

สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์คอมพอสิต



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
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/MICROCRYSTALLINE CELLULOSE/
GRAPHENE OXIDE COMPOSITES

Miss Sunisa Wangpunya



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน เซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์คอมพอสิต
โดย	นางสาวสุนิสา หวังปัญญา
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.นิภาพรรณ โสติยานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.นิภาพรรณ โสติยานนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

สุนิสา หวังปัญญา : สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์คอมพอสิต (PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/MICROCRYSTALLINE CELLULOSE/ GRAPHENE OXIDE COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.นิภาพรรณ โสถถิยานนท์, 129 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการดูดซึมน้ำและสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้เป็นตัวเติม สำหรับแกรฟีนออกไซด์นั้น สังเคราะห์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีของฮัมเมอร์ จากสเปกตรัมของฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของแกรฟีนออกไซด์ พบพีกที่แสดงหมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และหมู่อีพ็อกซี ระยะห่างระหว่างระนาบของแกรฟีนออกไซด์มากกว่าแกรไฟต์ फिल्मพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์เตรียมโดยใช้การผสมที่ใช้ตัวทำละลายตามด้วยการกดอัดด้วยความร้อน ซึ่งฟิล์มคอมพอสิตถูกขึ้นรูปใน 2 ภาวะ สำหรับภาวะแรกกำหนดให้ปริมาณของแกรฟีนออกไซด์คงที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีการเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก ส่วนอีกภาวะกำหนดให้ปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคงที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณของแกรฟีนออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 0-3 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติทางความร้อน สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ และการย่อยสลายด้วยเบส จากการศึกษาพบว่า การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์มีผลน้อยมากต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ยังกระจายตัวดีในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ สำหรับสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มดังกล่าวถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ อย่างไรก็ตามการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ความทนแรงดึง ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด และความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มลดลง แต่การเติมแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อยทำให้ความทนแรงดึง ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงฉีกขาดลดลง สำหรับการดูดซึมน้ำและการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดีขึ้นเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวของฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการเติมในปริมาณมาก

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5872077323 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLY(BUTYLENE SUCCINATE), MICROCRYSTALLINE CELLULOSE, GRAPHENE OXIDE

SUNISA WANGPUNYA: PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/MICROCRYSTALLINE CELLULOSE/ GRAPHENE OXIDE COMPOSITES. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., CO-ADVISOR: NIPHAPHUN SOATTHIYANON, Ph.D., 129 pp.

The main purpose of this research was to improve the water absorption and the mechanical properties of the poly(butylene succinate) (PBS) by adding microcrystalline cellulose (MCC) and graphene oxide (GO) as a filler. For the GO used, it was synthesized by using a Hummers' method. According to the Fourier transformed infrared (FTIR) spectrum of the GO, the absorption peaks represent the functional groups including hydroxyl, carbonyl and epoxy groups. The D-spacing of the GO was larger than that of graphite. The neat PBS film and the PBS composite films incorporated with the MCC and the GO were prepared using solvent mixing followed by hot pressing. The composite films were fabricated with 2 conditions. For the first condition, the GO content was fixed at 1 wt%, whereas the MCC contents were varied from 0-20 wt%. Another condition was that the MCC content was fixed at 5 wt%, whereas the GO contents were varied from 0-3 wt%. The thermal properties, the morphology, the mechanical properties, the water absorption and the base hydrolytic degradation of all types of the films were examined. It was found that the MCC and GO loadings marginally affected the thermal properties of the PBS film. In addition, the MCC and the GO were well dispersed in the PBS matrix. For the mechanical properties of the PBS film, its Young's modulus was improved by the MCC and GO additions. However, its tensile strength, the elongation at break and the tear strength decreased when the MCC was loaded. Low GO content loading improved the tensile strength and the elongation at break. The water absorption and the base hydrolytic degradation of the PBS film were enhanced by the addition of the MCC and the GO. Additionally, these two properties of the composite films increased with increased the filler contents, particularly for the high quantities.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer
Science

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

2. ดร.นิภาพรรณ โสทธิยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนการเอาใจใส่ดูแล และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

3. ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิถรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ และรองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ทำวิจัย

6. รุ่นพี่ เพื่อน และบุคคลากร ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่สาว ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสรรค์สร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	3
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้แบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	3
2.1.1.1 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้.....	3
2.1.1.2 แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม.....	3
2.1.2 การย่อยสลายพลาสติก.....	4
2.1.2.1 การย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation).....	4
2.1.2.2 การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation).....	4
2.1.2.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation).....	4
2.1.2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis degradation).....	4
2.1.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation).....	5
2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	5

