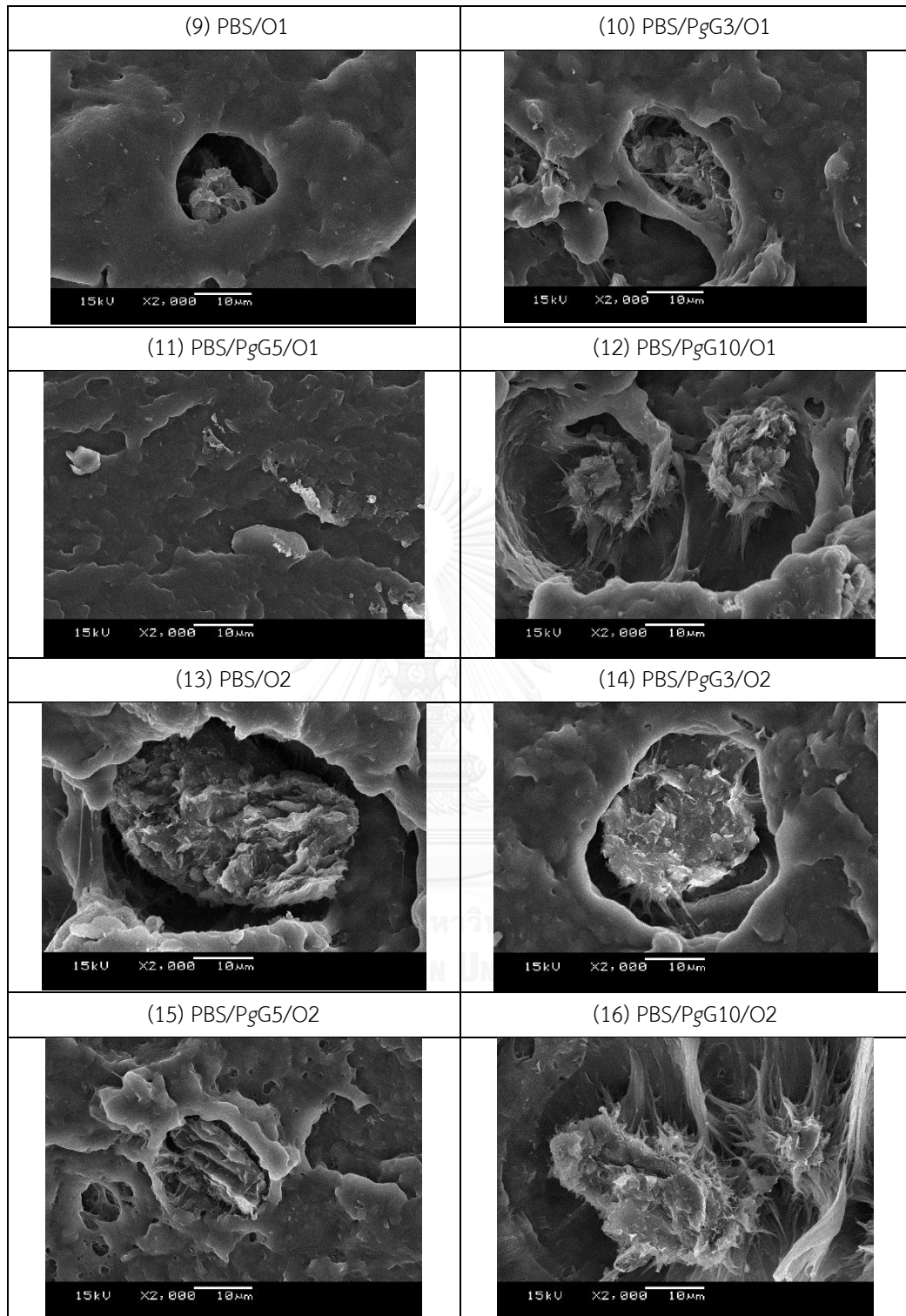
4.7.2 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.7.2.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

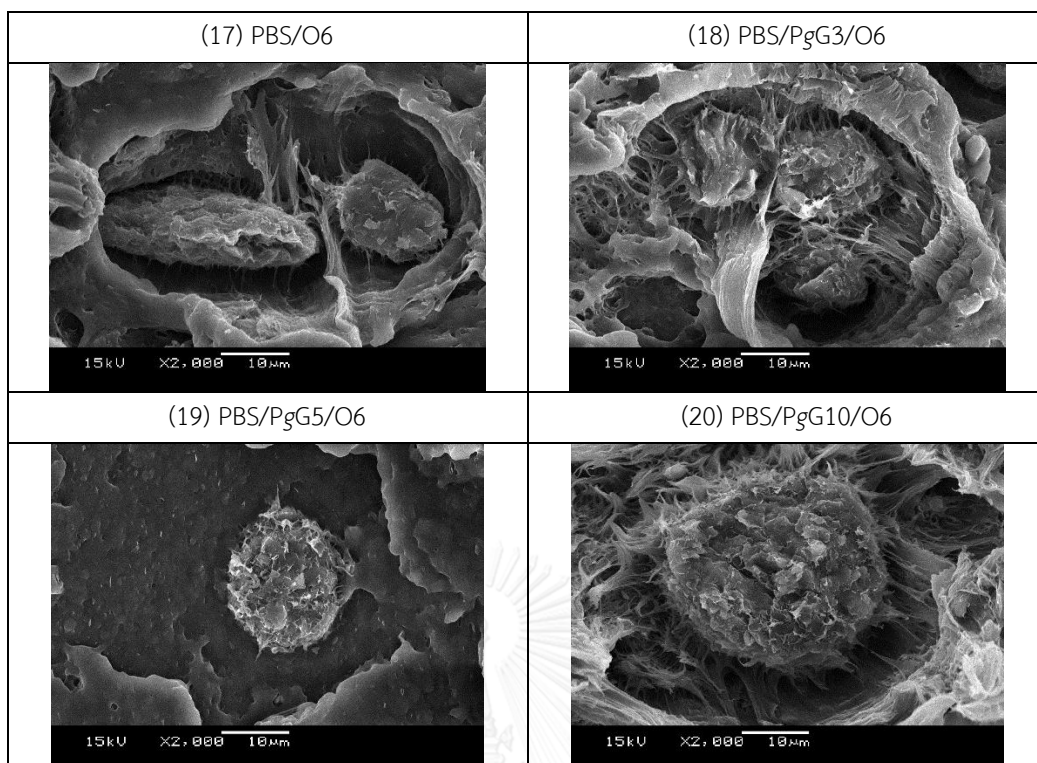
จากการตรวจสอบลักษณะทางสันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile fracture surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2000 เท่า ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (1-20)



รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของพอลิวิทาลินซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนเคลย์และสารคั่วควบในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.20 (ต่อ) สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่คอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารค้ำควบในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.20 (ต่อ) สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนโอเคลย์และสารค้ำค้ำวในปริมาณต่างๆ

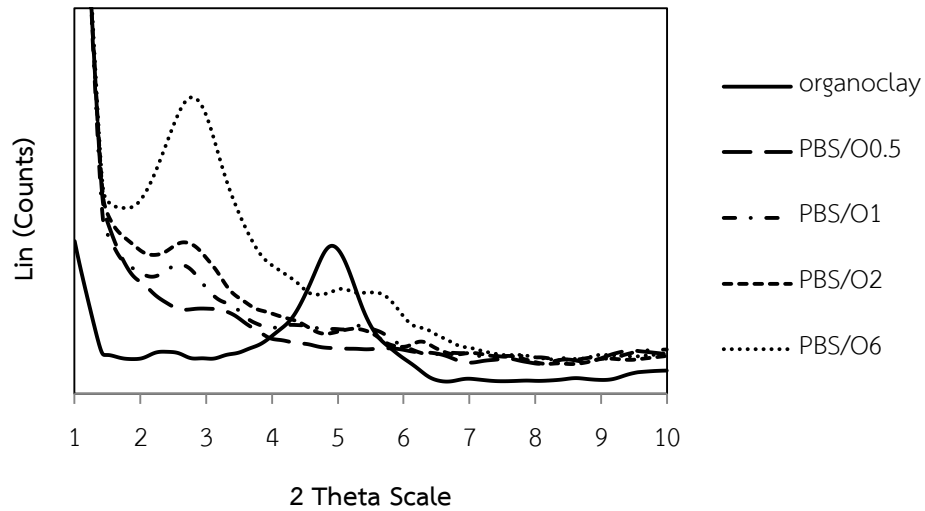
จากรูปที่ 4.20 (1) จะเห็นได้ว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพื้นผิวจากการแตกหักในลักษณะที่ราบเรียบ [6, 24] แสดงว่ามีการแตกหักในลักษณะแบบค่อนข้างเปราะ และเมื่อมีการใช้สารค้ำค้ำวคือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตที่ปริมาณ 3.5 และ 10 phr ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผลที่ได้คือบริเวณพื้นผิวรอยแตกไม่มีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดังแสดงในรูปที่ 4.20 (2) (3) และ (4) ตามลำดับ เมื่อมีการเติมออร์แกนโอเคลย์ลงไปในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กันตั้งแต่ 0.5 1 2 และ 6 phr โดยไม่มีการใช้สารค้ำค้ำว แสดงภาพสัณฐานวิทยาที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (5) (9) (13) และ (17) ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีปริมาณออร์แกนโอเคลย์สูงขึ้นจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนที่มีลักษณะใหญ่ แสดงถึงการกระจายตัวของออร์แกนโอเคลย์ไม่ดี โดยผลที่ได้สองคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และจะเห็นรอยแตกระหว่างทั้งสองเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกนโอเคลย์ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือไม่พบแรงยึดเหนี่ยวหรือรอยเชื่อมระหว่างสองเฟสปรากฏอยู่ในวัสดุคอมพอสิต สาเหตุมาจากความแตกต่างของขั้วของทั้งสองเฟส โดยออร์แกนโอเคลย์จะมีลักษณะของความเป็นขั้วที่ค่อนข้างสูง ทำให้ชอบที่จะเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [17] ส่งผลให้วัสดุมีความเปราะ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ของทั้งสองเฟสด้วยการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

กราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตเป็นสารช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสทั้งสองในปริมาณที่ 3 5 และ 10 phr จะเห็นว่าช่องว่างของรอยแตกที่แบ่งแยกระหว่างทั้งสองเฟสนั้นลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่ปริมาณของสารคู่ควบเท่ากับ 5 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (7) (11) (15) และ (19) ซึ่งเป็นผลที่มาจากการใช้สารคู่ควบโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 0.5 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (6) ถึง (8) จะเห็นออร์แกนอเคลย์มีการฝังตัวอยู่ในเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ แสดงว่าเกิดอันตรกิริยาเชื่อมระหว่างทั้งสองเฟสได้ดี ทำให้ผลของการใช้สารเสริมแรงที่มีต่อวัสดุมีประสิทธิภาพที่ดีมาก ซึ่งผลจากภาพสัณฐานวิทยาดังกล่าวก็มีความสอดคล้องกับผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่ให้ค่าที่ดีที่สุด

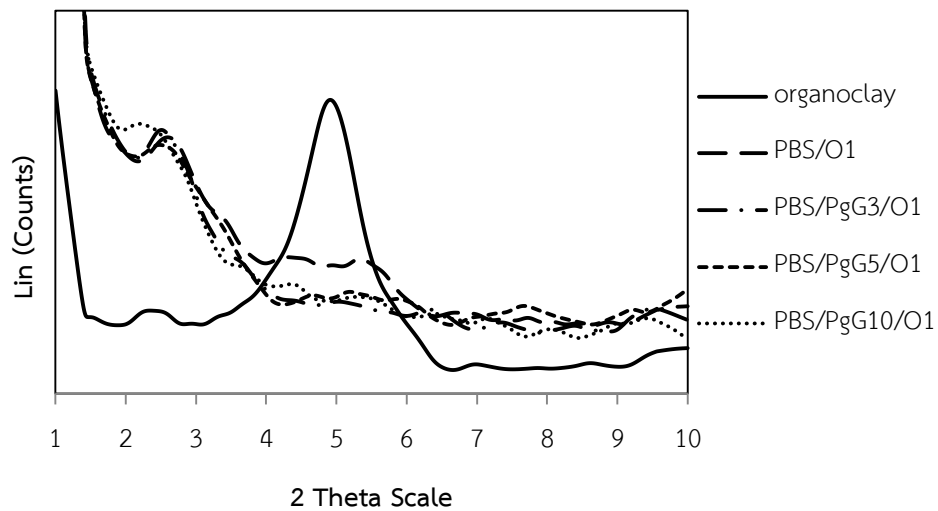
ส่วนที่ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 1 phr เมื่อใช้สารคู่ควบที่ปริมาณ 3 และ 10 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (10) และ (12) ตามลำดับ จะเห็นลักษณะการยึดของพอลิเมอร์เกิดขึ้นที่บริเวณระหว่างสองเฟส จะเห็นได้ว่าการใช้สารคู่ควบนั้นจะทำให้เกิดอันตรกิริยาขึ้นเชื่อมระหว่างสองเฟส ส่วนสารคู่ควบปริมาณ 5 phr ยังคงเห็นว่าออร์แกนอเคลย์มีการฝังตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์เช่นเดียวกับผลของออร์แกนอเคลย์ในปริมาณ 0.5 phr ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกนอเคลย์ด้วยการใช้สารคู่ควบในคอมพอสิตที่มีออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 2 และ 6 phr อีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างสองเฟสได้มากขึ้นด้วยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการใช้สารคู่ควบมีประสิทธิภาพสูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ใช้สารคู่ควบ

4.7.2.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รูปที่ 4.21-4.22 แสดงผลการทดสอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD โดยทำการศึกษาที่ 2 Theta (2θ) ในช่วง 1-10 องศาและใช้ความยาวคลื่นที่ 0.154 นาโนเมตรในการทดสอบ



รูปที่ 4.21 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของออร์แกนไคลย์และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่มีออร์แกนไคลย์ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.22 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของออร์แกนไคลย์และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่มีสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

จากรูปแสดงพีคโครงสร้างผลึกของออร์แกนไคลย์ที่ช่วง 2θ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.962 องศา แล้วนำมาคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ด้วยสมการของ Bragg (Bragg's Equation) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.1 [30] จะได้ d_{001} มีค่าเท่ากับ 1.78 นาโนเมตร และผลการคำนวณของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตสามารถคำนวณได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.4

$$2d_{001} \sin \theta = n\lambda \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

- เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์แกนไคลด์
 θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์
 n คือ จำนวนเต็มใดๆ
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งมีค่า 0.154 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Bragg

ชื่อสูตร	2θ	d (นาโนเมตร)
organoclay	4.962	1.78
PBS/O0.5	2.686	3.29
PBS/PgG3/O0.5	2.717	3.25
PBS/PgG5/O0.5	2.559	3.45
PBS/PgG10/O0.5	2.401	3.68
PBS/O1	2.686	3.29
PBS/PgG3/O1	2.686	3.29
PBS/PgG5/O1	2.528	3.49
PBS/PgG10/O1	2.370	3.73
PBS/O2	2.867	3.08
PBS/PgG3/O2	2.749	3.21
PBS/PgG5/O2	2.686	3.29
PBS/PgG10/O2	2.465	3.58
PBS/O6	2.780	3.17
PBS/PgG3/O6	2.780	3.17
PBS/PgG5/O6	2.559	3.45
PBS/PgG10/O6	2.622	3.37

จากรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าระนาบของออร์แกนไคลด์ที่ 001 ในพอลิไวนิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเมื่อใช้ออร์แกนไคลด์ปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเสริมแรงจะเห็นพีคของออร์แกนไคลด์ที่ไม่ชัดเจน อาจเป็นเพราะมีปริมาณที่น้อยจนเครื่องไม่สามารถตรวจสอบได้ หรืออาจเนื่องมาจากออร์แกนไคลด์มีการกระจายตัวในลักษณะที่อิสระต่อกัน เสมือนออร์แกนไคลด์มีโครงสร้างแบบแยกเป็นแผ่น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของออร์แกนไคลด์ที่สูงขึ้นดังเช่นในกรณี 1 ถึง 6 phr จะเห็นว่าพีคมีการเลื่อนค่า 2θ ไปทางที่สูงขึ้น เมื่อคำนวณเป็นระยะห่างระหว่างระนาบแล้วมีแนวโน้ม

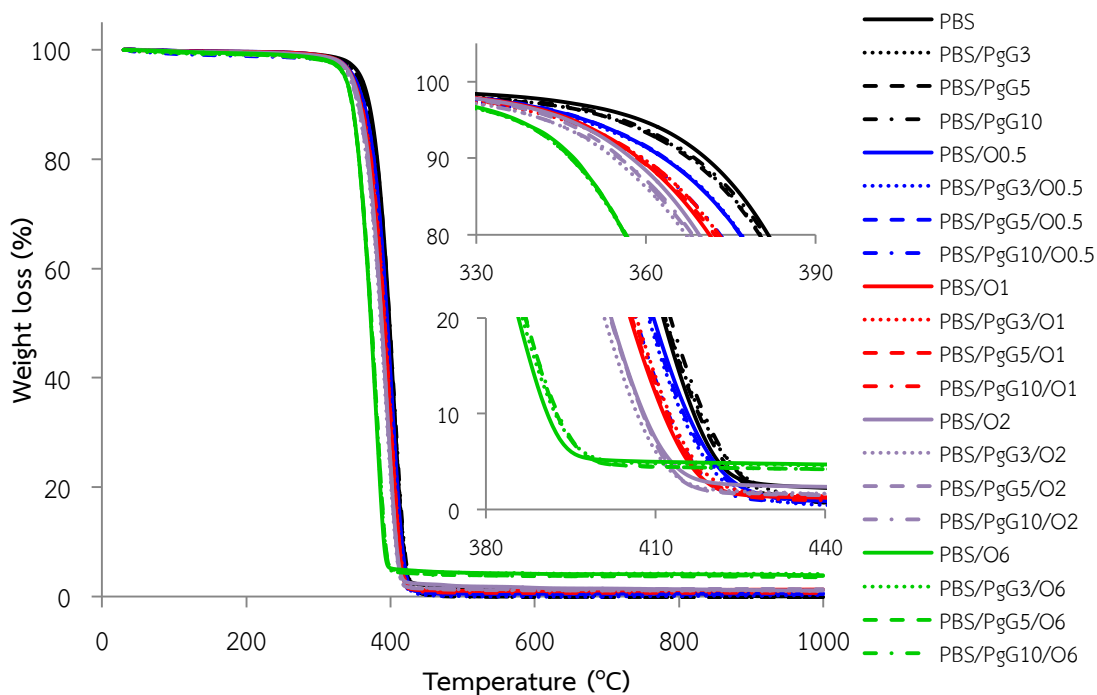
ที่ลดลง ซึ่งสาเหตุมาจากเมื่อมีปริมาณออร์แกนเคลย์ที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของออร์แกนเคลย์ ดังเช่นผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่งผลให้สายโซ่ของ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของออร์แกนเคลย์ได้หรือแทรกตัวได้ ยากขึ้น การที่เติมออร์แกนเคลย์ลงไปจึงไม่สามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านการเสริมแรงให้กับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลตเป็นสารคู่ ควบในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตจะสามารถเพิ่มระยะห่างระหว่างระนาบให้มากขึ้นได้ดังแสดง ในรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลต ในปริมาณ 5 และ 10 phr แสดงให้เห็นว่าสายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลต สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของระนาบในออร์แกนเคลย์ได้มาก แต่จาก XRD ดิฟแฟร็กโทแกรม จะเห็นลักษณะของความเป็นผลึกอยู่บางส่วน ทำให้เห็นว่าผลึกของออร์แกนเคลย์นั้นอยู่ในรูปแบบ ของโครงสร้างแบบแทรก ซึ่งจะเป็นส่วนที่ช่วยในการเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้ดี

4.7.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.7.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยเทคนิคการ วิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลดังแสดงในรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.5 แสดงถึงอุณหภูมิที่เริ่ม สลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) และปริมาณเถ้าที่เหลือ (% residual mass) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต



รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิบิฟทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกโนเคลย์และสารคั่วควบในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิบิฟทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกโนเคลย์และสารคั่วควบในปริมาณต่างๆ

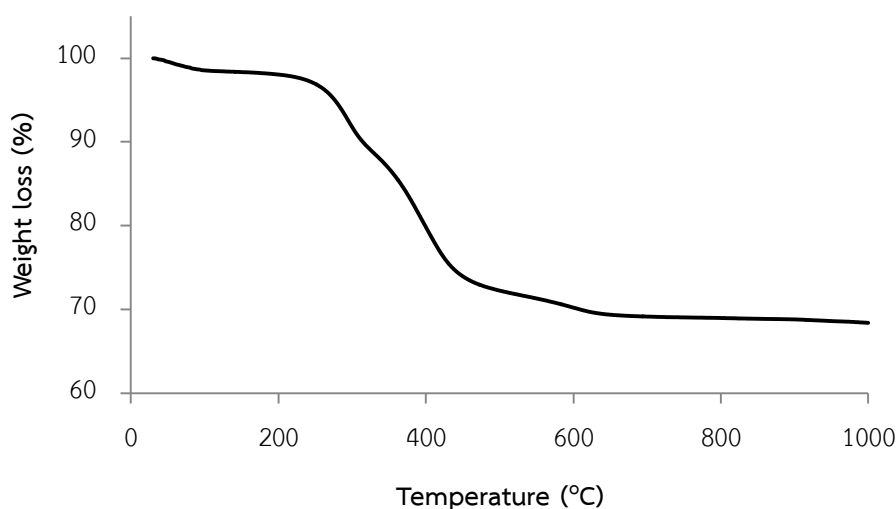
ชื่อสูตร	T _d (onset) (°C)	T _d (Inflection point) (°C)	T _d (endset) (°C)	Residual Mass (%)
PBS	377.3	402.2	417.4	0.00
PBS/PgG3	375.3	401.8	419.7	0.23
PBS/PgG5	375.9	402.3	419.7	0.00
PBS/PgG10	376.4	402.9	420.5	0.00
PBS/O0.5	372.8	399.7	417.3	0.61
PBS/PgG3/O0.5	373.1	399.4	416.8	0.26
PBS/PgG5/O0.5	372.7	399.5	416.8	0.45
PBS/PgG10/O0.5	370.4	397.6	414.5	0.80
PBS/O1	367.3	396.7	413.7	1.30
PBS/PgG3/O1	369.8	397.5	414.4	1.00

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของออร์แกนอเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

ชื่อสูตร	T _d (onset) (°C)	T _d (Inflection point) (°C)	T _d (endset) (°C)	Residual Mass (%)
PBS/PgG5/O1	369.0	396.8	413.9	1.23
PBS/PgG10/O1	369.6	397.3	414.2	0.66
PBS/O2	364.1	392.4	408.7	1.10
PBS/PgG3/O2	363.1	391.8	408.5	0.99
PBS/PgG5/O2	364.3	393.2	409.9	1.35
PBS/PgG10/O2	365.0	393.8	410.0	1.12
PBS/O6	351.8	377.9	391.0	3.90
PBS/PgG3/O6	351.9	377.9	392.2	4.14
PBS/PgG5/O6	352.5	379.5	393.1	3.78
PBS/PgG10/O6	351.9	378.6	393.1	3.53

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการใส่ออร์แกนอเคลย์เข้าไปในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าของอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (onset) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (endset) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากออร์แกนอเคลย์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิการสลายตัวของออร์แกนอเคลย์มี 4 ขั้นตอน ได้แก่ อุณหภูมิช่วง 35 ถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสลายตัวของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในอนุภาคของออร์แกนอเคลย์ อุณหภูมิช่วง 170 ถึง 340 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสลายตัวของของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (cationic surfactant) ช่วง 300 ถึง 420 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่บนผิวของออร์แกนอเคลย์ และอุณหภูมิช่วงที่ 510 ถึง 640 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซีในออร์แกนอเคลย์ [52] ดังนั้นเมื่อมีการเติมออร์แกนอเคลย์ในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมพอสิตมีแนวโน้มที่ลดลง ส่วนการใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัว แสดงว่าสารคู่ควบนี้ไม่มีผลต่อความเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของคอมพอสิตก็คือปริมาณของออร์แกนอเคลย์ที่ใช้ เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวมากที่สุด (inflection point) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัวและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว กล่าวคือเมื่อมี

การเติมออร์แกนโอเคลย์ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตจะทำให้อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวมากที่สุดมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีปริมาณออร์แกนโอเคลย์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้สารคู่ควบในคอมพอสิตนี้ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิดังกล่าว ส่วนผลของปริมาณเถ้าที่เหลือหลังการสลายตัวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ออร์แกนโอเคลย์ยังเกิดการสลายตัวไม่หมด จึงยังคงเหลือปริมาณเถ้าของออร์แกนโอเคลย์อยู่ โดยพบว่าเมื่อมีออร์แกนโอเคลย์มากขึ้น ปริมาณเถ้าที่เหลือในคอมพอสิตก็จะมีมากขึ้น



รูปที่ 4.24 TGA เทอร์โมแกรมของออร์แกนโอเคลย์

4.7.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรีที่ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเป็นการศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิในการหลอมผลึก (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และปริมาณผลึก (percent of crystallinity, χ_c) โดยปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 [24, 53] ซึ่งค่าที่ได้มาจากการให้ความร้อนครั้งที่สอง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6

$$x_c (\%) = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0} \cdot 100\% \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

$$x_c (\%) = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0(1-W_f)} \cdot 100\% \quad \text{สมการที่ 4.3}$$

- เมื่อ ΔH_c คือ เอนทาลปีของการเกิดผลึกขณะให้ความเย็น
 ΔH_m° คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งมีค่าเท่ากับ 110.3 จูลต่อกรัม
 W_f คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเติมในพอลิเมอร์คอมพอสิต

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิการหลอมผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่สัดส่วนของออร์แกโนเคลย์และสารคู่ควบในปริมาณต่างๆ

ชื่อสูตร	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m1} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m2} ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	χ_c (%)
PBS	-33.5	105.5	110.8	78.4	63.25
PBS/PgG3	-34.4	105.3	110.2	78.7	63.35
PBS/PgG5	-32.4	105.5	110.8	78.1	65.62
PBS/PgG10	-32.1	105.9	110.2	80.0	58.01
PBS/O0.5	-33.5	105.4	110.1	78.7	62.63
PBS/PgG3/O0.5	-33.6	105.8	110.1	79.5	59.66
PBS/PgG5/O0.5	-33.9	106.4	109.6	83.1	54.56
PBS/PgG10/O0.5	-34.0	106.4	110.3	82.3	58.48
PBS/O1	-33.7	105.4	109.8	78.2	63.74
PBS/PgG3/O1	-31.3	106.2	110.2	80.5	58.50
PBS/PgG5/O1	-31.7	106.1	110.1	80.8	58.30
PBS/PgG10/O1	-33.7	106.4	109.7	82.8	56.29
PBS/O2	-33.4	105.4	110.4	77.6	63.11
PBS/PgG3/O2	-33.6	105.9	109.9	80.5	59.06
PBS/PgG5/O2	-33.3	105.9	109.8	80.6	57.50
PBS/PgG10/O2	-33.4	106.5	109.9	83.1	55.74
PBS/O6	-33.4	105.5	110.0	78.6	60.12
PBS/PgG3/O6	-33.5	106.9	109.9	82.8	52.76
PBS/PgG5/O6	-33.6	107.0	109.8	83.0	50.36
PBS/PgG10/O6	-33.2	107.2	109.7	84.5	49.80

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.6 พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตไม่มีความแตกต่างกันเท่าไร เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากลักษณะแข็งเปราะเหมือนแก้วมาเป็นนุ่มคล้ายยาง [54] และปริมาณการกราฟต์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตนั้นมีไม่มากพอ ทำให้เกิดอันตรกิริยาเชื่อมระหว่างเฟสเมทริกซ์และสารเสริมแรงไม่เพียงพอที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของคอมพอสิต เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมผลึกจะพบว่าปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่ใส่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าต่ำกว่า (T_{m1}) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) แต่เมื่อมีการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตในการใช้เป็นสารคู่ควบจะทำให้ค่าทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของสารคู่ควบที่มากขึ้น ผลที่ได้เนื่องจากสารคู่ควบดังกล่าวจะไปช่วยให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างออร์แกโนเคลย์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทั้งสองเฟสโดยเกิดผ่านหมู่ฟังก์ชันในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต ส่งผลให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมผลึกที่มากขึ้น [55] และจากการที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างสองเฟสทำให้สารคู่ควบชนิดนี้มีส่วนทำให้ออร์แกโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารคู่ควบ ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกจึงมีค่าสูงขึ้น [56] เนื่องจากการไม่ใช้สารคู่ควบจะมีรอยแยกระหว่างสองเฟสอย่างชัดเจนโดยสังเกตได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่ได้กล่าวมา ทำให้ออร์แกโนเคลย์ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามการใช้สารคู่ควบนั้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าสูง (T_{m2}) อาจเป็นเพราะอุณหภูมิช่วงนี้เป็นช่วงที่เกิดการหลอมผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ที่มีความเป็นผลึกค่อนข้างสมบูรณ์อยู่แล้ว ทำให้การเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิช่วงดังกล่าวเป็นไปได้ยาก ส่วนผลของการคำนวณหาปริมาณผลึกของคอมพอสิตพบว่า เมื่อมีการเติมออร์แกโนเคลย์เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณผลึกลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดที่ออร์แกโนเคลย์ปริมาณ 6 phr เนื่องมาจากอนุภาคของออร์แกโนเคลย์ที่มากขึ้นจะเกิดการเกาะกลุ่มกันไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดผลึกในวัสดุคอมพอสิต [24] และเมื่อมีการใช้สารคู่ควบพบว่าไม่สามารถช่วยเพิ่มปริมาณผลึกได้ แต่กลับทำให้ปริมาณผลึกยังมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลตบางส่วนมีการแทรกตัวเข้าไปในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตส่วนที่เป็นเมทริกซ์แล้วไปรบกวนการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของคอมพอสิตลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอคลีย์ให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่มากขึ้น ทั้งนี้สารคู่ควบทั้งสองชนิดที่ศึกษา ได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต ซึ่งสามารถเตรียมได้จากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ รวมทั้งศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบและออร์แกนโอคลีย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเตรียมได้จากเครื่องอัดรีดสกรูคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตสามารถเตรียมได้จากเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟเพื่อใช้เป็นสารคู่ควบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคนี้สามารถเตรียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตสามารถใช้เป็นสารคู่ควบสำหรับออร์แกนโอคลีย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์
3. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตที่ใช้เป็นสารคู่ควบในออร์แกนโอคลีย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตสามารถเพิ่มความหนืดให้แก่วัสดุคอมพอสิตนี้ได้
4. อัตราส่วนระหว่างสารคู่ควบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลตและออร์แกนโอคลีย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5:0.5 phr ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทกที่ดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่อัตราส่วนดังกล่าวจะเห็นได้ว่าอนุภาคของออร์แกนโอคลีย์มีการฝังตัวอยู่ในเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างสองเฟสได้ดีเป็นผลให้สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลดังกล่าวได้มากขึ้น

5. ออร์แกโนเคลย์สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสของยังและค่าความทนแรงดัดโค้งสำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้ เนื่องจากอนุภาคของออร์แกโนเคลย์มีลักษณะความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์
6. ปริมาณออร์แกโนเคลย์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต เนื่องจากความไม่เสถียรทางความร้อนของสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวของออร์แกโนเคลย์
7. การใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบไม่ส่งผลต่อความเสถียรภาพทางความร้อนของออร์แกโนเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต
8. เมื่อใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารคู่ควบสำหรับออร์แกโนเคลย์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าต่ำกว่า (T_{m1}) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ได้เล็กน้อย เนื่องจากสารดังกล่าวไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างออร์แกโนเคลย์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยวิธีการอื่น เช่น การใช้เครื่องผสมแบบปิด
2. ศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ใช้เคลย์ไม่ผ่านการดัดแปรหรือดัดแปรด้วยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีอื่นๆ เป็นสารเสริมแรง
3. ศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ
4. ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางสัญญาณวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ใช้สารคู่ควบไฮเลนเปรียบเทียบ

รายการอ้างอิง

- [1] National Metal and Materials Technology Center. Biodegradable plastics
Available from:
http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html
[April 14]
- [2] Bordes, P., Pollet, E., and Averous, L. Nano-biocomposites: Biodegradable polyester/nanoclay systems. Progress in Polymer Science 34(2) (2009): 125-155.
- [3] Avérous, L. and Pollet, E. Biodegradable polymers. in Environmental Silicate Nano-Biocomposites, pp. 13-39: Springer, 2012.
- [4] Flieger, M., Kantorova, M., Prell, A., Řezanka, T., and Votruba, J. Biodegradable plastics from renewable sources. Folia microbiologica 48(1) (2003): 27-44.
- [5] PTT Marketing. พลาสติกและความปลอดภัย. in *polymers' place*. 2010. 1-20.
- [6] ศศิรดา วีระสุนทร. การเตรียมและสมบัติของพอลิไบวทีลีนซึกซิเนตเสริมแรงด้วยซิลิกาฟุ่มดัดแปร. ปริญญาโทบริหารมหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [7] NIA. เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ Available from: <http://www.nia.or.th/download/document/chapter3.pdf> [April 14]
- [8] Xu, J. and Guo, B.-H. Microbial succinic acid, its polymer poly (butylene succinate), and applications. in Plastics from Bacteria, pp. 347-388: Springer, 2010.
- [9] Adamopoulou, E. Poly(butylene succinate): A Promising Biopolymer. Senior Project, Industrial Management and Technology School of Chemical Engineering, 2012.
- [10] ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics). กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553.
- [11] ณัฐพันธ์์ ศุภกา. เทคโนโลยีสีเขียวที่น่าจับตามอง. in *INNO Mag*. 2012-2013. 27-30.

- [12] Vroman, I. and Tighzert, L. Biodegradable Polymers. Materials 2(2) (2009): 307-344.
- [13] ศศิพร ไกรสูงเนิน และ สุชัยญา เกตุทองมงคล. การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิโพรไพลีน/แป้งมันสำปะหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต. ปรินูญานิพนธ์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [14] ทศทัตย์ ไวยัญญา. การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/โพลีสไตรีนไนด์คอมพอสิต. ปรินูญานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [15] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [16] Poppe, L., Paskevich, V., Hathaway, J., and Blackwood, D. A laboratory manual for X-ray powder diffraction. US Geological Survey Open-File Report 1(041) (2001): 1-88.
- [17] Olad, A. Polymer/clay nanocomposites. Advances in diverse industrial applications of nanocomposites (2011): 113-138.
- [18] Ojijo, V. and Ray, S.S. Nano-biocomposites based on synthetic aliphatic polyesters and nanoclay. Progress in Materials Science 62 (2014): 1-57.
- [19] Goldt, I.V., Khokhlov, A.R., and Govorun, E.N. exofoliation Available from: <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article1987> [April 14]
- [20] Sinha Ray, S. and Okamoto, M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. Progress in Polymer Science 28(11) (2003): 1539-1641.
- [21] Sinharay, S. and Bousmina, M. Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world. Progress in Materials Science 50(8) (2005): 962-1079.
- [22] Alexandre, M. and Dubois, P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. Materials Science and Engineering: R: Reports 28(1) (2000): 1-63.
- [23] Wu, C.-S., Hsu, Y.-C., Liao, H.-T., Yen, F.-S., Wang, C.-Y., and Hsu, C.-T. Characterization and biocompatibility of chestnut shell fiber-based

- composites with polyester. Journal of Applied Polymer Science 131(17) (2014): 40730 (1-10).
- [24] Phua, Y.J., Chow, W.S., and Ishak, Z.A.M. Reactive processing of maleic anhydride-grafted poly(butylene succinate) and the compatibilizing effect on poly(butylene succinate) nanocomposites. Express Polymer Letters 7(4) (2013): 340-354.
- [25] Persenaire, O., et al. Reactive compatibilization of poly(l-lactide)/poly(butylene succinate) blends through polyester maleation: from materials to properties. Polymer International 63(9) (2014): 1724-1731.
- [26] Rzaev, Z.M.O. Graft Copolymers of Maleic Anhydride and Its Isostructural Analogues: High Performance Engineering Materials. International Review of Chemical Engineering 3(2) (2011): 153-215.
- [27] Wu, C.-S., Liao, H.-T., and Jhang, J.-J. Palm fibre-reinforced hybrid composites of poly(butylene succinate): characterisation and assessment of mechanical and thermal properties. Polymer Bulletin 70(12) (2013): 3443-3462.
- [28] Chuai, C., Zhao, N., Li, S., and Sun, B. Study on PLA/PBS Blends. Advanced Materials Research 197-198 (2011): 1149-1152.
- [29] ฐาปนีย์ สิริรุ่งเรือง และ เหมหงส์ อนรรฆพงศ์. การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับลิกนินโดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (MAPP). วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [30] Hafiz, A.A.A. Synthesis and Characterization of EVA-Cloisite Clay Nanocomposites. The American University in Cairo, 2013.
- [31] ขวลิติ ชาญฉลาด. ฟิล์มนาโนคอมพอสิตพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยการเป่าอัดรีดสำหรับการประยุกต์ในบรรจุภัณฑ์อาหาร. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [32] ดรรชนี พันธวรากร. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, 2555.
- [33] บรรเลง ศรีนิล. เทคโนโลยีพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี, 2546.
- [34] Rutland Plastics Ltd. Plastic Injection Moulding Machine Available from: http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/moulding_machine.html [April 30]

- [35] Bhatia, A., Gupta, R.K., Bhattacharya, S.N., and Choi, H.J. 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.
- [36] Makhatha, M.E., Ray, S.S., Hato, J., Luyt, A.S., and Bousmina, M. Thermal and Thermomechanical Properties of Poly(butylene succinate) Nanocomposites. Journal of Nanoscience and Nanotechnology 8 (2007): 1-11.
- [37] Calabria, B., et al. Biodegradable Poly(butylene succinate) Composites Reinforced by Cotton Fiber with Silane Coupling Agent. Polymers 5(1) (2013): 128-141.
- [38] Phua, Y.J., Chow, W.S., and Mohd Ishak, Z.A. Poly(butylene succinate)/Organo-montmorillonite Nanocomposites: Effects of the Organoclay Content on Mechanical, Thermal, and Moisture Absorption Properties. Journal of Thermoplastic Composite Materials 24(1) (2011): 133-151.
- [39] Mani, R., Bhattacharya, M., and Tang, J. Functionalization of polyesters with maleic anhydride by reactive extrusion. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry 37(11) (1999): 1693-1702.
- [40] Aggarwal, P.K., Chauhan, S., Raghu, N., Karmarkar, S., and Shashidhar, G. Mechanical properties of bio-fibers-reinforced high-density polyethylene composites: effect of coupling agents and bio-fillers. Journal of Reinforced Plastics and Composites 32(22) (2013): 1722-1732.
- [41] Liu, J., Jiang, H., and Chen, L. Grafting of glycidyl methacrylate onto poly (lactide) and properties of PLA/starch blends compatibilized by the grafted copolymer. Journal of Polymers and the Environment 20(3) (2012): 810-816.
- [42] Garin, M., Tighzert, L., Vroman, I., Marinkovic, S., and Estrine, B. The kinetics of poly (butylene succinate) synthesis and the influence of molar mass on its thermal properties. Journal of Applied Polymer Science 131(16) (2014).
- [43] Zeng, J.-B., Huang, C.-L., Jiao, L., Lu, X., Wang, Y.-Z., and Wang, X.-L. Synthesis and Properties of Biodegradable Poly (butylene succinate-co-diethylene glycol succinate) Copolymers. Industrial & Engineering Chemistry Research 51(38) (2012): 12258-12265.

- [44] Thirmizir, M., Ishak, Z., Taib, R., Rahim, S., and Jani, S.M. Kenaf-bast-fiber-filled biodegradable poly (butylene succinate) composites: Effects of fiber loading, fiber length, and maleated poly (butylene succinate) on the flexural and impact properties. Journal of Applied Polymer Science 122(5) (2011): 3055-3063.
- [45] Sharif, J., Mohamad, S.F., Othman, N.A.F., Bakaruddin, N.A., Osman, H.N., and Güven, O. Graft copolymerization of glycidyl methacrylate onto delignified kenaf fibers through pre-irradiation technique. Radiation Physics and Chemistry 91 (2013): 125-131.
- [46] Xu, T., Tang, Z., and Zhu, J. Synthesis of polylactide-graft-glycidyl methacrylate graft copolymer and its application as a coupling agent in polylactide/bamboo flour biocomposites. Journal of Applied Polymer Science 125(S2) (2012): E622-E627.
- [47] Asgari, M. and Masoomi, M. Thermal and impact study of PP/PET fibre composites compatibilized with Glycidyl Methacrylate and Maleic Anhydride. Composites Part B: Engineering 43(3) (2012): 1164-1170.
- [48] Ray, S.S., Bousmina, M., and Okamoto, K. Structure and Properties of Nanocomposites Based on Poly(butylene succinate-co-adipate) and Organically Modified Montmorillonite. Macromolecular Materials and Engineering 290(8) (2005): 759-768.
- [49] Okamoto, K., Sinha Ray, S., and Okamoto, M. New poly (butylene succinate)/layered silicate nanocomposites. II. Effect of organically modified layered silicates on structure, properties, melt rheology, and biodegradability. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 41(24) (2003): 3160-3172.
- [50] Khon Kaen University. Rheology (วิทยาศาสตร์การไหล) Available from: <http://pharm.kku.ac.th/thaiv/depart/techno/basicpharm/downloads/Lesson4.pdf> [April 28]
- [51] Thirmizir, M.Z.A., Ishak, Z.A.M., Taib, R.M., and Rahim, S. Effect of Maleated Compatibiliser (PBS-g-MA) Addition on the Flexural Properties and Water Absorption of Poly(butylene succinate)/Kenaf Bast Fibre Composites. Sains Malaysiana 42(4) (2013): 435-441.

- [52] Phua, Y.J., Chow, W.S., and Mohd Ishak, Z.A. Organomodification of montmorillonite and its effects on the properties of poly(butylene succinate) nanocomposites. Polymer Engineering & Science 53(9) (2013): 1947-1957.
- [53] Battezzatore, D., Bocchini, S., and Frache, A. Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites. Express Polymer Letters 5(10) (2011): 849-858.
- [54] คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมศัพท์ปิโตรเคมีและพอลิเมอร์. พจนานุกรมศัพท์พอลิเมอร์ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. กรุงเทพฯ: บริษัท แปลนปริทัศน์ จำกัด, 2551.
- [55] Xu, W., Liang, G., Wang, W., Tang, S., He, P., and Pan, W.P. Poly (propylene)-poly (propylene)-grafted maleic anhydride-organic montmorillonite (PP-PP-g-MAH-Org-MMT) nanocomposites. II. Nonisothermal crystallization kinetics. Journal of Applied Polymer Science 88(14) (2003): 3093-3099.
- [56] Praphulla, P. Studies on Reactive Blends of Poly (hydroxybutyrate-co-valerate) and Poly (butylene succinate) Bioplastics. Master's degree, Applied Science in Engineering, The University of Guelph, 2012.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
สมบัติด้านแรงดึง

1) ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25

ตาราง ก-1-1 ค่าความทนแรงดึงของ PBS

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	34.31	652.26	9.7
2	34.12	638.08	9.5
3	34.10	653.38	9.3
4	34.01	705.65	9.0
5	34.02	657.29	9.2
AVG	34.11	661.33	9.3
SD	0.12	25.82	0.3

ตาราง ก-1-2 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgM5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	35.93	672.86	9.5
2	35.90	661.95	9.2
3	36.36	681.56	9.4
4	36.05	666.36	9.4
5	36.29	670.48	9.3
AVG	36.10	670.65	9.3
SD	0.21	7.38	0.1

ตาราง ก-1-3 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.56	658.04	13.09
2	39.90	660.76	13.0
3	40.29	671.66	12.5
4	39.77	667.33	13.6
5	40.21	663.71	13.4
AVG	39.94	664.30	13.1
SD	0.30	5.37	0.4

ตาราง ก-1-4 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	34.82	730.58	10.1
2	34.91	722.69	10.2
3	34.88	728.25	10.2
4	34.87	721.77	10.0
5	34.83	717.18	10.4
AVG	34.86	724.10	10.2
SD	0.04	5.35	0.1

ตาราง ก-1-5 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgM5/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	36.44	713.96	12.1
2	36.42	702.26	12.9
3	36.40	692.93	13.0
4	36.65	822.79	12.6
5	36.55	694.59	13.0
AVG	36.49	725.31	12.7
SD	0.11	55.13	0.4

ตาราง ก-1-6 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	37.55	702.32	13.7
2	37.67	694.14	12.8
3	37.47	655.16	12.0
4	37.65	693.86	12.9
5	37.70	780.25	12.4
AVG	37.61	705.14	12.8
SD	0.09	45.81	0.6

ตาราง ก-1-7 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	29.85	832.65	8.8
2	29.98	820.05	8.6
3	30.14	811.22	9.2
4	30.20	860.37	8.8
5	30.20	829.12	8.9
AVG	30.07	830.68	8.8
SD	0.15	18.57	0.2

ตาราง ก-1-8 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgM5/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	33.30	809.93	11.7
2	33.29	816.58	12.0
3	33.04	823.94	10.2
4	32.98	857.42	10.6
5	33.16	818.24	11.3
AVG	33.15	825.22	11.2
SD	0.14	18.68	0.8

ตาราง ก-1-9 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	34.23	867.86	10.8
2	34.20	867.95	10.8
3	34.23	879.80	10.6
4	34.23	914.38	9.6
5	34.23	896.57	10.0
AVG	34.22	885.31	10.4
SD	0.02	20.05	0.6

2) ความทนแรงดึงของพอลิไพลีนซ็อกซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC

ตาราง ก-2-1 ค่าความทนแรงดึงของ PBS

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.26	711.14	11.2
2	39.29	727.44	10.9
3	39.02	692.48	11.2
4	39.03	739.02	11.6
5	39.10	711.20	11.2
AVG	39.14	716.26	11.2
SD	0.13	17.75	0.2

ตาราง ก-2-2 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG3

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	38.35	736.71	11.2
2	38.26	699.82	10.3
3	38.16	696.21	11.2
4	38.34	707.07	10.9
5	38.69	707.40	11.5
AVG	38.36	709.44	11.0
SD	0.20	15.98	0.4