2.2.1 การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	5
2.2.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	6
2.2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	6
2.2.3.1 การย่อยสลายแบบไม่ใช้เอนไซม์.....	6
2.2.3.2 การย่อยสลายแบบใช้เอนไซม์.....	7
2.2.3.3 การย่อยสลายตามธรรมชาติ.....	7
2.2.4 การใช้งานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	7
2.2.4.1 ทางด้านเกษตรกรรมและการประมง.....	7
2.2.4.2 ทางด้านภาชนะบรรจุภัณฑ์.....	8
2.2.4.3 ทางด้านการแพทย์.....	8
2.2.4.4 ทางด้านอื่น ๆ.....	8
2.3 แกร์ฟีนออกไซด์.....	8
2.3.1 วิธีการสังเคราะห์แกร์ฟีนออกไซด์.....	11
2.3.2 สมบัติของแกร์ฟีนออกไซด์.....	12
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	12
2.4 ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส.....	13
2.4.1 การสังเคราะห์ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส.....	14
2.4.1.1 Reactive extrusion.....	14
2.4.1.2 Stream explosion.....	14
2.4.1.3 Acid hydrolysis.....	14
2.4.2 สมบัติของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส.....	14
2.4.3 การใช้งานไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส.....	15
2.5 วัสดุคอมพอสิต.....	15

2.5.1 เฟสหลัก.....	15
2.5.1.1 พอลิเมอร์ (polymer).....	16
2.5.1.2 เซรามิก (ceramic).....	16
2.5.1.3 โลหะ (metal)	16
2.5.2 เฟสกระจาย.....	16
2.5.2.1 ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทอนุภาค	16
2.5.2.2 ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทเส้นใย	17
2.5.2.3 ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทโครงสร้าง	17
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต.....	18
2.5.4 การรับแรงของวัสดุคอมพอสิต	19
2.6 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน	20
2.6.1 การผสม.....	20
2.6.2 การขึ้นรูป	20
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	26
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย.....	26
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
3.4.1 การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์.....	28
3.4.1.1 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์.....	28
3.4.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์	29

3.4.2 การเตรียมคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีน ออกไซด์	32
3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน.....	33
3.4.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์.....	34
3.4.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี	34
3.4.4.2 การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก	35
3.4.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัล ลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์	36
3.4.5.1 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของผงคอมพอสิต.....	36
3.4.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอมพอสิตภายใต้ความร้อน	37
3.4.5.3 การทดสอบความทนแรงดึง	37
3.4.5.4 การทดสอบความทนแรงฉีกขาด	38
3.4.5.5 การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยา.....	39
3.4.5.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ	40
3.4.5.7 การทดสอบการย่อยสลายด้วยเบส	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	41
4.1 สมบัติของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์	41
4.1.1 หมู่ฟังก์ชันทางเคมี.....	41
4.1.2 การจัดเรียงตัวของผลึก.....	42
4.2 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีน เซลลูโลส (PGM) เมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์คงที่ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก).....	43
4.2.1 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PGM	43
4.2.1.1 อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกและปริมาณผลึก.....	43
4.2.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน.....	46

4.2.2	สัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต PGM.....	48
4.2.3	สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิต PGM.....	50
4.2.3.1	ความทนแรงดึง (tensile strength)	50
4.2.3.2	ยังส์มอดุลัส (Young’s modulus).....	51
4.2.3.3	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break).....	52
4.2.3.4	ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)	53
4.2.4	สมบัติการดูดซึมน้ำของฟิล์มคอมพอสิต PGM.....	55
4.2.5	สมบัติการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิต PGM.....	56
4.3	สมบัติของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรฟีน ออกไซด์ (PMG) เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคงที่ (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก).....	58
4.3.1	สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PMG	58
4.3.1.1	อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกและปริมาณผลึก.....	58
4.3.1.2	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน.....	61
4.3.2	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต PMG	63
4.3.3	สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิต PMG.....	65
4.3.3.1	ความทนแรงดึง (tensile strength)	65
4.3.3.2	ยังส์มอดุลัส (Young’s modulus).....	66
4.3.3.3	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break).....	67
4.3.3.4	ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)	68
4.3.4	สมบัติการดูดซึมน้ำของฟิล์มคอมพอสิต PMG.....	70
4.3.5	สมบัติการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิต PMG.....	70
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1	สรุปผลการทดลอง	73

รายการอ้างอิง..... 76

ภาคผนวก ก DSC เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/
แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีน
ซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีน
ออกไซด์ 83

ภาคผนวก ข TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอสิตพอลิบิวทิลีน
ซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอ
ลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน
เซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์..... 90

ภาคผนวก ค สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกร
ฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิ
เนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีน
ออกไซด์ 97

ภาคผนวก ง การดูดซึมน้ำของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกร
ฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิ
เนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีน
ออกไซด์ 102