ตาราง ก-2-3 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.20	721.27	11.9
2	39.34	697.83	11.9
3	39.17	737.88	11.9
4	39.36	700.41	12.1
5	39.26	722.12	11.8
AVG	39.27	715.90	11.9
SD	0.08	16.71	0.1

ตาราง ก-2-4 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG10

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.04	688.63	12.6
2	39.09	683.69	12.9
3	39.12	710.21	12.2
4	39.16	710.51	12.8
5	39.12	713.20	12.4
AVG	39.11	701.25	12.6
SD	0.04	13.93	0.3

ตาราง ก-2-5 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/O0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	38.12	709.15	11.3
2	38.41	725.66	11.1
3	38.71	710.63	11.5
4	38.48	693.62	11.1
5	38.67	697.94	11.6
AVG	38.48	707.40	11.3
SD	0.24	12.51	0.2

ตาราง ก-2-6 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG3/O0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.05	709.80	11.7
2	38.96	749.55	11.2
3	39.10	714.05	11.5
4	39.00	713.64	11.5
5	39.04	708.72	11.8
AVG	39.03	719.15	11.5
SD	0.05	17.15	0.2

ตาราง ก-2-7 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5/O0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	40.17	689.18	13.3
2	40.08	669.46	13.2
3	40.02	659.48	13.5
4	40.12	648.40	12.9
5	40.01	664.70	13.2
AVG	40.08	666.24	13.2
SD	0.07	15.02	0.2

ตาราง ก-2-8 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG10/O0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	37.76	706.82	11.6
2	37.99	697.51	11.7
3	37.90	708.31	12.0
4	38.10	704.86	11.8
5	37.81	739.82	11.8
AVG	37.91	711.46	11.8
SD	0.14	16.39	0.1

ตาราง ก-2-9 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/O1

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	38.12	699.29	12.5
2	37.96	715.27	12.4
3	38.09	708.86	12.6
4	37.96	717.03	12.5
5	37.99	720.92	12.5
AVG	38.02	712.27	12.5
SD	0.08	8.46	0.1

ตาราง ก-2-10 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG3/O1

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.01	719.26	11.4
2	38.65	632.49	12.2
3	38.44	692.91	11.9
4	38.99	727.77	11.4
5	38.61	656.85	12.1
AVG	38.74	685.86	11.8
SD	0.25	40.66	0.4

ตาราง ก-2-11 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5/O1

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	39.48	706.55	11.3
2	39.46	648.57	12.1
3	39.27	667.35	11.9
4	39.18	645.91	12.1
5	38.96	647.07	11.4
AVG	39.27	663.09	11.8
SD	0.21	25.83	0.4

ตาราง ก-2-12 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG10/O1

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	37.57	731.92	11.6
2	37.54	704.90	11.5
3	37.68	720.81	11.6
4	37.58	721.49	11.5
5	37.60	715.93	11.4
AVG	37.59	719.01	11.5
SD	0.05	9.81	0.1

ตาราง ก-2-13 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	36.83	805.79	10.2
2	36.81	796.82	10.9
3	36.70	791.36	10.6
4	36.85	804.42	10.6
5	36.75	741.79	10.9
AVG	36.79	788.04	10.6
SD	0.06	26.51	0.3

ตาราง ก-2-14 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG3/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	38.02	749.20	11.3
2	38.23	746.51	10.8
3	37.87	758.16	11.1
4	37.65	733.16	10.6
5	37.70	760.22	11.5
AVG	37.89	749.45	11.1
SD	0.24	10.79	0.4

ตาราง ก-2-15 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	37.78	724.17	11.8
2	37.64	749.50	12.1
3	37.66	732.68	11.6
4	38.02	731.79	12.0
5	38.12	748.93	11.8
AVG	37.84	737.41	11.9
SD	0.22	11.27	0.2

ตาราง ก-2-16 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG10/O2

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	37.19	718.19	11.0
2	37.22	711.06	10.9
3	37.27	735.81	11.1
4	37.23	702.24	11.1
5	37.21	711.20	10.9
AVG	37.22	715.70	11.0
SD	0.03	12.59	0.1

ตาราง ก-2-17 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	32.03	974.39	9.1
2	31.93	987.53	9.3
3	32.02	957.41	9.0
4	31.72	967.57	9.1
5	31.89	897.90	9.2
AVG	31.92	956.96	9.1
SD	0.13	34.78	0.1

ตาราง ก-2-18 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG3/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	32.74	879.68	9.2
2	32.65	949.49	9.0
3	32.51	900.81	9.4
4	32.52	917.51	9.5
5	32.66	903.52	9.8
AVG	32.62	910.20	9.4
SD	0.10	25.79	0.3

ตาราง ก-2-19 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG5/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	33.31	879.38	9.7
2	33.24	901.13	10.1
3	33.42	928.86	9.9
4	33.48	923.80	9.2
5	33.42	929.16	9.3
AVG	33.37	912.47	9.6
SD	0.10	21.79	0.4

ตาราง ก-2-20 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PgG10/O6

No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
1	33.09	907.52	8.4
2	33.28	989.16	9.0
3	33.13	996.83	8.9
4	33.20	893.33	8.8
5	33.21	928.56	8.5
AVG	33.18	943.08	8.7
SD	0.07	47.34	0.3



ภาคผนวก ข
ความทนแรงตัดโค้ง

1) ความทนแรงตัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25

ตาราง ข-1-1 ค่าความทนแรงตัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ใช้ PBS-g-MA
เป็นสารคู่ควบ

No.	Flexural strength (N/mm ²)					
	PBS	PBS/PgM5	PBS/O2	PBS/PgM5/O2	PBS/O6	PBS/PgM5/O6
1	18.11	17.90	17.46	18.87	16.88	18.72
2	18.06	17.82	17.46	18.92	16.82	18.65
3	18.03	18.02	17.39	18.99	16.94	18.67
4	17.94	17.90	17.40	18.78	16.91	18.66
5	18.00	17.97	17.49	18.68	16.91	18.66
AVG	18.03	17.92	17.44	18.85	16.89	18.67
SD	0.06	0.08	0.04	0.12	0.05	0.03

ตาราง ข-1-2 ค่าความทนแรงตัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ใช้ PBS-g-GMA
เป็นสารคู่ควบ

No.	Flexural strength (N/mm ²)					
	PBS	PBS/PgG5	PBS/O2	PBS/PgG5/O2	PBS/O6	PBS/PgG5/O6
1	18.11	18.74	17.46	18.99	16.88	19.12
2	18.06	18.82	17.46	18.57	16.82	19.16
3	18.03	18.34	17.39	18.68	16.94	19.04
4	17.94	18.38	17.40	19.05	16.91	19.13
5	18.00	18.61	17.49	18.98	16.91	19.24
AVG	18.03	18.58	17.44	18.85	16.89	19.14
SD	0.06	0.21	0.04	0.21	0.05	0.07

2) ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC

ตาราง ข-2-1 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Flexural strength (N/mm ²)			
	PBS	PBS/PgG3	PBS/PgG5	PBS/PgG10
1	20.05	19.98	20.97	19.60
2	20.09	20.11	20.83	19.60
3	20.09	20.11	20.81	19.74
4	20.14	20.11	20.97	19.61
5	20.11	19.98	20.78	19.60
AVG	20.10	20.06	20.87	19.63
SD	0.03	0.07	0.09	0.06

ตาราง ข-2-2 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์โดยมี ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 0.5 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Flexural strength (N/mm ²)				
	PBS	PBS/O0.5	PBS/PgG3/O0.5	PBS/PgG5/O0.5	PBS/PgG10/O0.5
1	20.05	19.97	20.06	20.58	20.19
2	20.09	20.21	20.02	20.60	20.06
3	20.09	19.96	20.04	20.62	20.15
4	20.14	20.09	20.04	20.59	19.95
5	20.11	20.17	20.04	20.59	20.03
AVG	20.10	20.08	20.04	20.60	20.08
SD	0.03	0.11	0.01	0.02	0.10

ตาราง ข-2-3 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์โดยมี
ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 1 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Flexural strength (N/mm ²)				
	PBS	PBS/O1	PBS/PgG3/O1	PBS/PgG5/O1	PBS/PgG10/O1
1	20.05	20.43	20.39	20.55	19.94
2	20.09	20.20	20.39	20.68	20.04
3	20.09	20.18	20.27	20.66	19.85
4	20.14	20.35	20.53	20.52	20.14
5	20.11	20.36	20.29	20.76	19.94
AVG	20.10	20.30	20.37	20.63	19.98
SD	0.03	0.11	0.10	0.10	0.11

ตาราง ข-2-4 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์โดยมี
ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 2 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Flexural strength (N/mm ²)				
	PBS	PBS/O2	PBS/PgG3/O2	PBS/PgG5/O2	PBS/PgG10/O2
1	20.05	20.49	20.55	20.78	20.46
2	20.09	20.50	20.53	20.75	20.45
3	20.09	20.54	20.55	20.75	20.33
4	20.14	20.36	20.54	20.67	20.42
5	20.11	20.32	20.51	20.66	20.39
AVG	20.10	20.44	20.54	20.72	20.41
SD	0.03	0.10	0.02	0.05	0.05

ตาราง ข-2-5 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตโดยมี
ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 6 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Flexural strength (N/mm ²)				
	PBS	PBS/O6	PBS/PgG3/O6	PBS/PgG5/O6	PBS/PgG10/O6
1	20.05	20.90	21.20	21.84	21.18
2	20.09	20.87	21.22	21.82	21.25
3	20.09	20.89	21.24	21.87	21.11
4	20.14	20.97	21.25	21.82	21.16
5	20.11	21.04	21.22	21.80	21.10
AVG	20.10	20.93	21.23	21.83	21.16
SD	0.03	0.07	0.02	0.03	0.06

ภาคผนวก ค
ความทนแรงกระแทก

1) ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25

ตาราง ค-1-1 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ใช้ PBS-g-MA
เป็นสารคู่ควบ

No.	Impact strength (J/m ²)					
	PBS	PBS/PgM5	PBS/O2	PBS/PgM5/O2	PBS/O6	PBS/PgM5/O6
1	4562.50	3524.42	2322.58	2370.49	1168.28	2177.47
2	4534.65	3602.64	2362.74	2390.67	1171.92	2391.44
3	4518.03	3532.46	2330.09	2396.03	1198.67	2384.86
4	4544.55	3479.09	2347.40	2378.28	1186.27	2400.66
5	4574.25	3601.32	2326.92	2392.73	1186.88	2338.61
AVG	4546.80	3547.99	2337.95	2385.64	1182.40	2338.61
SD	22.25	53.33	16.76	10.81	12.34	93.20

ตาราง ค-1-2 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ใช้ PBS-g-GMA
เป็นสารคู่ควบ

No.	Impact strength (J/m ²)					
	PBS	PBS/PgG5	PBS/O2	PBS/PgG5/O2	PBS/O6	PBS/PgG5/O6
1	4562.50	4126.62	2322.58	2653.59	1168.28	1807.30
2	4534.65	4169.38	2362.74	2771.33	1171.92	1810.00
3	4518.03	3936.66	2330.09	2662.29	1198.67	1794.70
4	4544.55	4136.00	2347.40	2641.69	1186.27	1806.66
5	4574.25	4123.37	2326.92	2651.46	1186.88	1803.98
AVG	4546.80	4098.41	2337.95	2676.07	1182.40	1804.53
SD	22.25	92.24	16.76	53.75	12.34	5.90

2) ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Battenfeld Austria รุ่น BA 250/50 CDC

ตาราง ค-2-1 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สกัดส่วนต่างๆ

No.	Impact strength (J/m ²)			
	PBS	PBS/PgG3	PBS/PgG5	PBS/PgG10
1	1981.30	1984.47	1990.65	1972.13
2	1990.74	1963.30	1963.07	1972.22
3	1990.65	1981.25	1962.69	1968.75
4	2006.21	1978.32	1978.19	1975.23
5	1978.32	1966.04	1959.87	1987.53
AVG	1989.44	1974.68	1970.89	1975.17
SD	10.89	9.44	13.17	7.28

ตาราง ค-2-2 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตโดยมี ออร์แกนโอเคลย์ปริมาณ 0.5 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สกัดส่วนต่างๆ

No.	Impact strength (J/m ²)				
	PBS	PBS/O0.5	PBS/PgG3/O0.5	PBS/PgG5/O0.5	PBS/PgG10/O0.5
1	1981.30	1972.04	1962.96	2276.92	1978.39
2	1990.74	1990.71	1975.23	2256.09	1971.96
3	1990.65	1996.51	1986.41	2238.53	1972.22
4	2006.21	1993.78	1950.92	2248.46	1969.13
5	1978.32	2012.57	1981.30	2227.96	1975.07
AVG	1989.44	1993.12	1971.36	2249.59	1973.35
SD	10.89	14.49	14.39	18.58	3.51

ตาราง ค-2-3 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตคอมพอลิเมอร์โดยมี
ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 1 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Impact strength (J/m ²)				
	PBS	PBS/O1	PBS/PgG3/O1	PBS/PgG5/O1	PBS/PgG10/O1
1	1981.30	1996.85	1960.36	2229.35	1960.24
2	1990.74	1950.68	1957.05	2273.29	1990.71
3	1990.65	1989.13	1955.41	2255.38	1987.76
4	2006.21	1973.46	1950.92	2236.63	1991.84
5	1978.32	1957.05	1978.46	2220.85	1994.25
AVG	1989.44	1973.43	1960.44	2243.10	1984.96
SD	10.89	19.88	10.63	21.14	14.01

ตาราง ค-2-4 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตคอมพอลิเมอร์โดยมี
ออร์แกนอเคลย์ปริมาณ 2 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Impact strength (J/m ²)				
	PBS	PBS/O2	PBS/PgG3/O2	PBS/PgG5/O2	PBS/PgG10/O2
1	1981.30	1966.36	1936.17	2235.29	1996.91
2	1990.74	1936.36	1963.30	2190.90	1972.39
3	1990.65	1945.12	1939.02	2207.31	1975.38
4	2006.21	1944.78	1957.05	2223.92	1966.15
5	1978.32	1963.30	1953.98	2187.28	1980.26
AVG	1989.44	1951.18	1949.90	2208.94	1978.22
SD	10.89	12.99	11.77	20.71	11.63

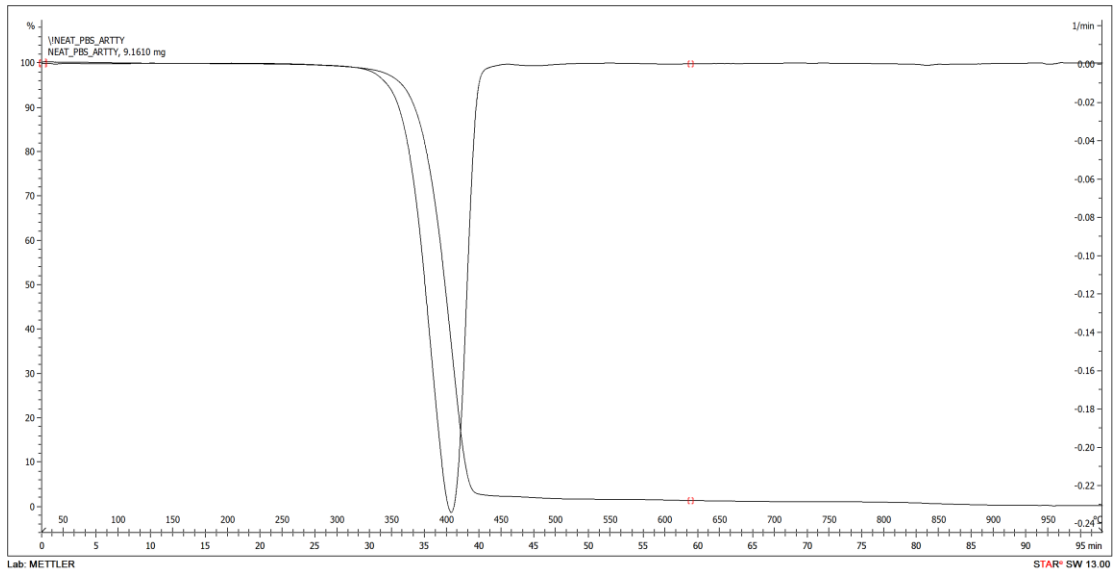
ตาราง ค-2-5 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตโดยมี
ออร์แกนโอเคลย์ปริมาณ 6 phr และใช้ PBS-g-GMA เป็นสารคู่ควบที่สัดส่วนต่างๆ

No.	Impact strength (J/m ²)				
	PBS	PBS/O6	PBS/PgG3/O6	PBS/PgG5/O6	PBS/PgG10/O6
1	1981.30	545.45	560.00	560.74	558.28
2	1990.74	551.20	558.64	557.27	556.57
3	1990.65	549.54	555.54	555.55	551.52
4	2006.21	551.51	560.00	556.92	553.19
5	1978.32	548.19	558.94	560.37	551.51
AVG	1989.44	549.18	558.62	558.17	554.21
SD	10.89	2.48	1.83	2.27	3.07

ภาคผนวก ง

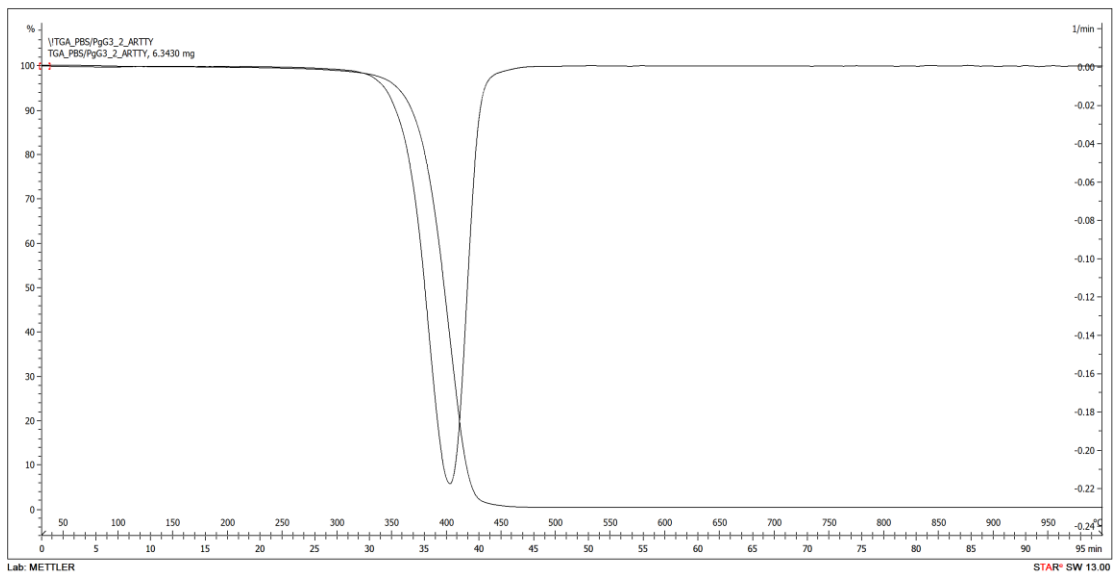
TGA Thermogram ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



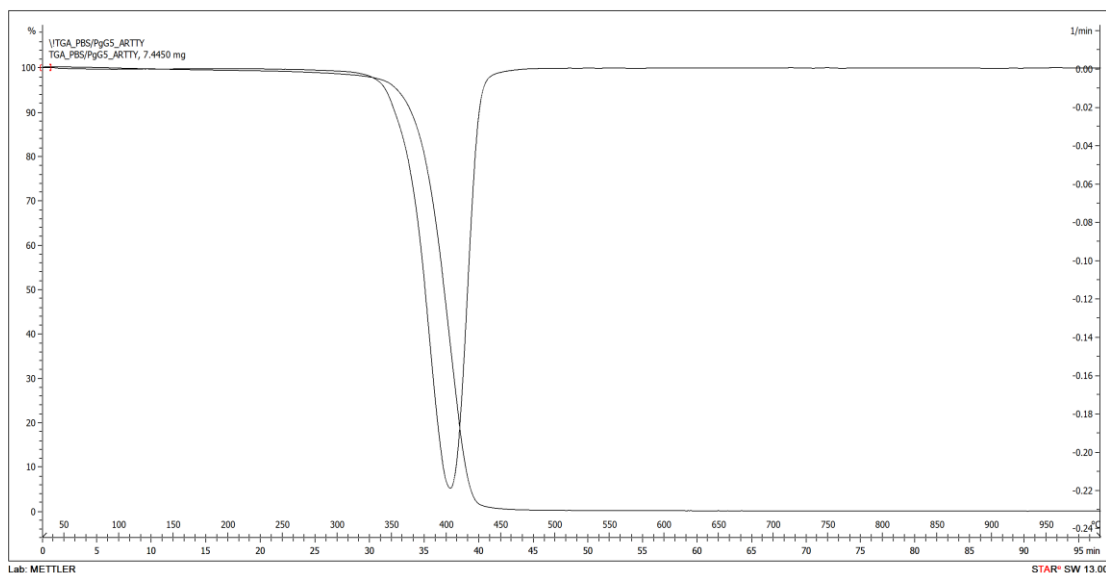
รูปที่ ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS

2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต ในอัตราส่วน 100:3 phr



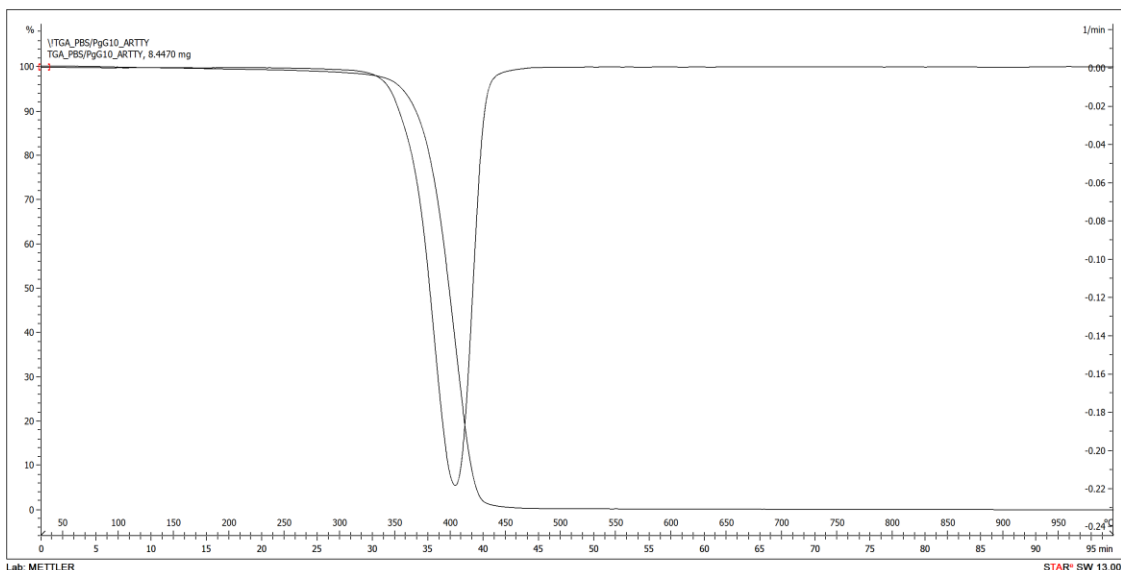
รูปที่ ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต ในอัตราส่วน 100:5 phr



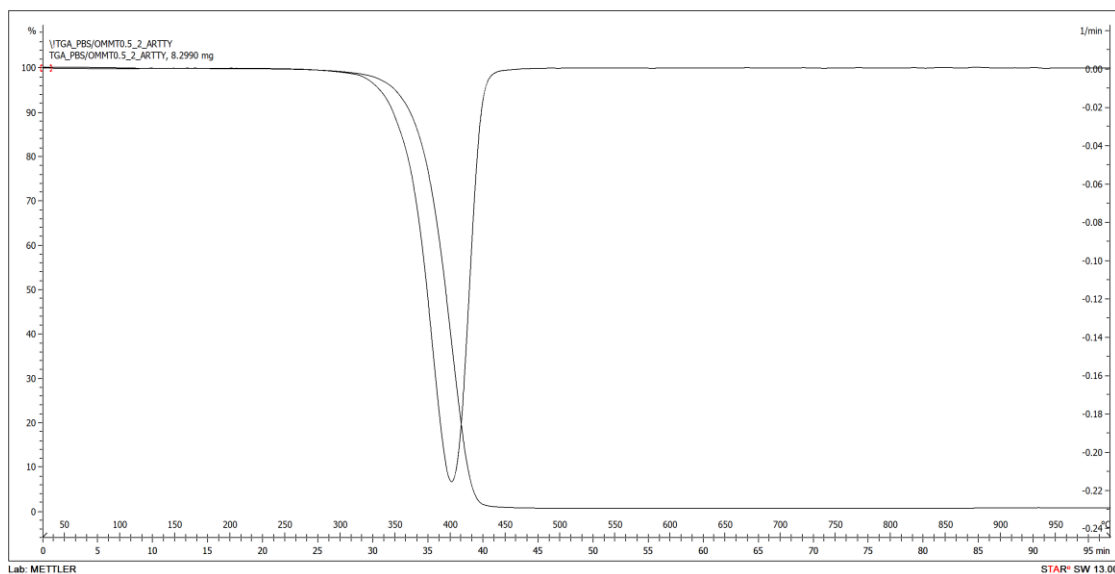
รูปที่ ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5

4. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต ในอัตราส่วน 100:10 phr



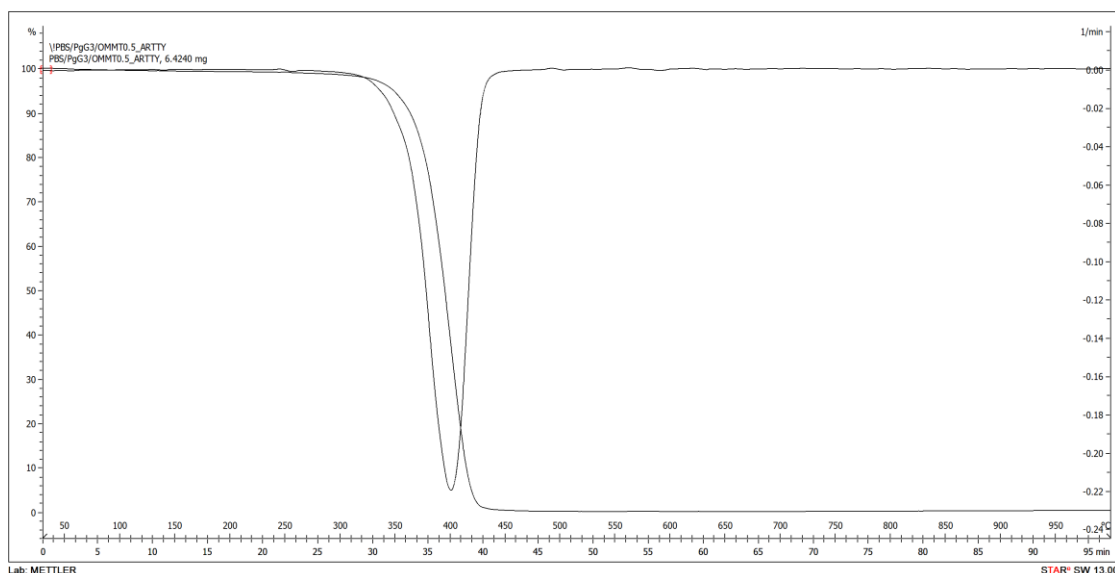
รูปที่ ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10

5. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอเคลย์ในอัตราส่วน 100:0.5 phr



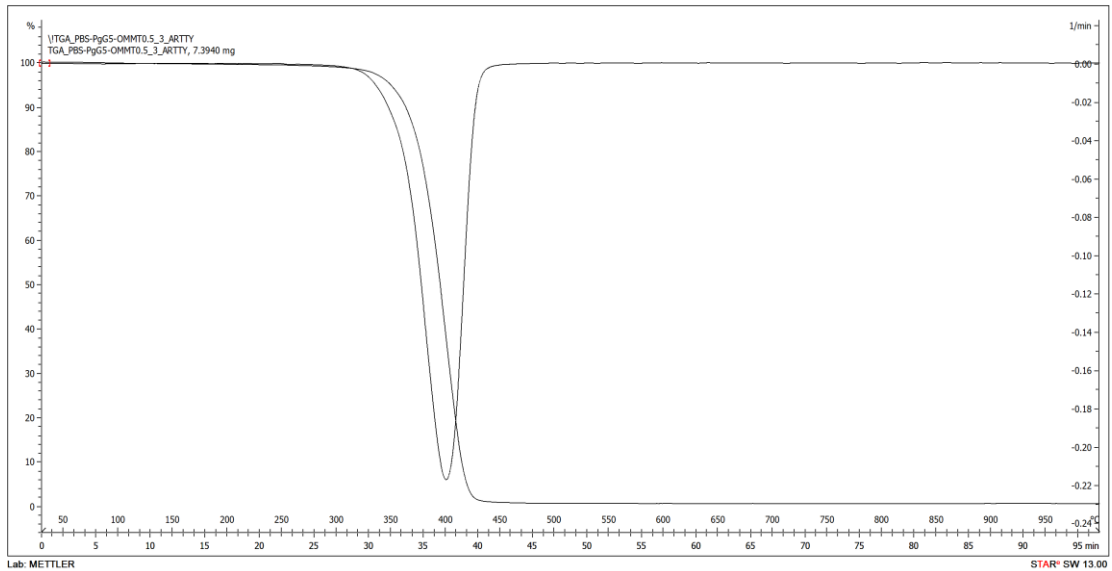
รูปที่ ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/O0.5

6. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอเคลย์ในอัตราส่วน 100:3:0.5 phr



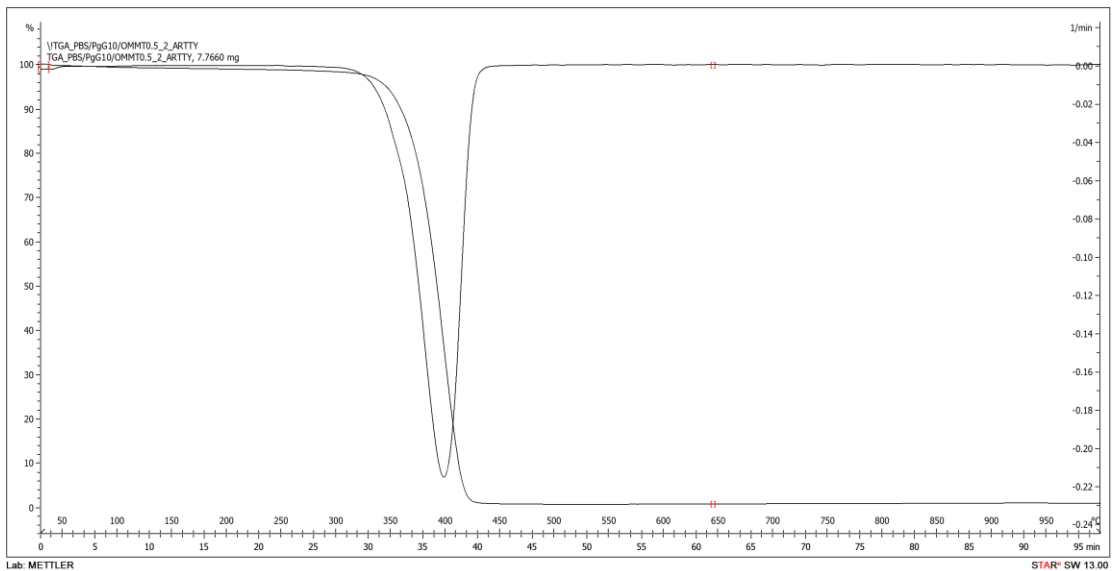
รูปที่ ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O0.5

7. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:0.5 phr



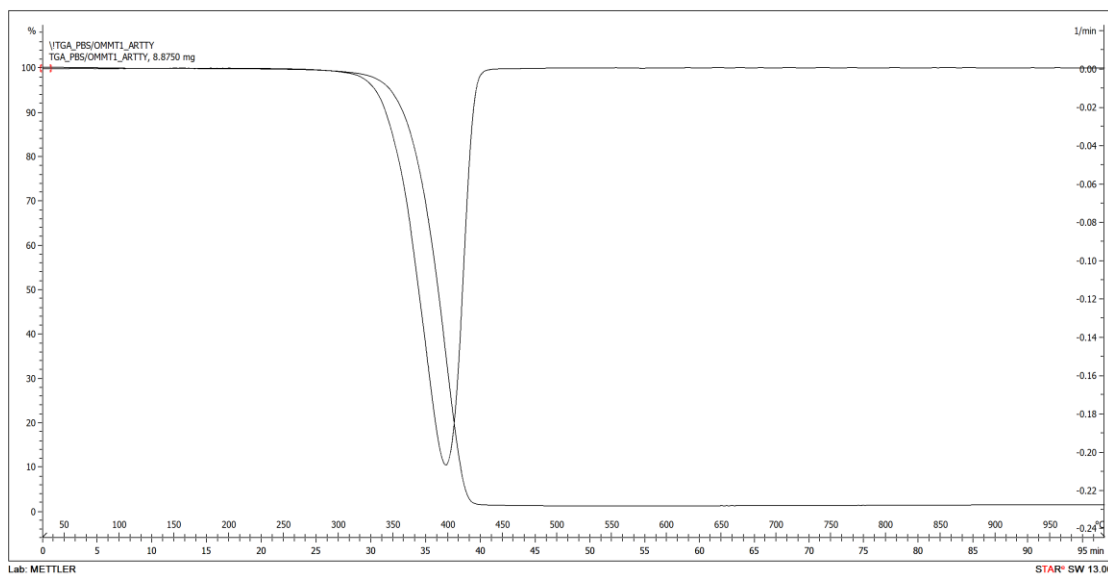
รูปที่ ง-7 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O0.5

8. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:0.5 phr



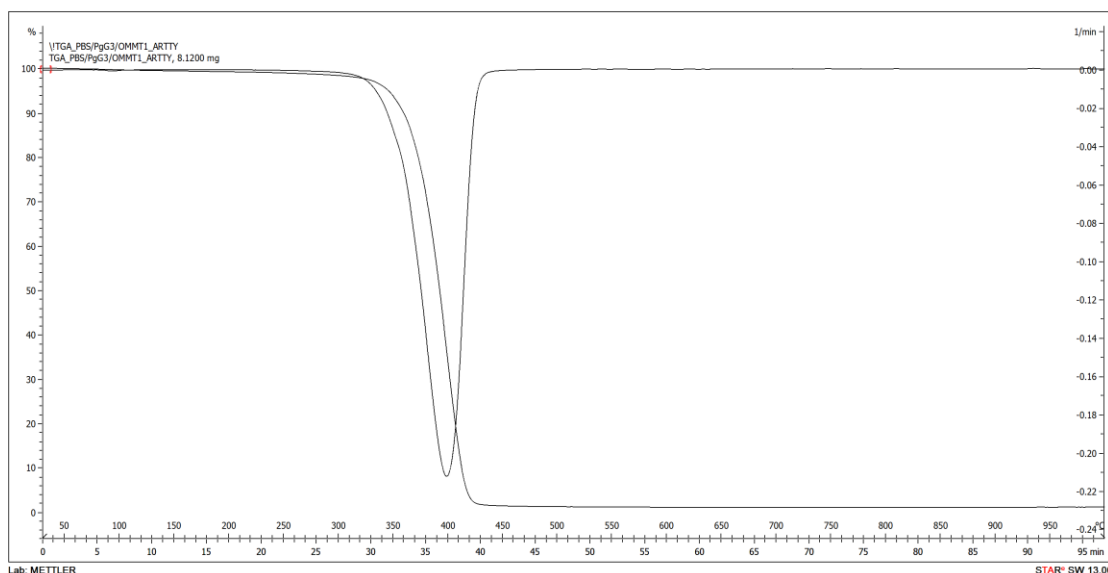
รูปที่ ง-8 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O0.5

9. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอเคลย์ในอัตราส่วน 100:1 phr



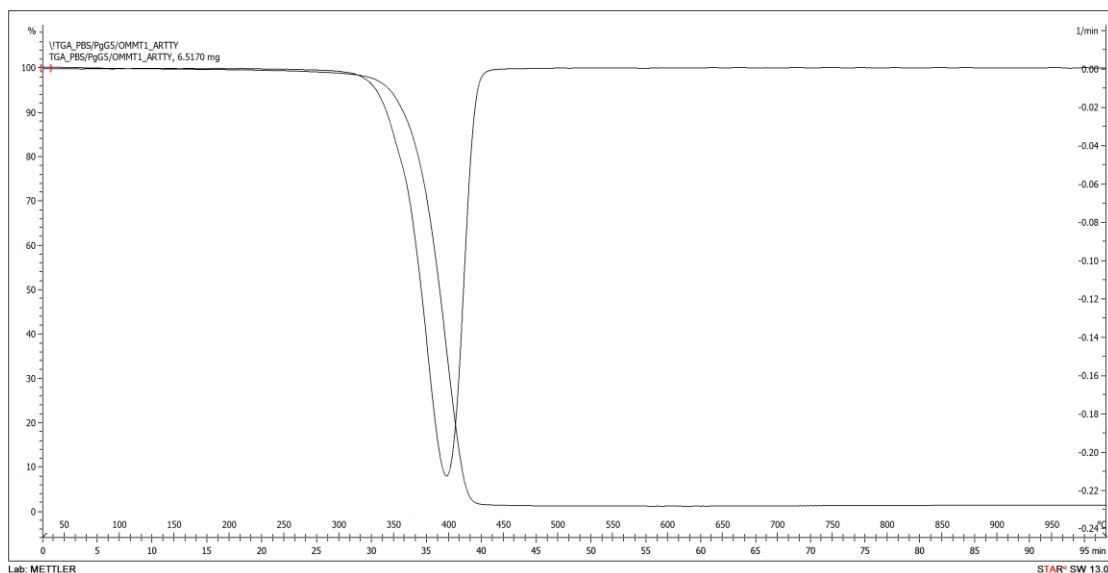
รูปที่ ง-9 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/O1

10. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอเคลย์ในอัตราส่วน 100:3:1 phr



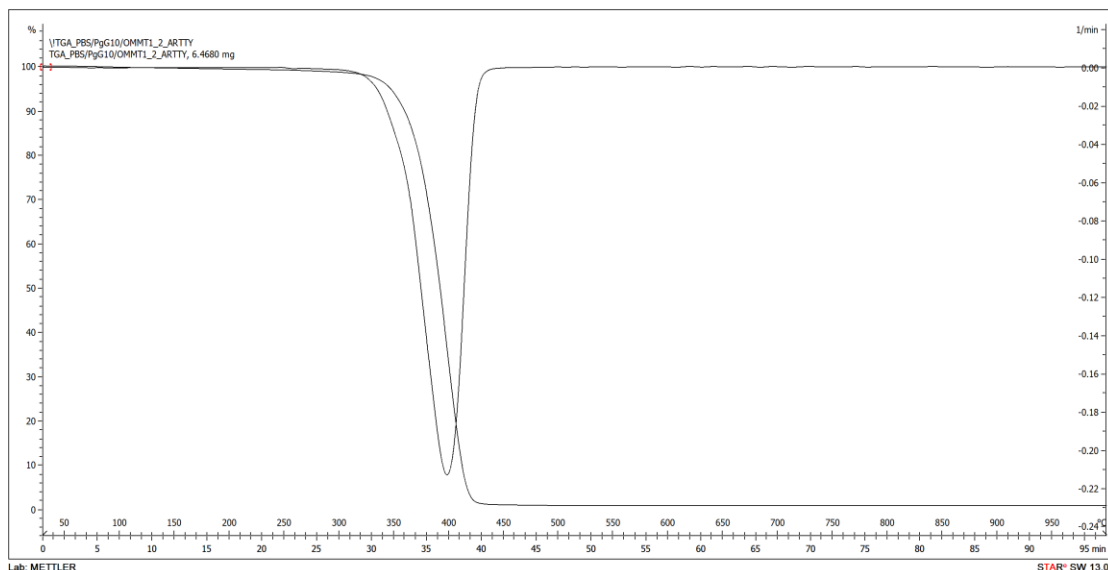
รูปที่ ง-10 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O1

11. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:1 phr



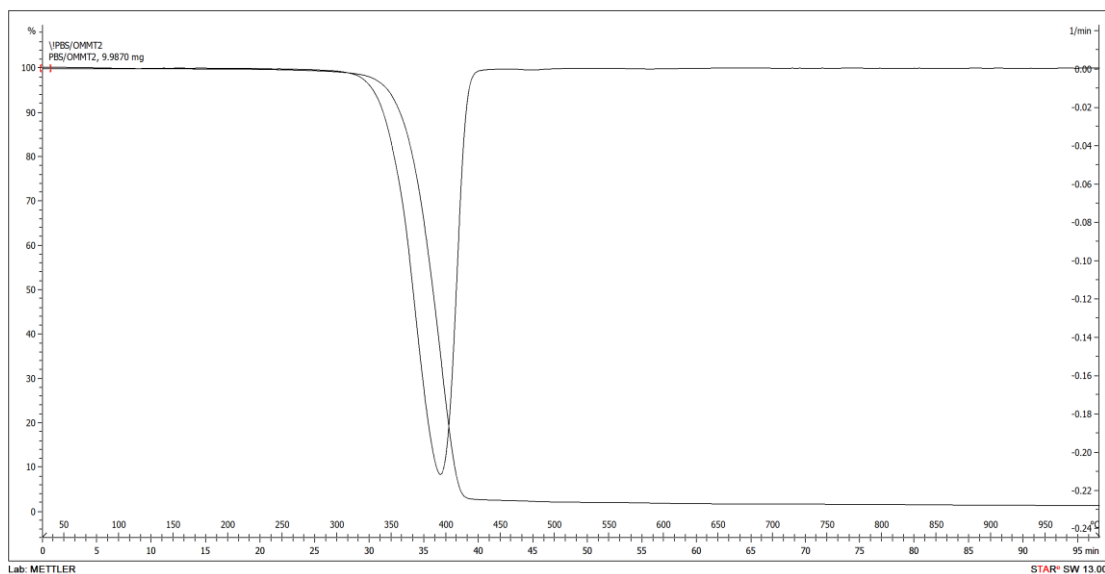
รูปที่ ง-11 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O1

12. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:1 phr



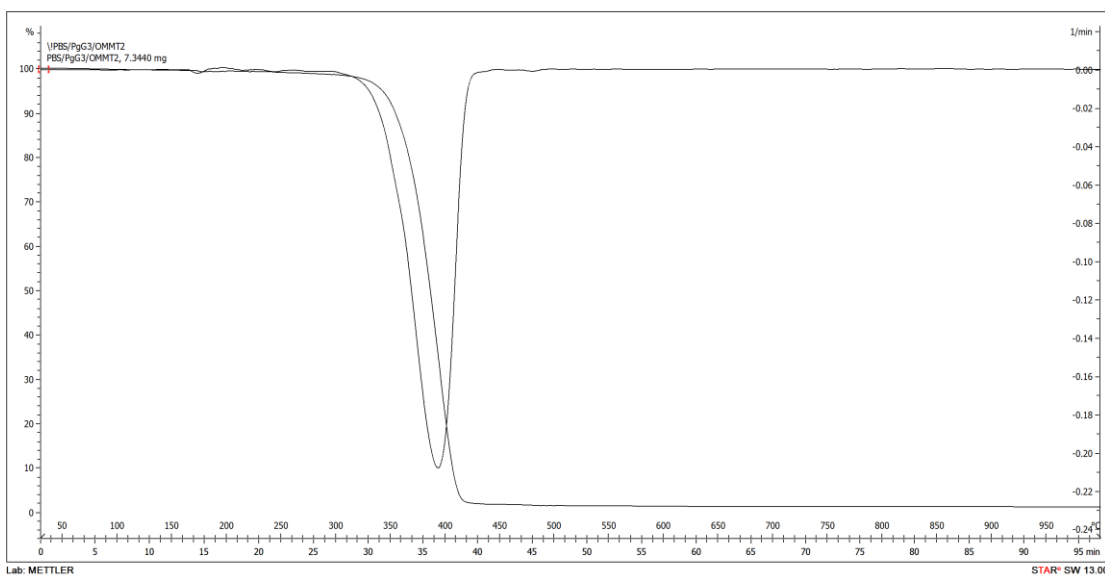
รูปที่ ง-12 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O1

13. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอคลอยในอัตราส่วน 100:2 phr



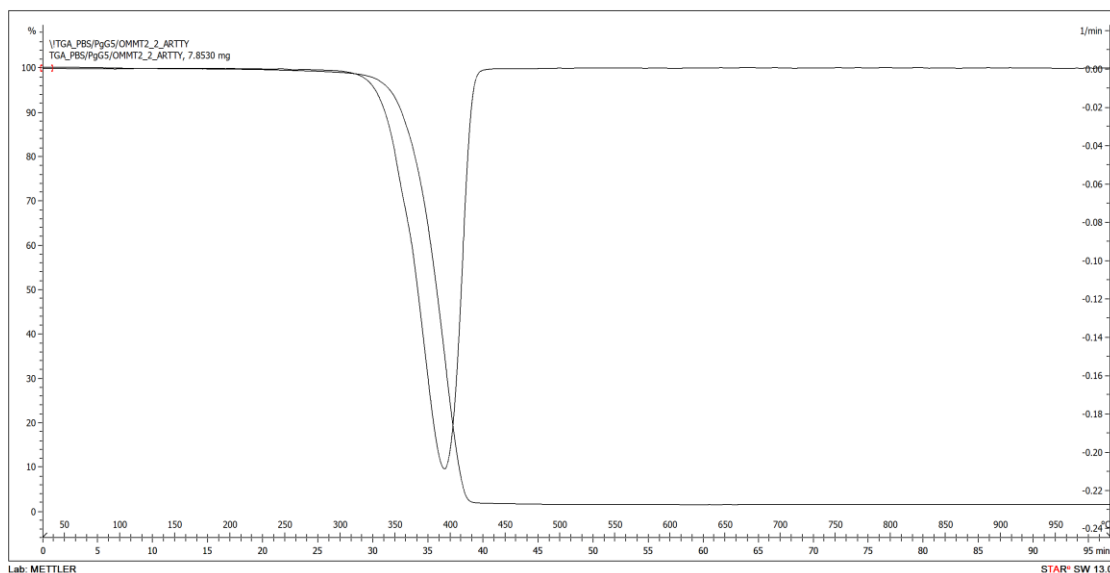
รูปที่ ง-13 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/O2

14. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอคลอยในอัตราส่วน 100:3:2 phr



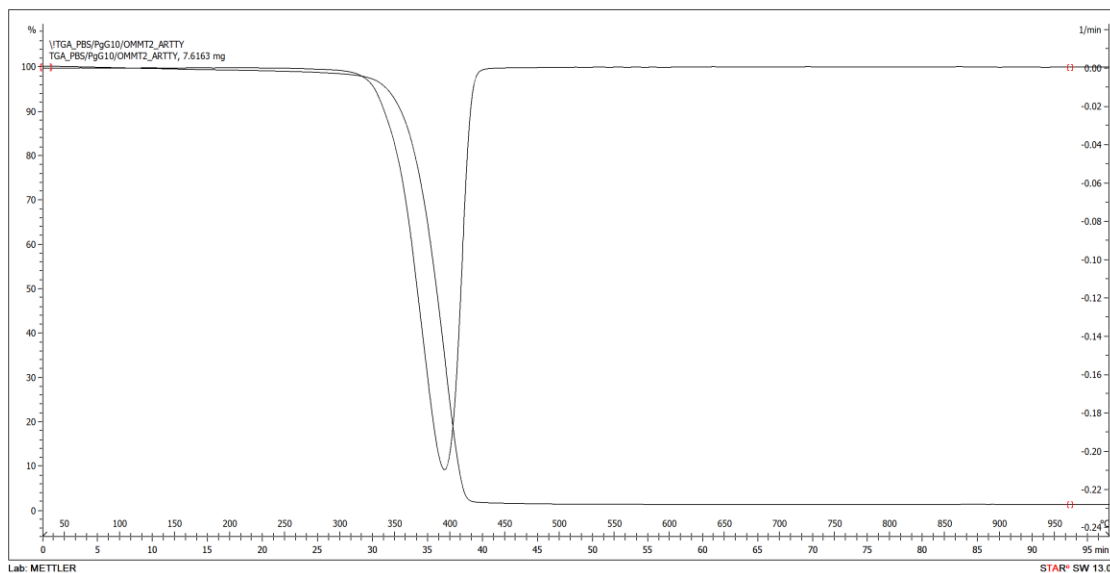
รูปที่ ง-14 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O2

15. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:2 phr



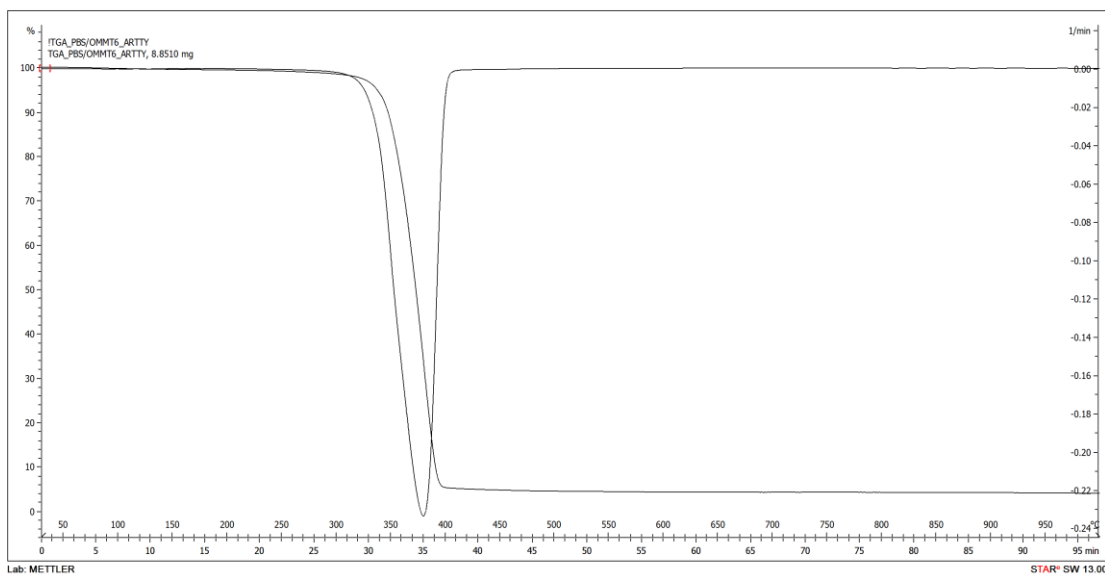
รูปที่ ง-15 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O2

16. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:2 phr



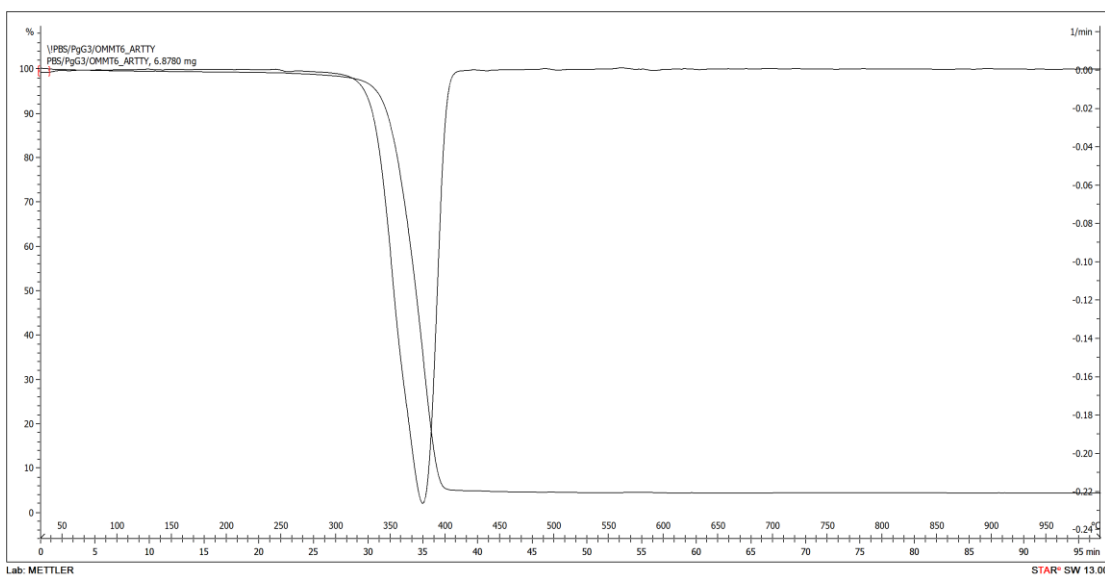
รูปที่ ง-16 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O2

17. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลย์ในอัตราส่วน 100:6 phr



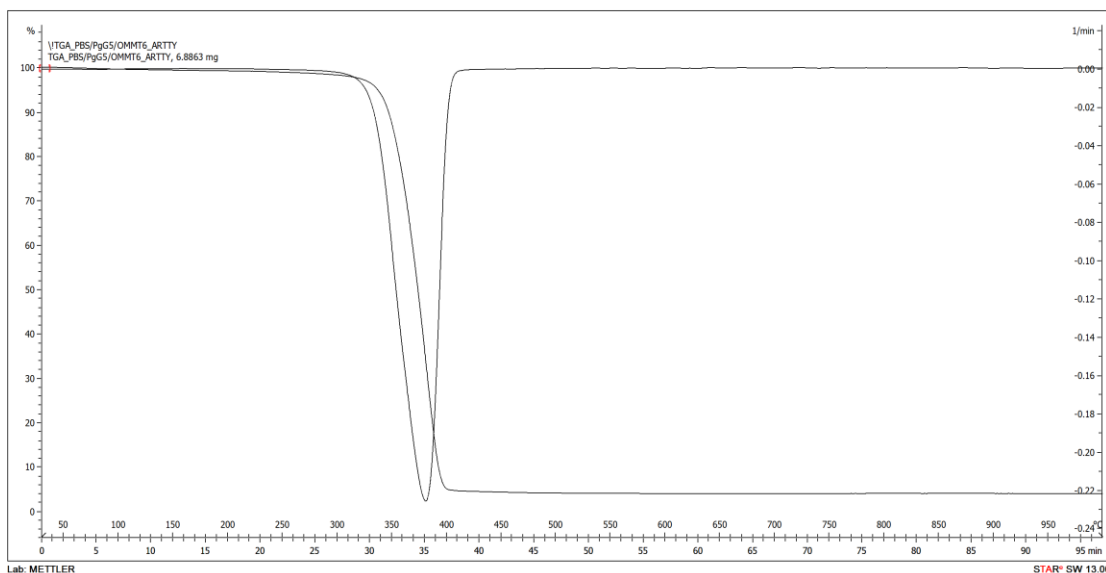
รูปที่ ง-17 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/O6

18. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลย์ในอัตราส่วน 100:3:6 phr



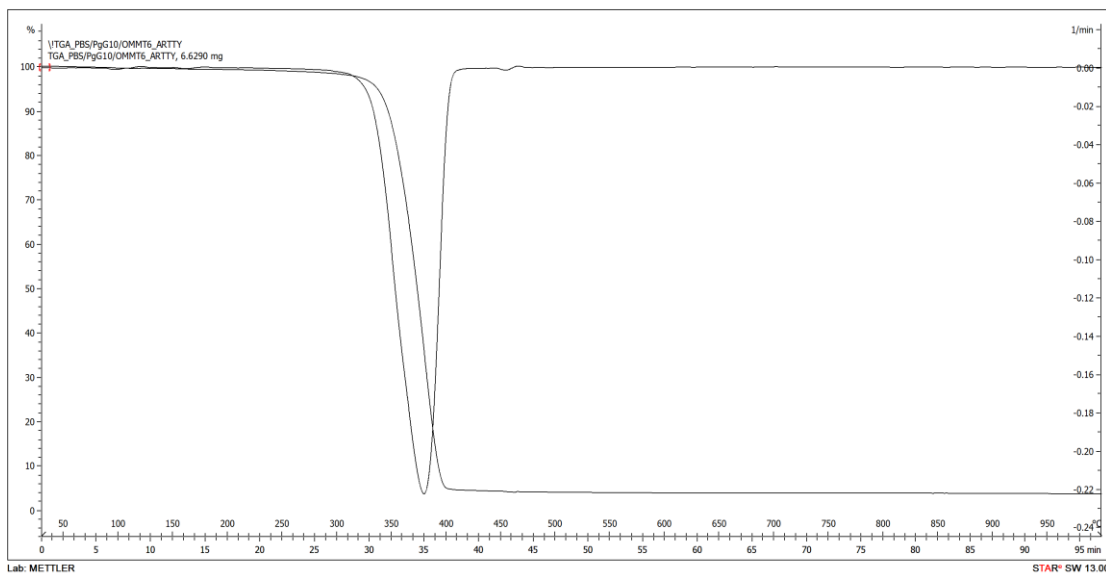
รูปที่ ง-18 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O6

19. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:6 phr



รูปที่ ง-19 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O6

20. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:6 phr

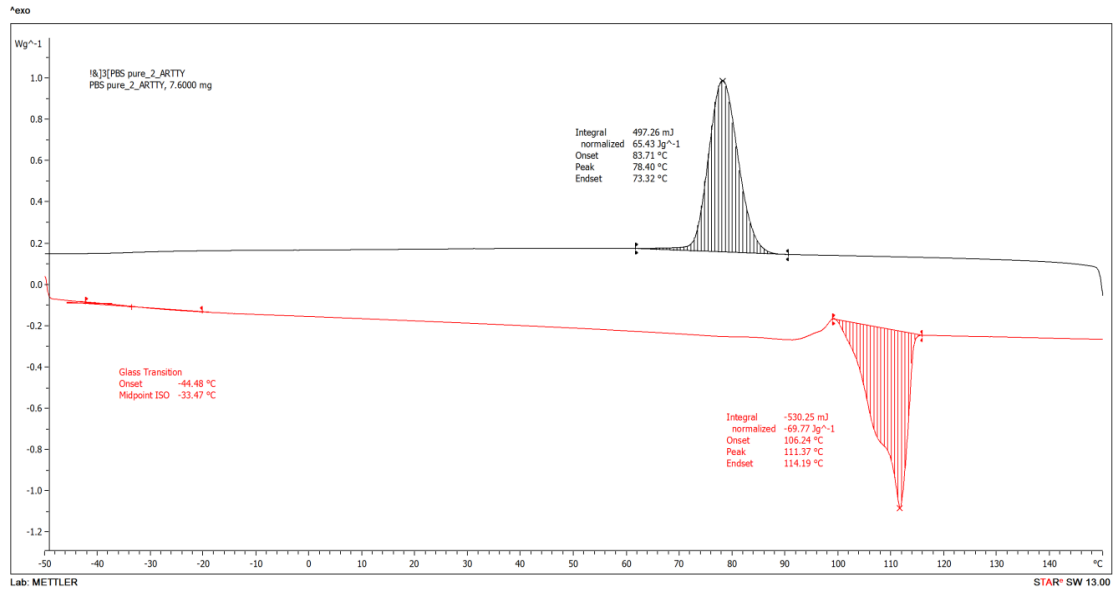


รูปที่ ง-20 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O6

ภาคผนวก จ

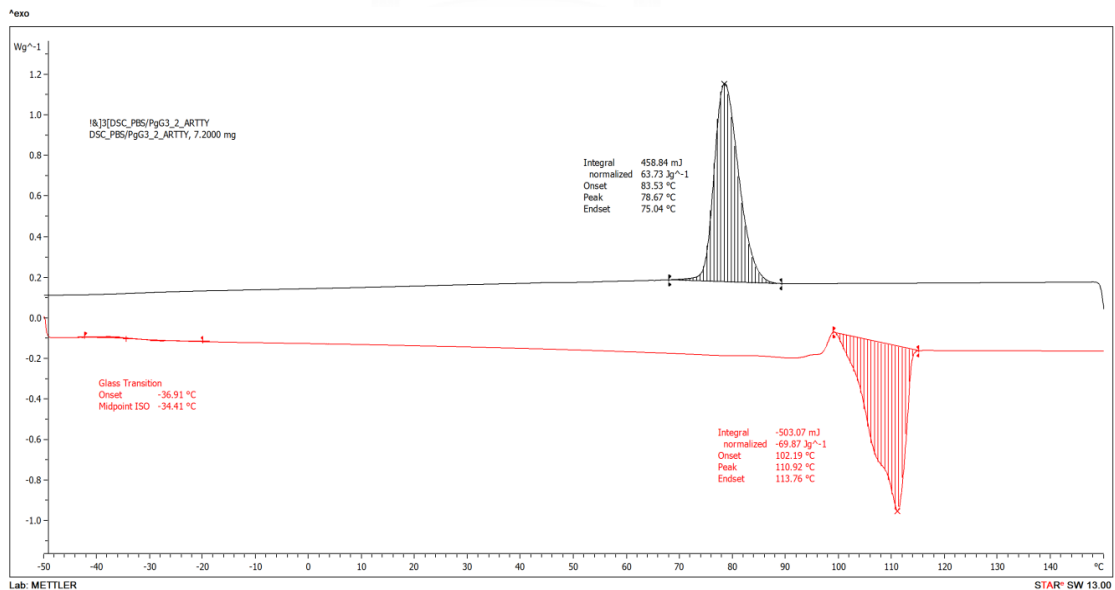
DSC Thermogram ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



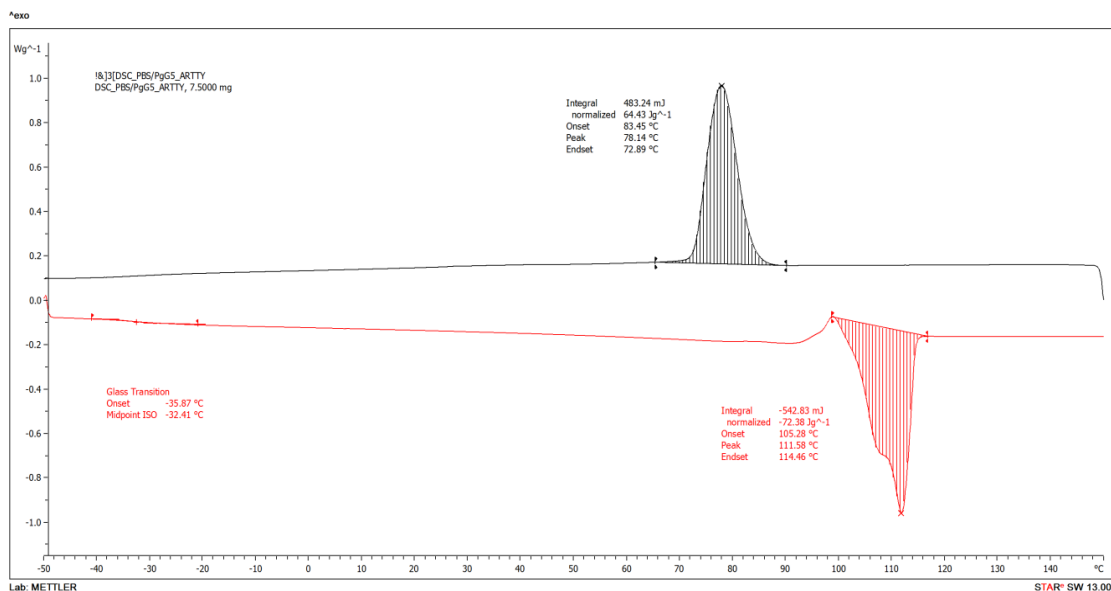
รูปที่ จ-1 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS

2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต ในอัตราส่วน 100:3 phr



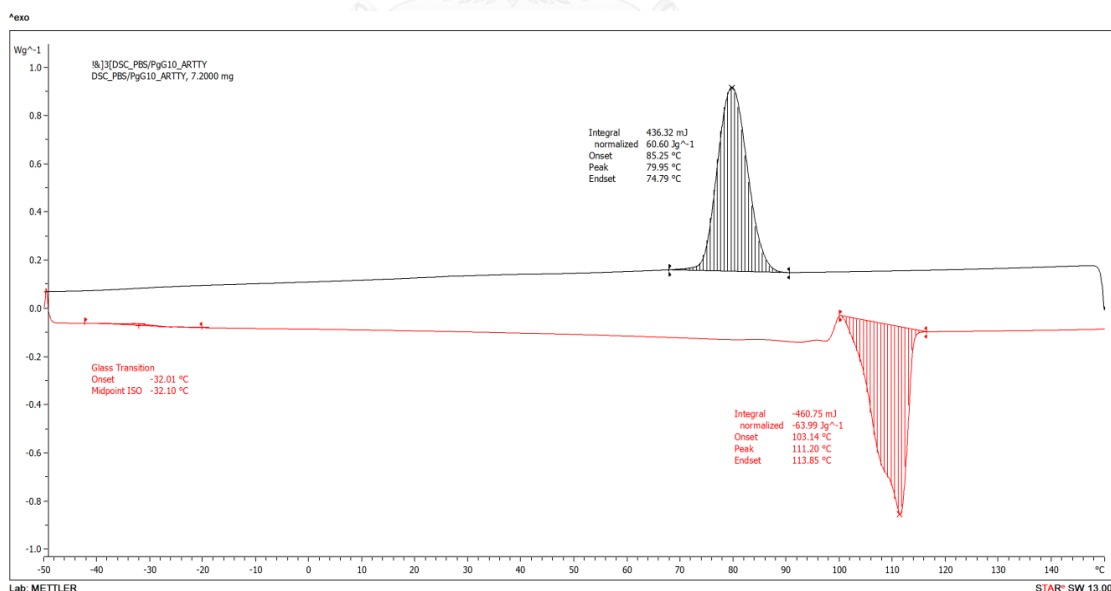
รูปที่ จ-2 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิবিวทีลีนซึกซีเนตและพอลิবিวทีลีนซึกซีเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต ในอัตราส่วน 100:5 phr



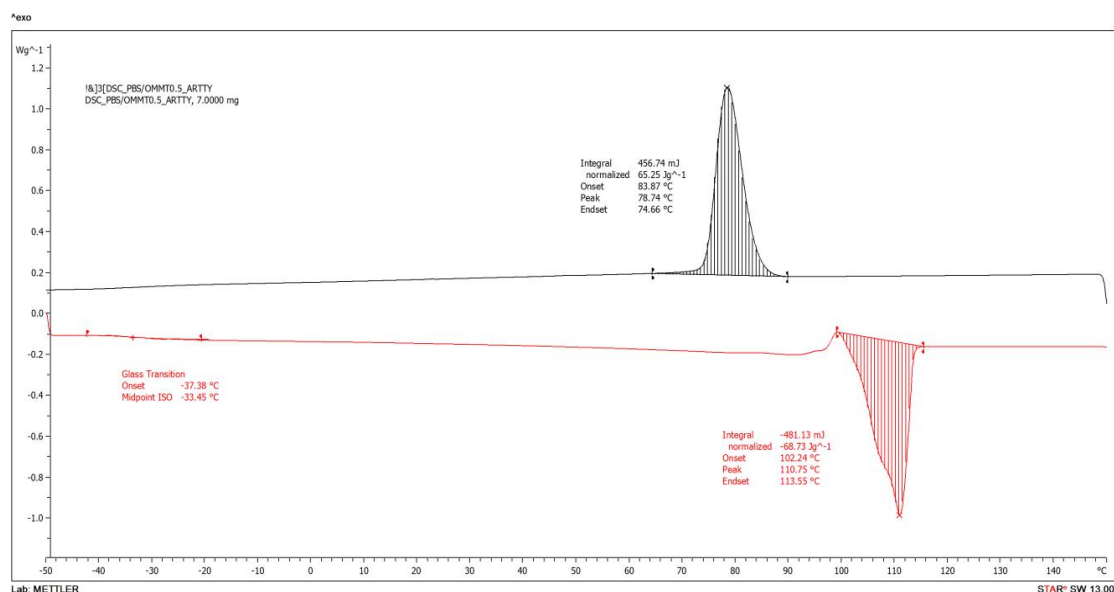
รูปที่ จ-3 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5

4. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิবিวทีลีนซึกซีเนตและพอลิবিวทีลีนซึกซีเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต ในอัตราส่วน 100:10 phr



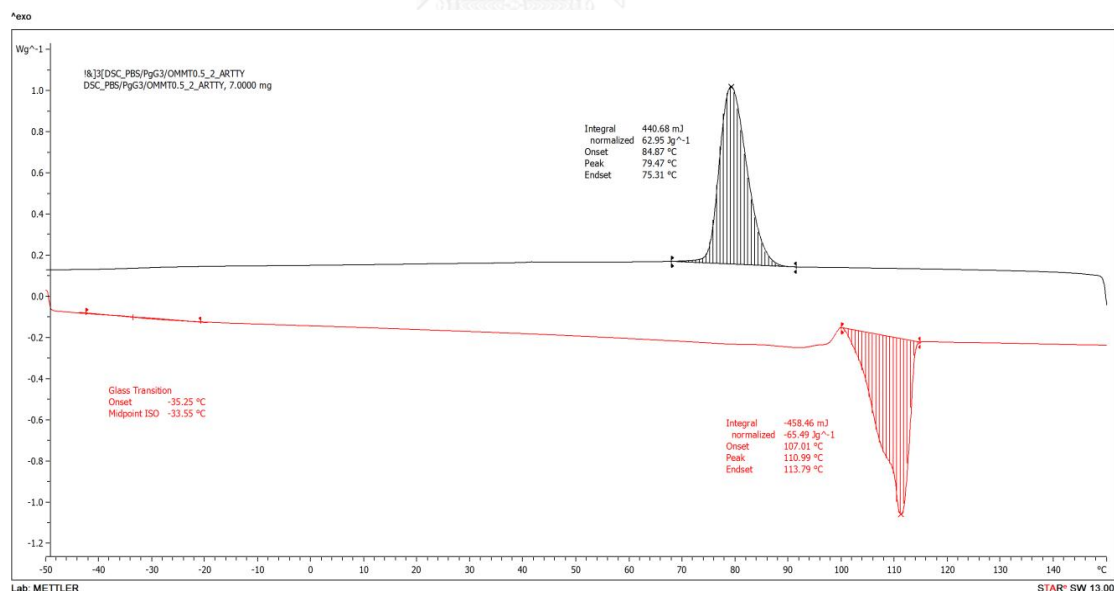
รูปที่ จ-4 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10

5. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโคลอยในอัตราส่วน 100:0.5 phr



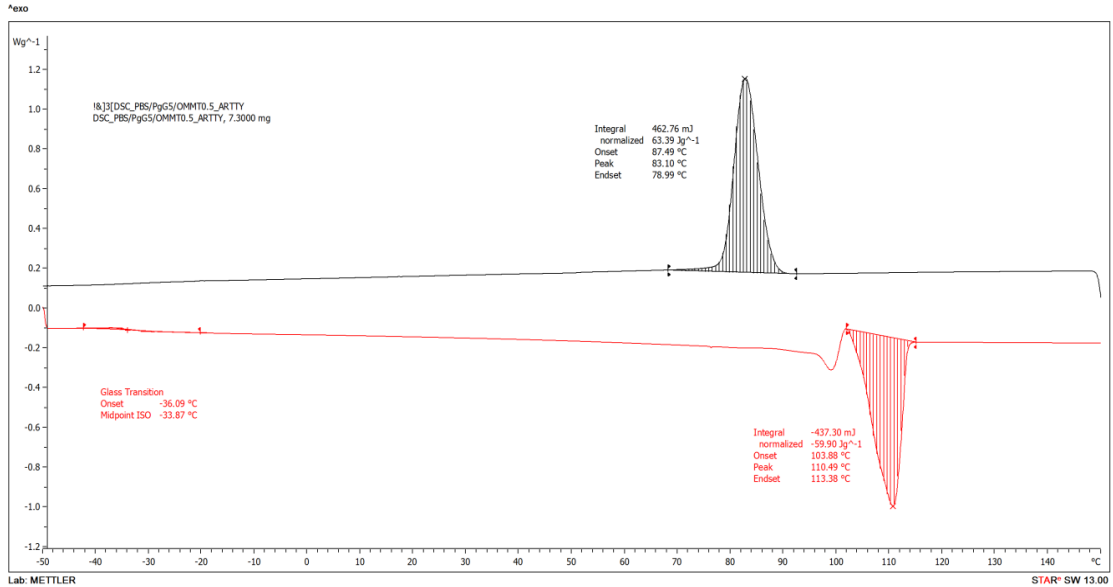
รูปที่ จ-5 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/O.5

6. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโคลอยในอัตราส่วน 100:3:0.5 phr



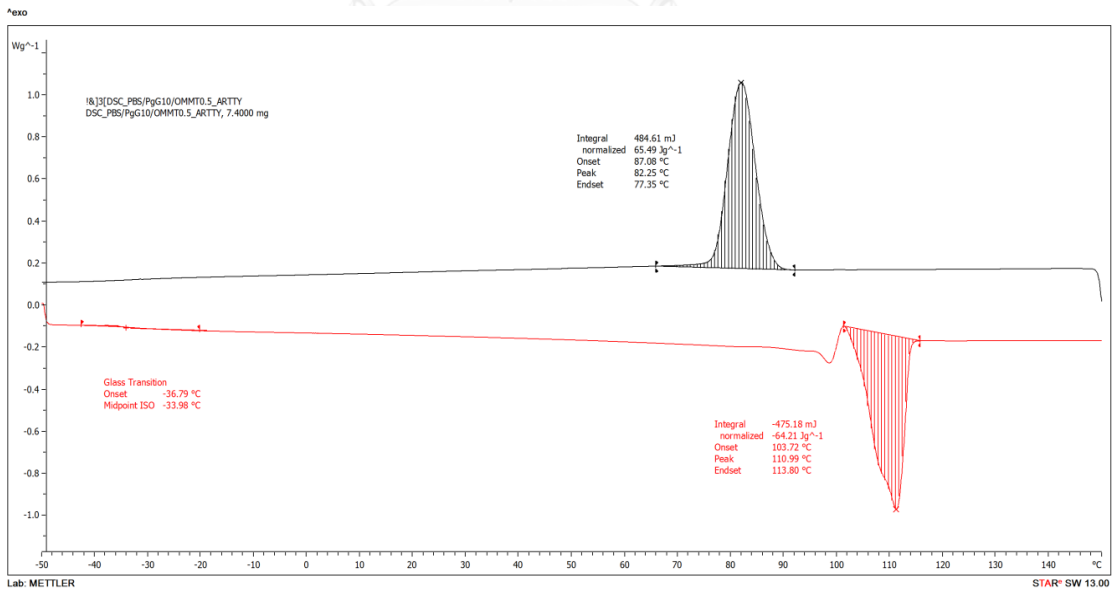
รูปที่ จ-6 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O.5

7. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลย์น์ในอัตราส่วน 100:5:0.5 phr



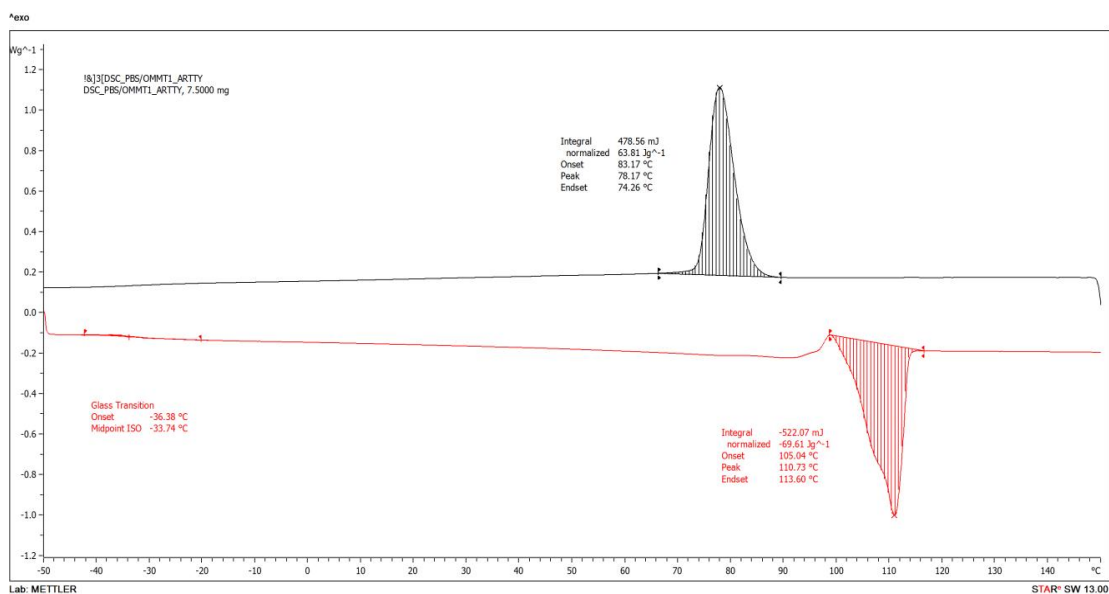
รูปที่ จ-7 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O0.5

8. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลย์น์ในอัตราส่วน 100:10:0.5 phr



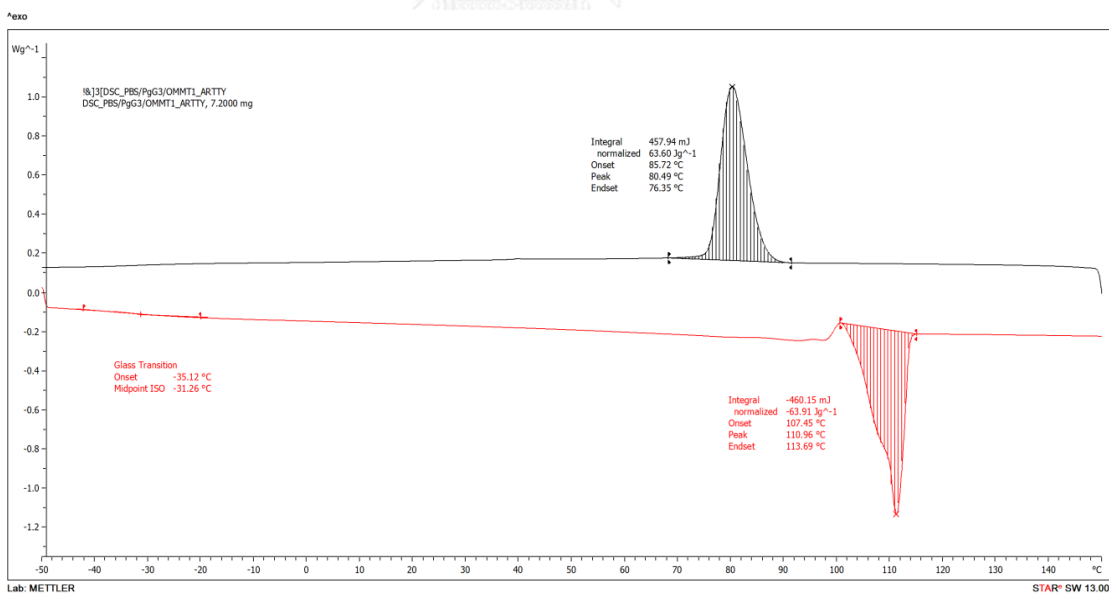
รูปที่ จ-8 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O0.5

9. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลอีในอัตราส่วน 100:1 phr



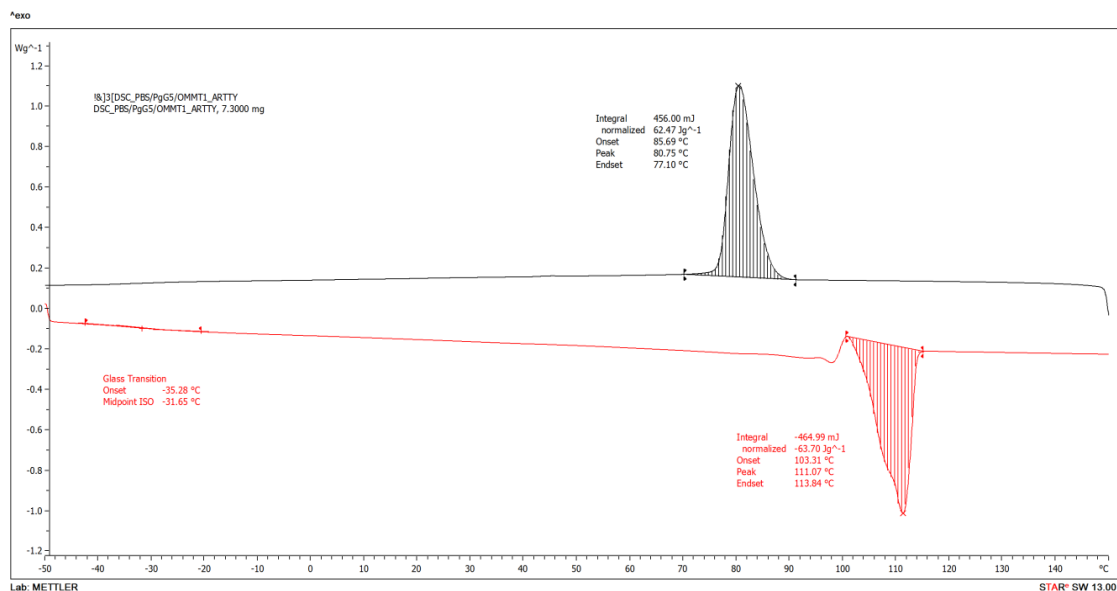
รูปที่ จ-9 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/O1

10. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลอีในอัตราส่วน 100:3:1 phr



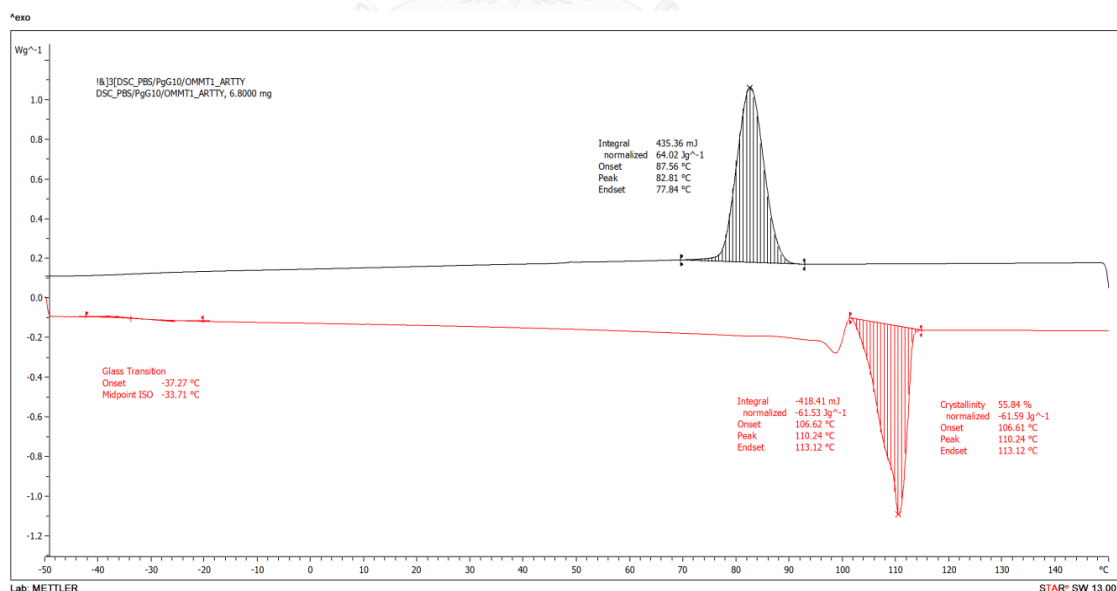
รูปที่ จ-10 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O1

11. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:1 phr



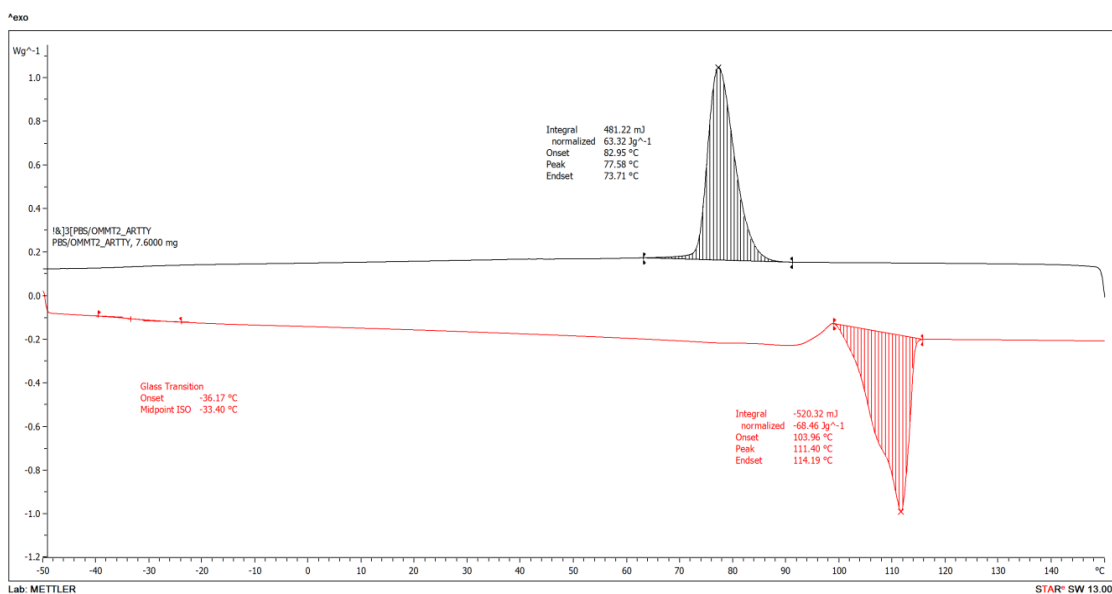
รูปที่ จ-11 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O1

12. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:1 phr



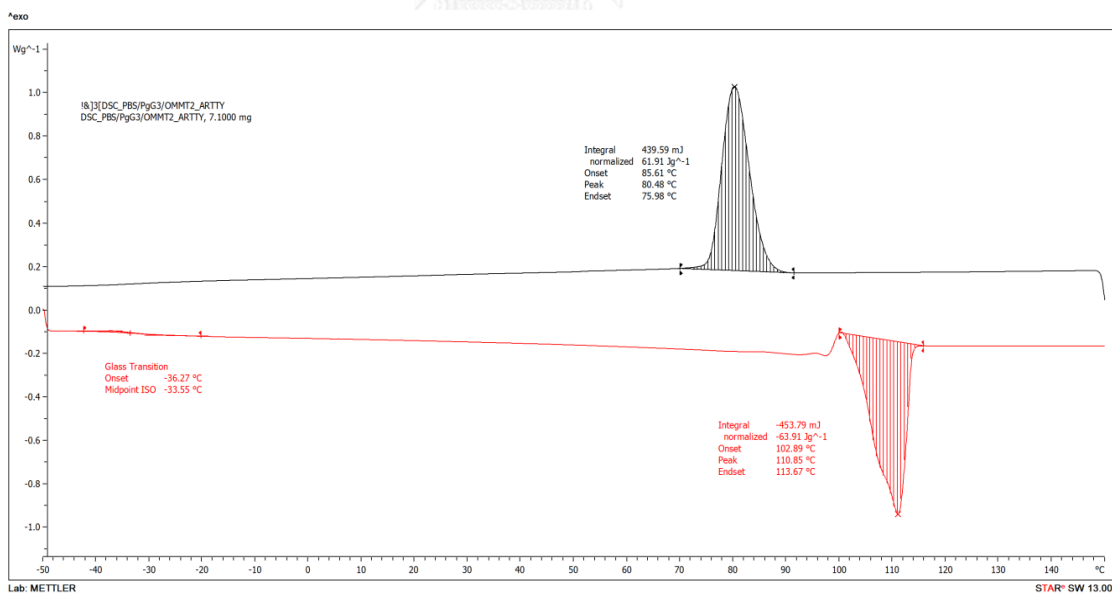
รูปที่ จ-12 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O1

13. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:2 phr



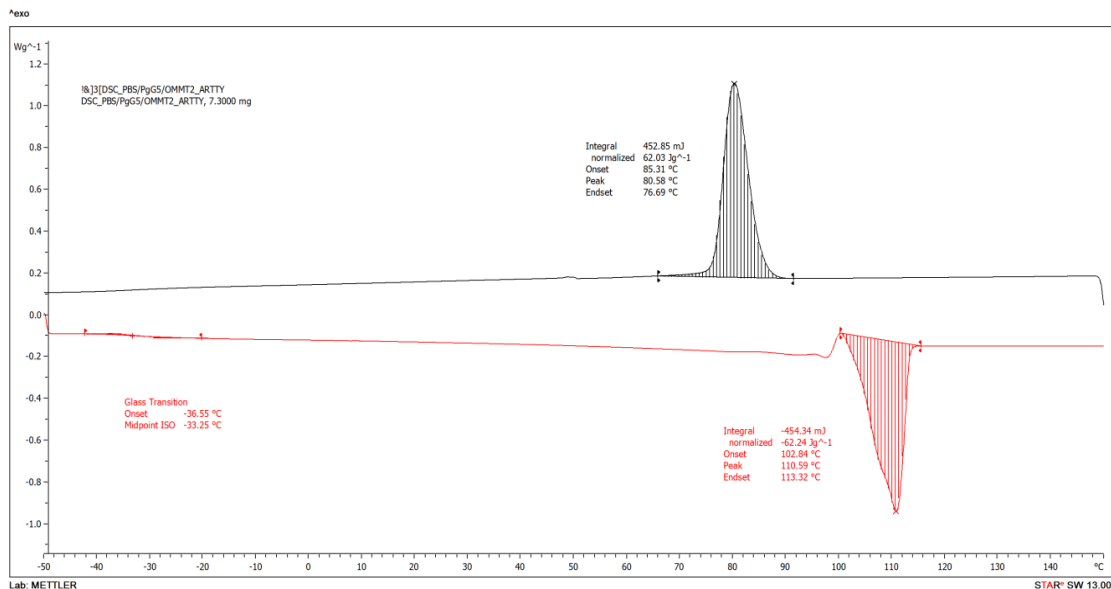
รูปที่ จ-13 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/O2

14. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต เป็นสารคูกวที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:3:2 phr



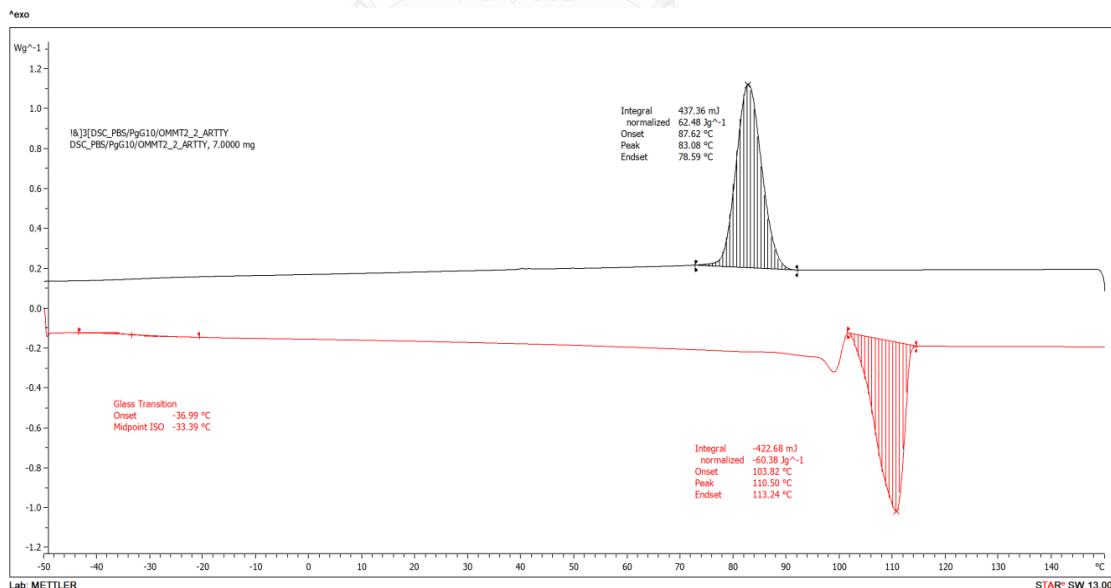
รูปที่ จ-14 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O2

15. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:2 phr



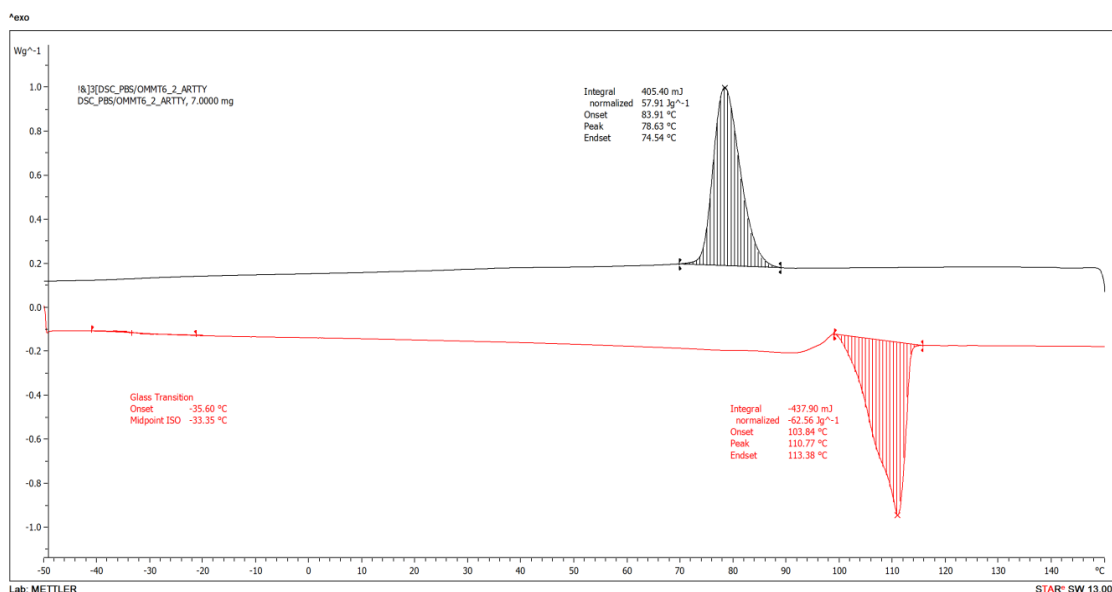
รูปที่ จ-15 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O2

16. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:2 phr



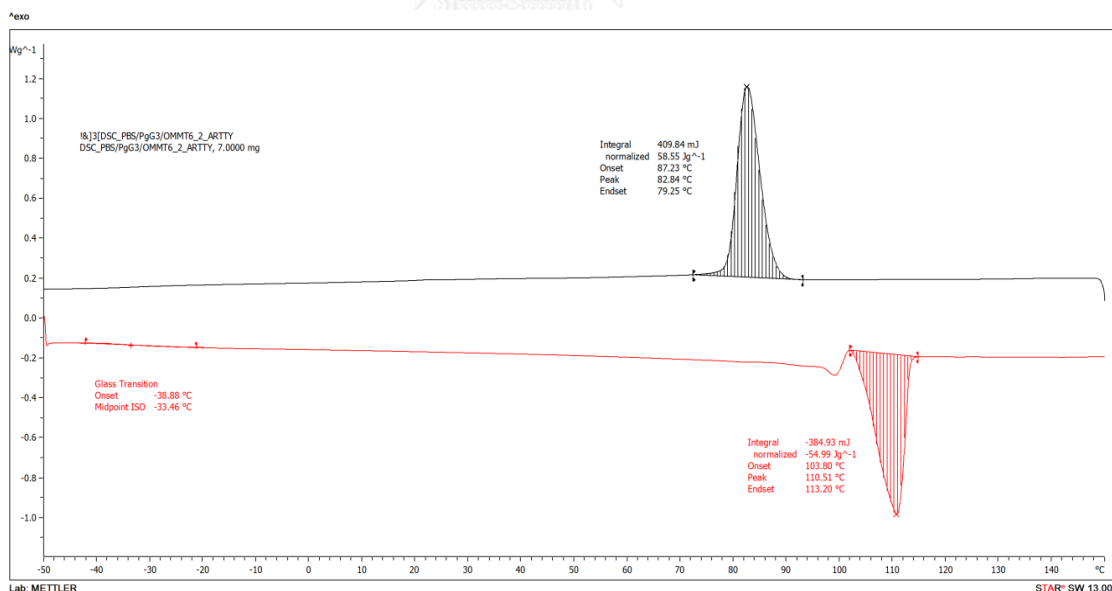
รูปที่ จ-16 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O2

17. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลอีในอัตราส่วน 100:6 phr



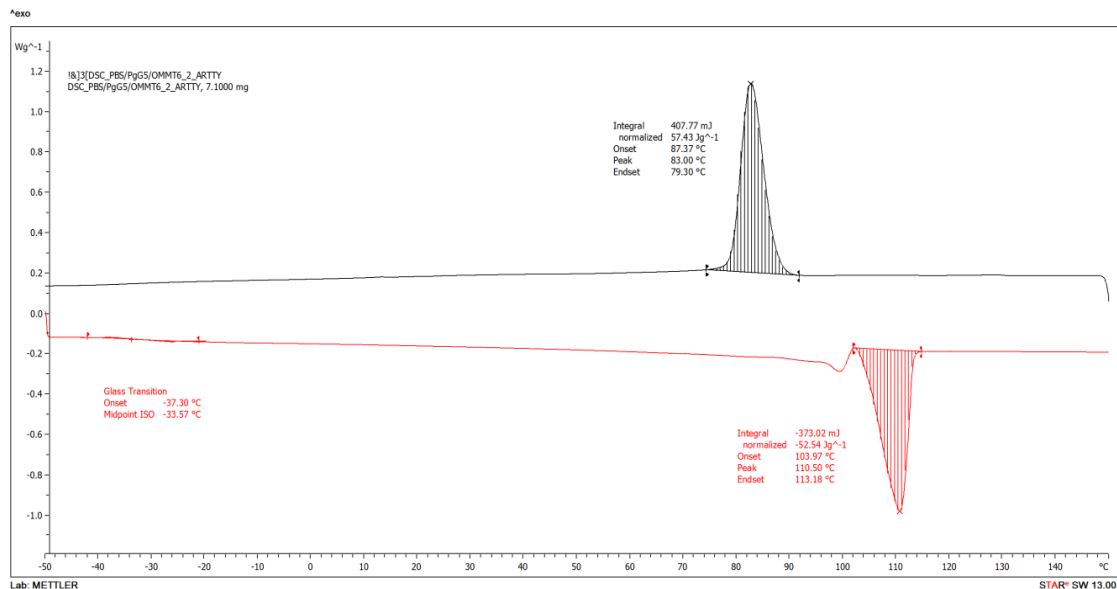
รูปที่ จ-17 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/O6

18. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเป็นสารค้ำควที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকเลอีในอัตราส่วน 100:3:6 phr



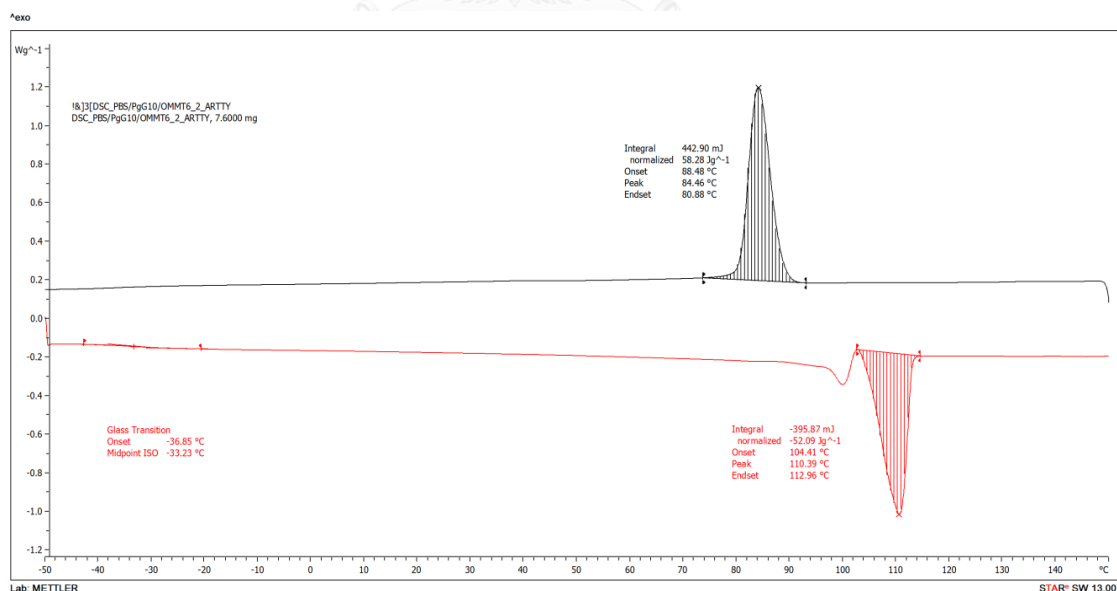
รูปที่ จ-18 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG3/O6

19. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:6 phr



รูปที่ จ-19 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG5/O6

20. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:10:6 phr

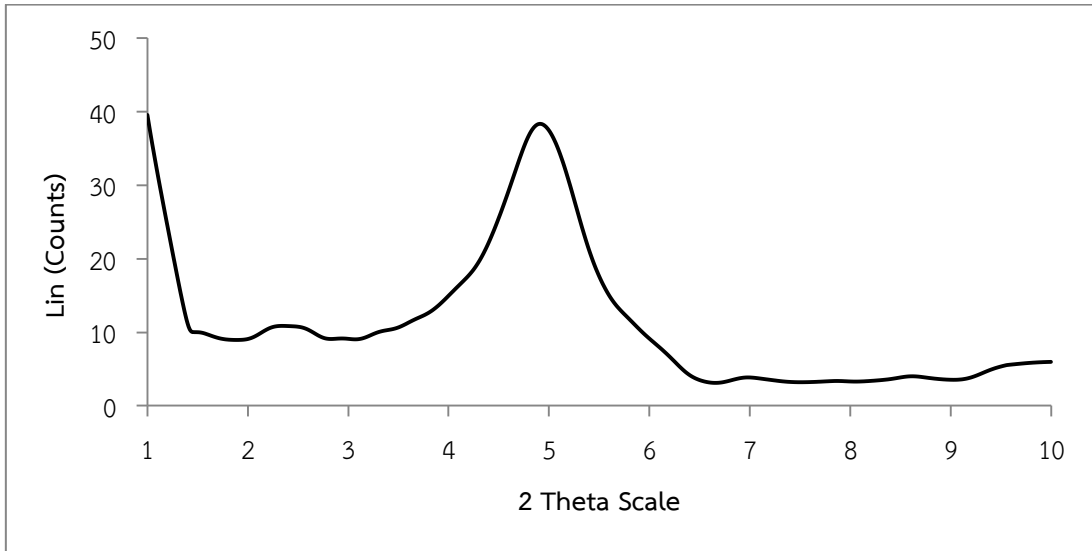


รูปที่ จ-20 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS/PgG10/O6

ภาคผนวก ฉ

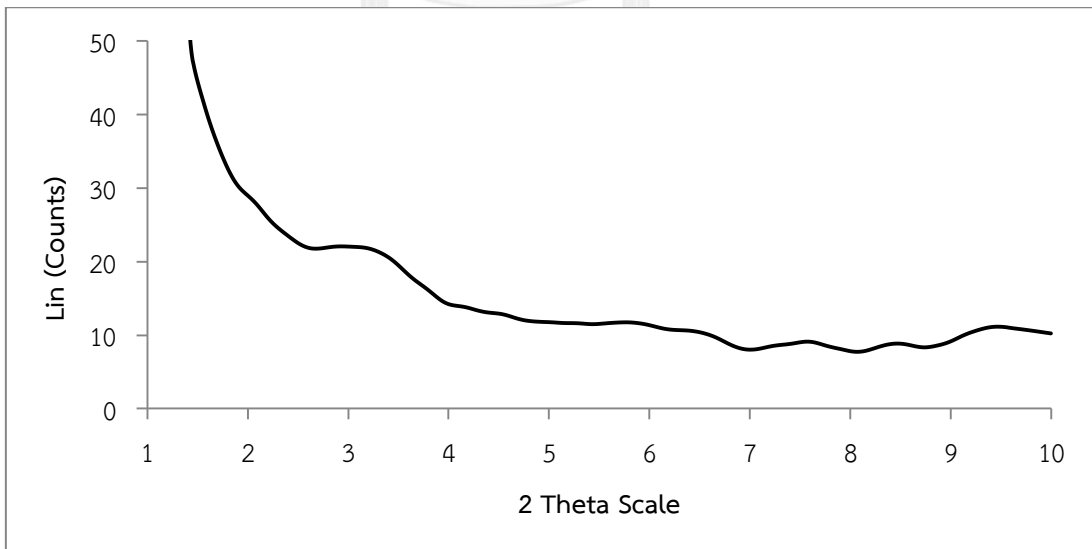
XRD pattern ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

1. ออร์แกโนเคลย์



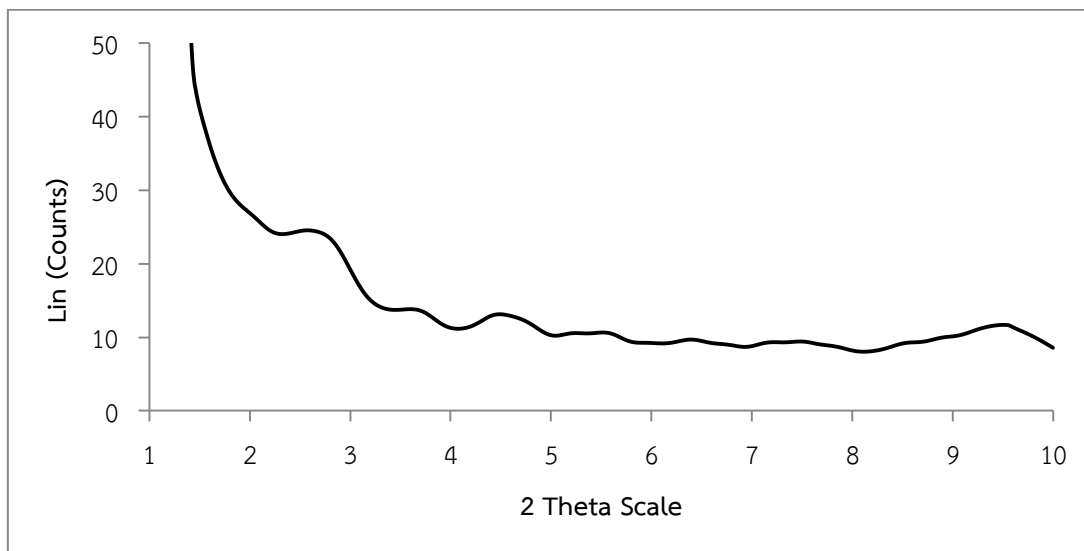
รูปที่ ฉ-1 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของออร์แกโนเคลย์

2. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ในอัตราส่วน 100:0.5 phr



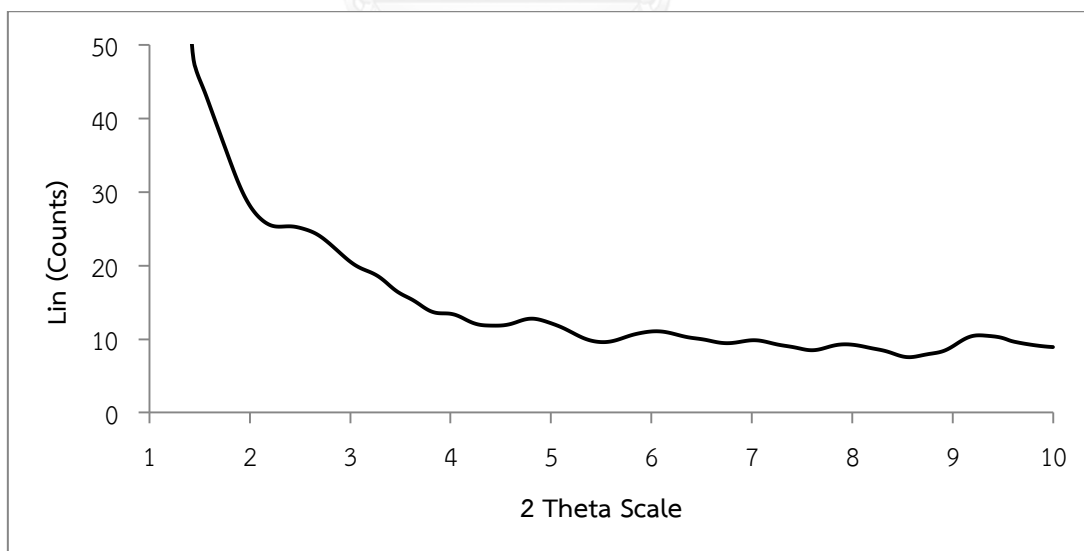
รูปที่ ฉ-2 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ PBS/O0.5

3. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:3:0.5 phr



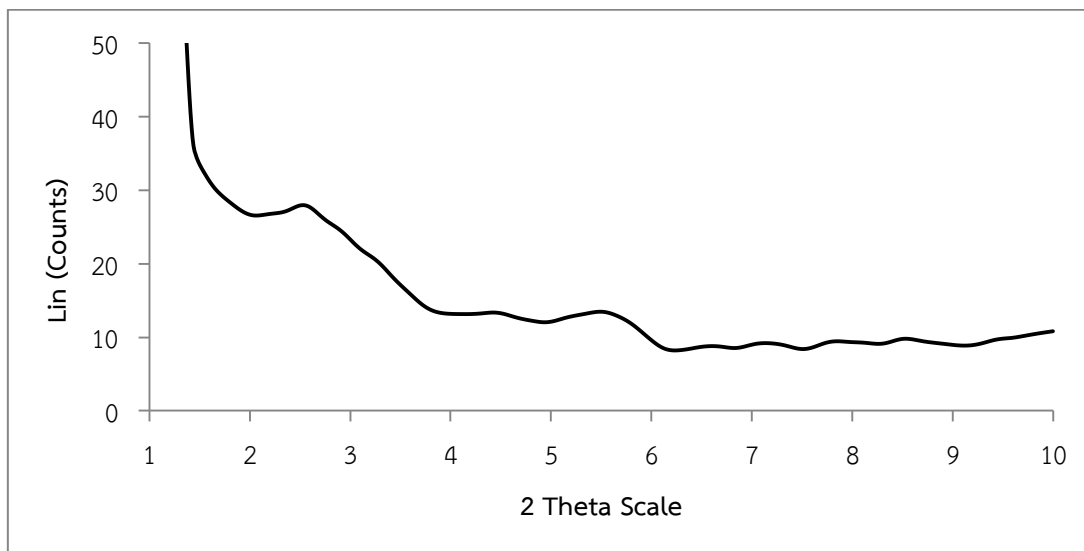
รูปที่ ๓-3 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG3/O0.5

4. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนোকัลย์ในอัตราส่วน 100:5:0.5 phr



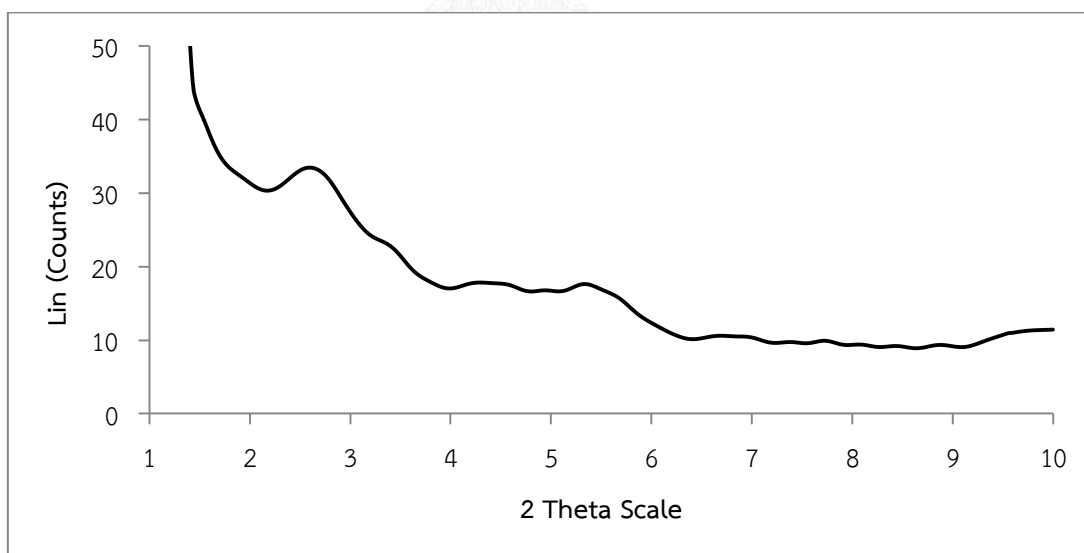
รูปที่ ๓-4 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG5/O0.5

5. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:10:0.5 phr



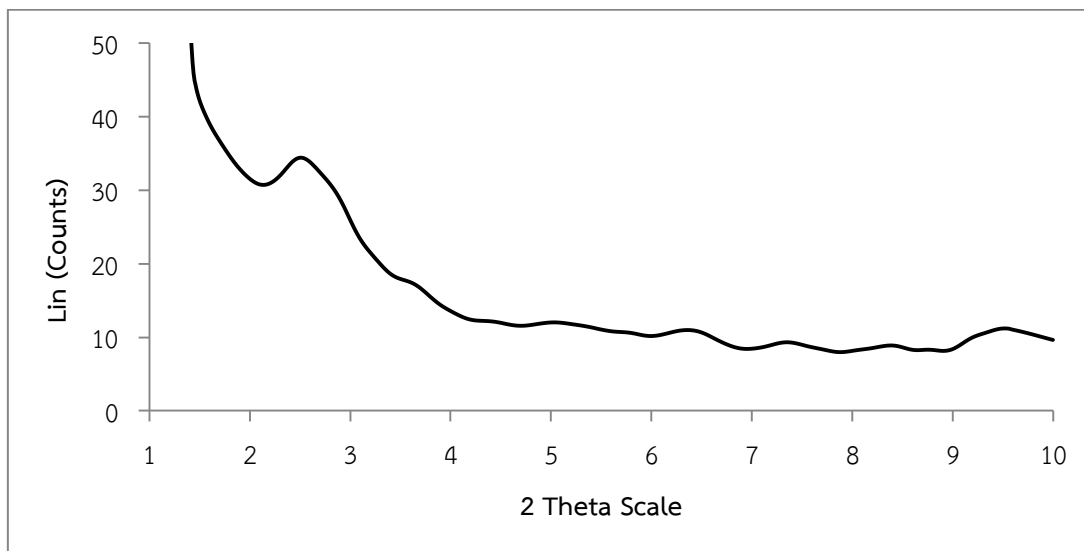
รูปที่ ๕-5 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ PBS/PgG10/O0.5

6. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:1 phr



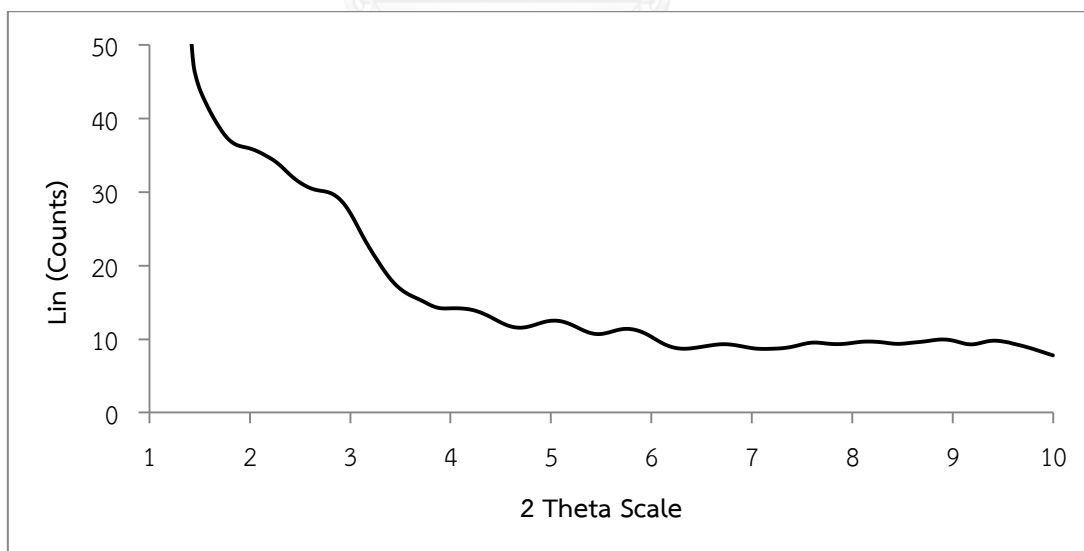
รูปที่ ๕-6 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ PBS/O1

7. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:3:1 phr



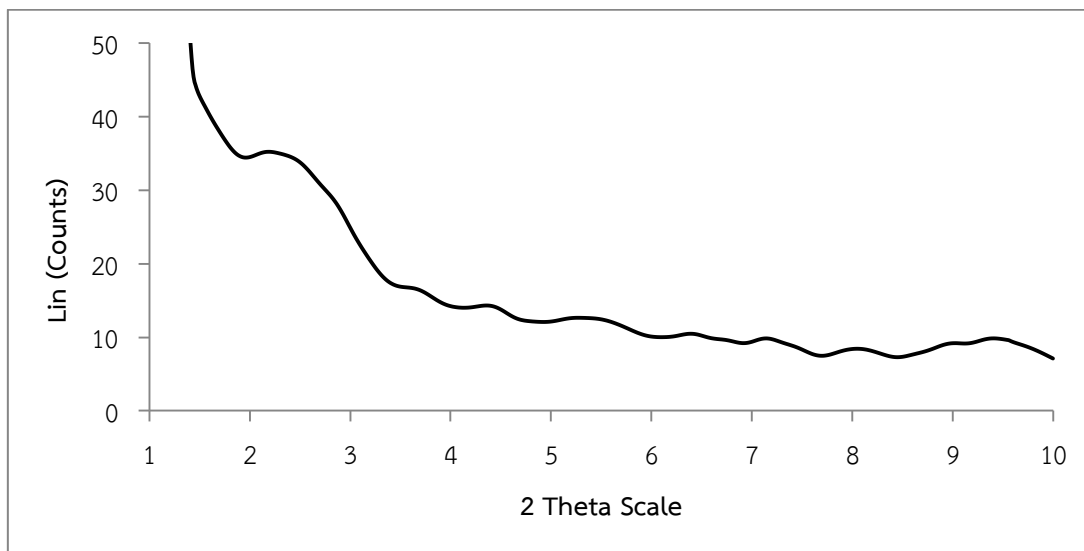
รูปที่ ๗-7 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG3/O1

8. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:5:1 phr



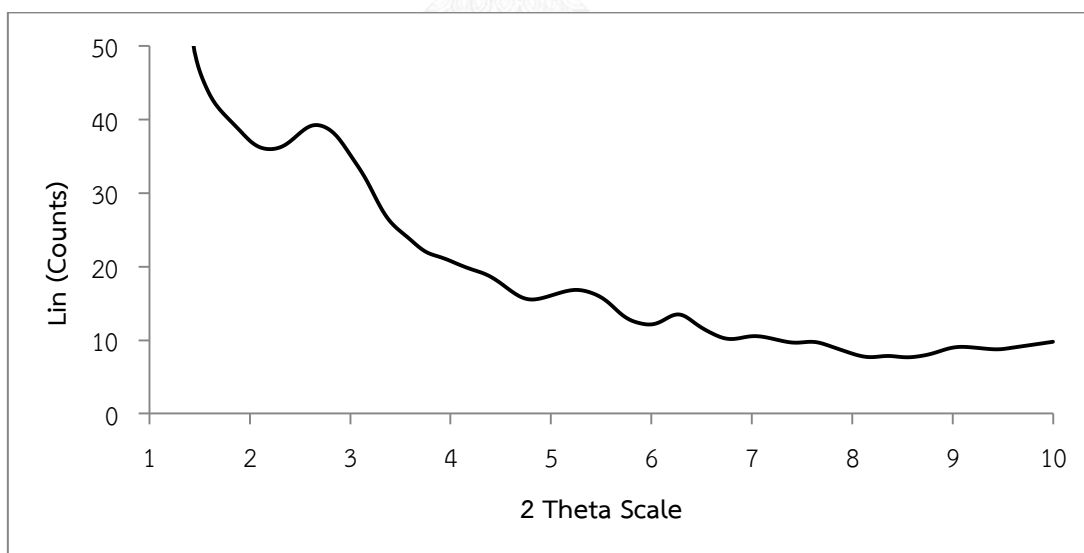
รูปที่ ๗-8 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG5/O1

9. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:10:1 phr



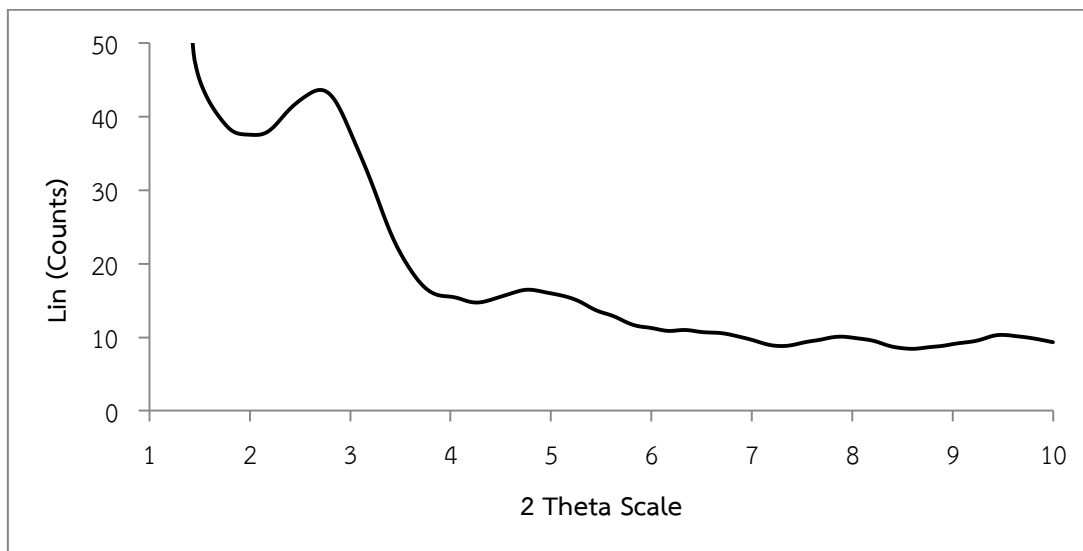
รูปที่ ๙-9 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG10/O1

10. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:2 phr



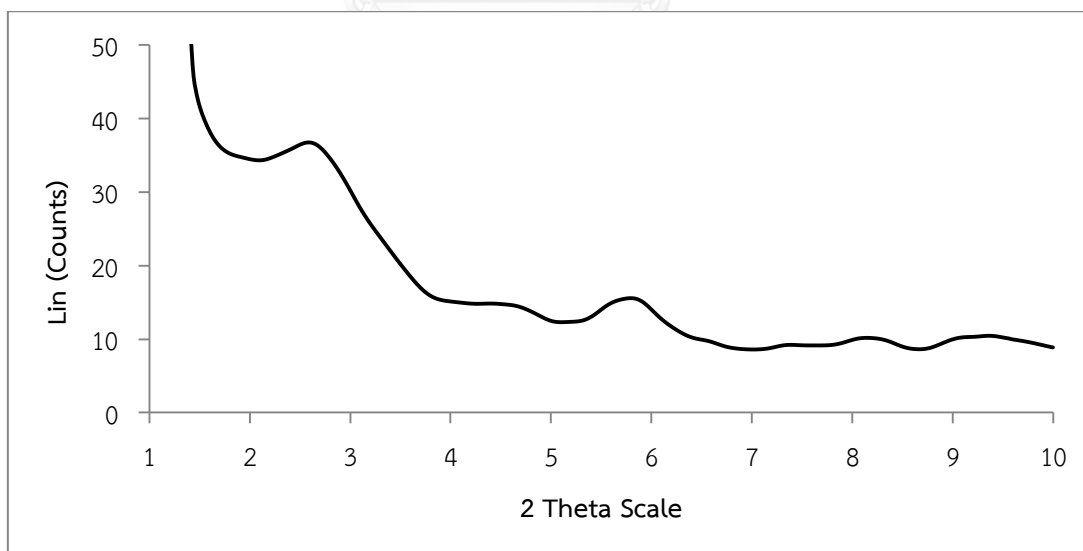
รูปที่ ๙-10 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/O2

11. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอเคลย์ในอัตราส่วน 100:3:2 phr



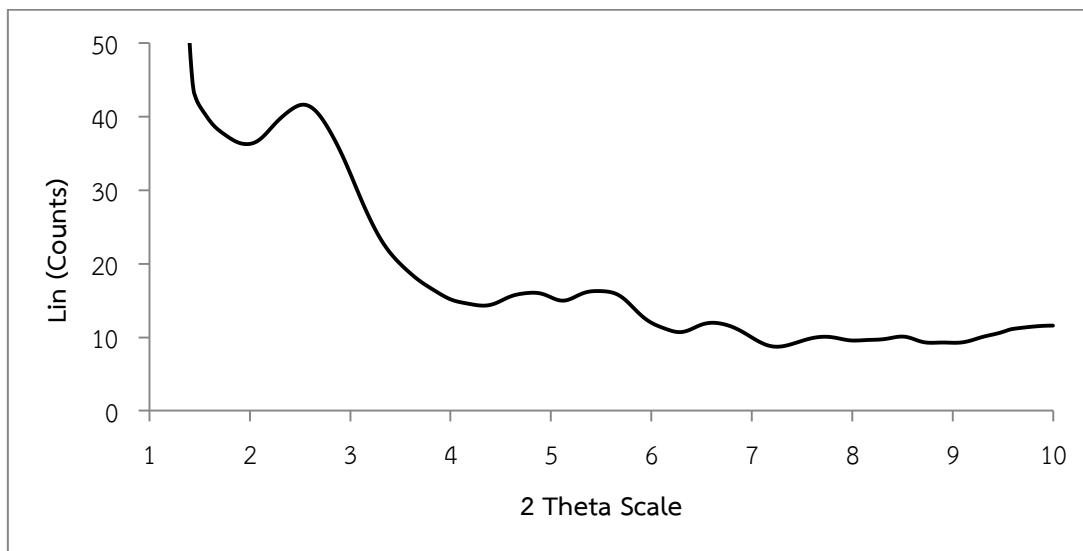
รูปที่ ฉ-11 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG3/O2

12. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนโอเคลย์ในอัตราส่วน 100:5:2 phr



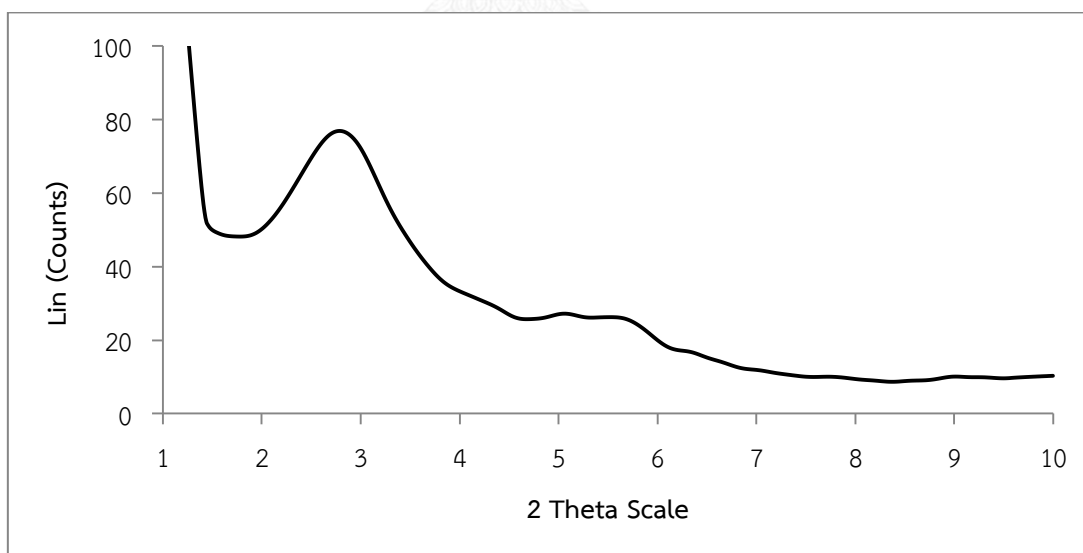
รูปที่ ฉ-12 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG5/O2

13. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:10:2 phr



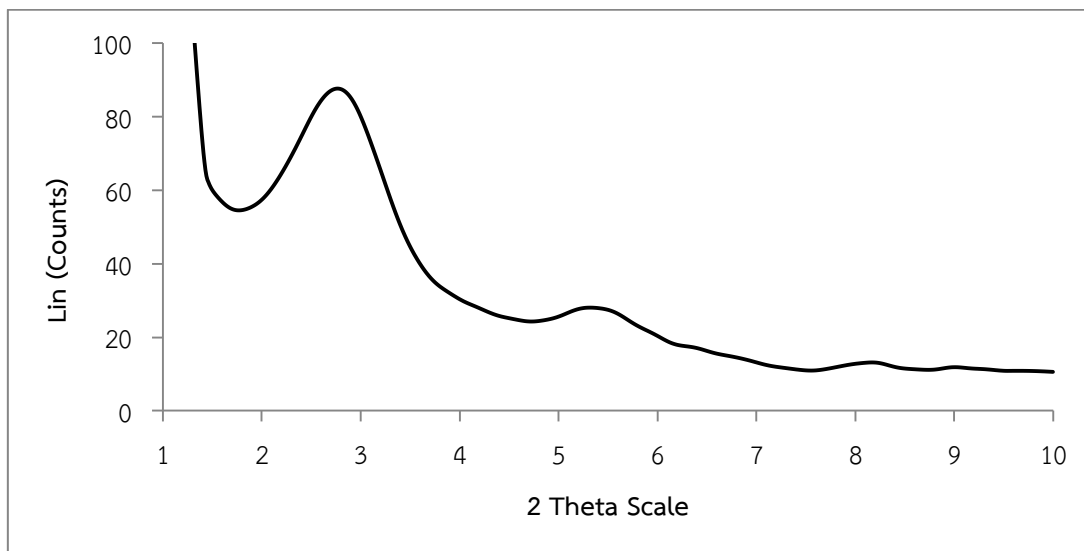
รูปที่ ฉ-13 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG10/O2

14. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:6 phr



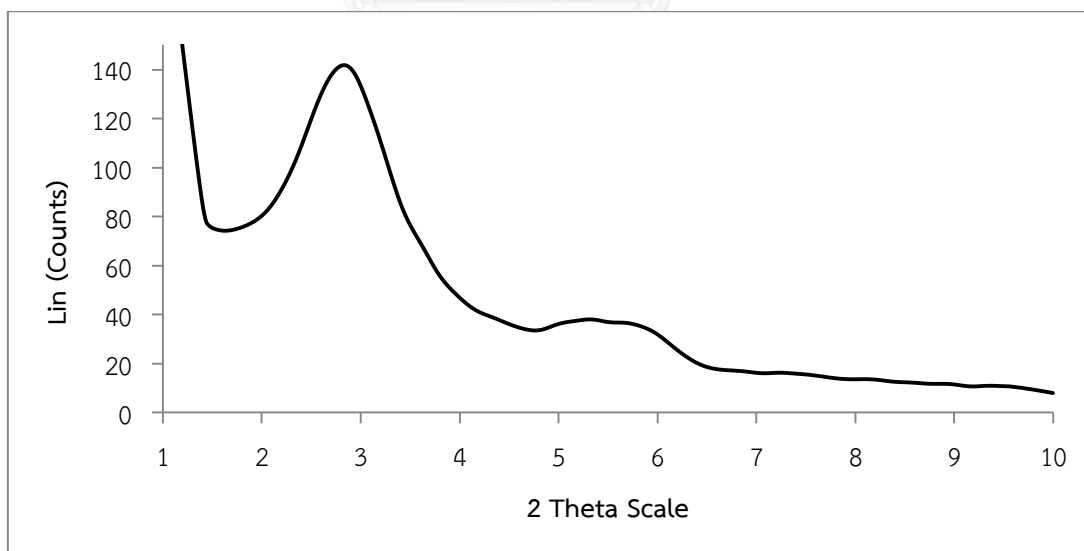
รูปที่ ฉ-14 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/O6

15. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:3:6 phr



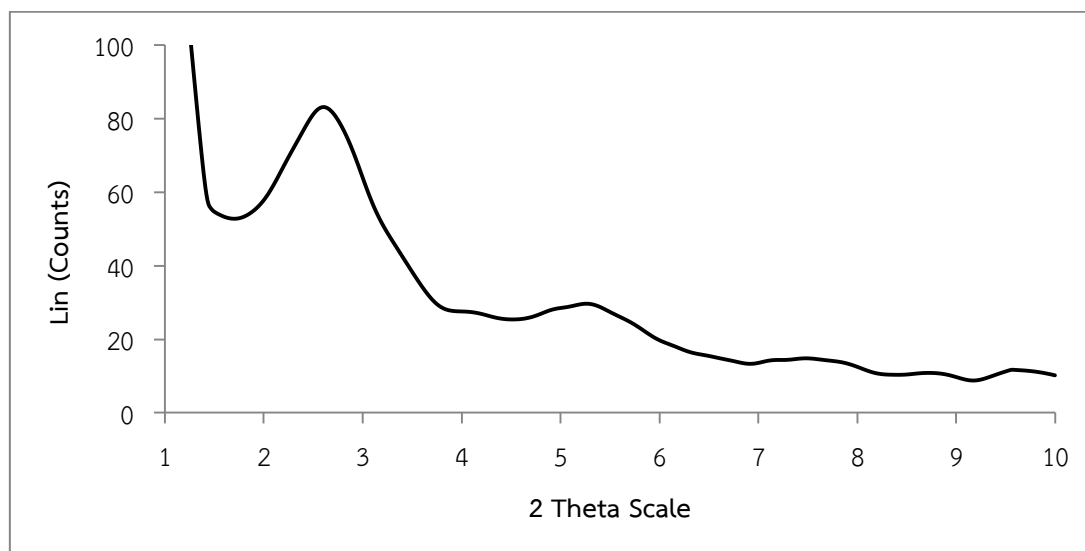
รูปที่ ๑-15 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ PBS/PgG3/O6

16. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:5:6 phr

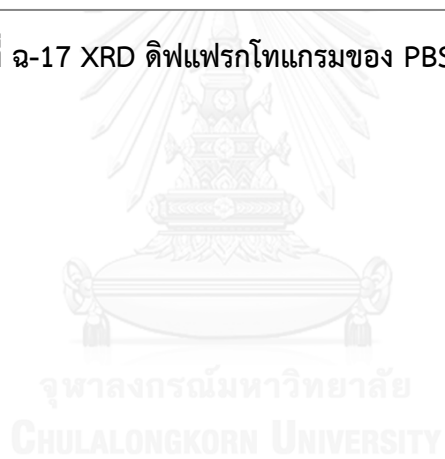


รูปที่ ๑-16 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ PBS/PgG5/O6

17. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดีลเมทาคริเลต เป็นสารคู่ควบที่เสริมแรงด้วยออร์แกนอเคลย์ในอัตราส่วน 100:10:6 phr



รูปที่ ๑-17 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ PBS/PgG10/O6



ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25

ตาราง ข-1-1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความทนแรงดึง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.262
2	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000
9	0.262	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-

ตาราง ข-1-2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่ามอดุลัสของยัง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	0.601	0.867	0.001	0.001	0.018	0.000	0.000	0.000
2	0.601	-	0.722	0.005	0.004	0.058	0.000	0.000	0.000
3	0.867	0.722	-	0.002	0.001	0.027	0.000	0.000	0.000
4	0.001	0.005	0.002	-	0.946	0.290	0.000	0.000	0.000
5	0.001	0.004	0.001	0.946	-	0.261	0.000	0.000	0.000
6	0.018	0.058	0.027	0.290	0.261	-	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.759	0.004
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.759	-	0.002
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.002	-

ตาราง ข-1-3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	0.977	0.000	0.003	0.000	0.000	0.091	0.000	0.001
2	0.977	-	0.000	0.004	0.000	0.000	0.086	0.000	0.001
3	0.000	0.000	-	0.000	0.171	0.236	0.000	0.000	0.000
4	0.003	0.004	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.002	0.589
5	0.000	0.000	0.171	0.000	-	0.848	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.236	0.000	0.848	-	0.000	0.000	0.000
7	0.091	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-	0.007
9	0.001	0.001	0.000	0.589	0.000	0.000	0.000	0.007	-

ตาราง ข-2-5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความทนแรงกระแทก

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	-	0.071	0.024	0.081	0.650	0.028	0.000	0.050	0.051	0.001	0.000	0.580	0.000	0.000	0.168	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.071	-	0.641	0.951	0.025	0.683	0.000	0.870	0.878	0.082	0.000	0.206	0.005	0.003	0.662	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.024	0.641	-	0.597	0.007	0.954	0.000	0.761	0.754	0.199	0.000	0.085	0.017	0.011	0.000	0.367	0.000	0.000	0.000
4	0.081	0.951	0.597	-	0.029	0.638	0.000	0.822	0.830	0.072	0.000	0.229	0.004	0.002	0.000	0.707	0.000	0.000	0.000
5	0.650	0.025	0.007	0.029	-	0.009	0.000	0.016	0.017	0.000	0.000	0.315	0.000	0.000	0.068	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.028	0.683	0.954	0.638	0.009	-	0.000	0.806	0.798	0.180	0.000	0.096	0.014	0.009	0.000	0.398	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.424	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.050	0.870	0.761	0.822	0.016	0.806	0.000	-	0.992	0.113	0.000	0.154	0.007	0.005	0.000	0.548	0.000	0.000	0.000
9	0.051	0.878	0.754	0.830	0.017	0.798	0.000	0.992	-	0.111	0.000	0.157	0.007	0.005	0.000	0.555	0.000	0.000	0.000
10	0.001	0.082	0.199	0.072	0.000	0.180	0.000	0.113	0.111	-	0.000	0.003	0.255	0.195	0.000	0.030	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.424	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.580	0.206	0.085	0.229	0.315	0.096	0.000	0.154	0.157	0.003	0.000	-	0.000	0.000	0.406	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.005	0.017	0.004	0.000	0.014	0.000	0.007	0.007	0.255	0.000	0.000	-	0.874	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.003	0.011	0.002	0.000	0.009	0.000	0.005	0.005	0.195	0.000	0.000	0.874	-	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.168	0.662	0.367	0.707	0.068	0.398	0.000	0.548	0.555	0.030	0.000	0.406	0.001	0.001	0.000	-	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	0.245	0.268
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.245	-	0.555
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.268	0.955	-	0.625
20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.534	0.586	0.625	-



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววนาลี ตันศิริ เกิดเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 ต่อมาเข้าทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในปี 2552 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น เมื่อปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลาย ปีการศึกษา 2557

โดยมีผลงานทางวิชาการ ดังนี้

1. Tansiri, V.; Potiyaraj, P., Compatibilization Efficiency of Reactively Modified Poly(butylene succinate) as a Compatibilizer for Poly(butylene succinate) Composites. *Advanced Materials Research* 2015, 1119, 288-291.

2. V. Tansiri & P. Potiyaraj, Reactively modified poly(butylene succinate) as a compatibilizer for PBS composites. (Accepted)