ภาคผนวก จ การย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัค
ซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิ
บิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/
แกรฟีนออกไซด์..... 103

ภาคผนวก ฉ T-test และ ANOVA ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับสมบัติเชิงกล การดูดซึมน
้ำ และการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิ
เนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิว
ทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกร
ฟีนออกไซด์..... 104

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 129

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	5
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	5
รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์กรดซัคซินิกและ1,4-บิวเทนไดออลจากวัตถุดิบธรรมชาติ	6
รูปที่ 2.4 กระบวนการเตรียมกรดซัคซินิกและ1,4-บิวเทนไดออลจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ (Lerf et al., 1998).....	10
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดแกรฟีนออกไซด์ (Dimiev and Tour, 2014).....	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส (Harane et al., 2014).....	13
รูปที่ 2.8 การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสจากเส้นใยเซลลูโลส (Trache et al., 2016).....	13
รูปที่ 2.9 แผนผังจำแนกลักษณะของวัสดุเสริมแรงที่เป็นเฟสกระจายในวัสดุคอมพอสิต (Lindeke, 2017)	17
รูปที่ 2.10 (ก) โครงสร้างลามิना (ข) โครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช (Lindeke, 2017).....	18
รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสกระจายในเฟสหลัก (Lindeke, 2017).....	18
รูปที่ 2.12 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงดึง (Gurit, 2017)	19
รูปที่ 2.13 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงกดอัด (Gurit, 2017).....	19
รูปที่ 2.14 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงเฉือน (Gurit, 2017).....	19
รูปที่ 2.15 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงดัด (Gurit, 2017).....	20
รูปที่ 3.1 เครื่องปั่นเหวี่ยงยี่ห้อ Med inter รุ่น Senova TD5M-WS.....	29
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์.....	30
รูปที่ 3.3 เครื่องอัลตราโซนิกยี่ห้อ Wisd Laboratory Instrument รุ่น WUC-D06H.....	31
รูปที่ 3.4 (ก) สารละลายแกรฟีนออกไซด์ (ข) ตะกอนแกรไฟต์และแกรไฟต์ออกไซด์ที่ไม่เกิดการ ลอกเป็นแกรฟีนออกไซด์	31
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์.....	31

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิต.....	32
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนยี่ห้อ Labtech Engineering รุ่น LP20-b.....	34
รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo Scientetific รุ่น Nicolet 6700	35
รูปที่ 3.9 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance.....	35
รูปที่ 3.10 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR ^e	36
รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ยี่ห้อ Netzch รุ่น TG 209 F3 Tarsus	37
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบบดเนกประสงค์ ยี่ห้อ Hounfield รุ่น H10KM.....	38
รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดึง.....	38
รูปที่ 3.14 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงฉีกขาด.....	39
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500.....	39
รูปที่ 3.16 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	40
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ (GO).....	41
รูปที่ 4.2 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ (Jang et al., 2014)	41
รูปที่ 4.3 เอกซเรย์สเปกตรัมของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ (GO)	42
รูปที่ 4.4 ระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอนของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ (Jang et al., 2014)	43
รูปที่ 4.5 รูปที่ 4.8DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) และคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) ขณะให้ความร้อนครั้งที่สอง.....	43
รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) และคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) ขณะลดอุณหภูมิ	44

รูปที่ 4.7 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/ MCC ที่มี ปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....46

รูปที่ 4.8 DTG เทอร์โมแกรม ของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มี ปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....47

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของภาคตัดขวางของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) ที่ผ่านการหักและสัณฐานวิทยาของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (MCC).....49

รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....51

รูปที่ 4.11 ยั่งสัมมอดูลัสของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่ มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....52

รูปที่ 4.12 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/ MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....53

รูปที่ 4.13 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/ MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....54

รูปที่ 4.14 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วันของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)55

รูปที่ 4.15 น้ำหนักของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มี ปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 วัน.....57

รูปที่ 4.16 ลักษณะฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 4 วัน.....	58
รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) ขณะให้ความร้อนครั้งที่สอง	59
รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) ขณะลดอุณหภูมิ	59
รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....	61
รูปที่ 4.20 DTG เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....	62
รูปที่ 4.21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของภาคตัดขวางแผ่นฟิล์มที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) ที่ผ่านการหัก.....	64
รูปที่ 4.22 ความทนแรงดึงของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....	66
รูปที่ 4.23 ยังสัมมอดูลัสของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....	67
รูปที่ 4.24 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....	68

- รูปที่ 4.25 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....69
- รูปที่ 4.26 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วันของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....70
- รูปที่ 4.27 ลักษณะแผ่นฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน.....71



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิไวนิลพิลลินซึกซิเนต แกรฟีนออกไซด์ และไมโครคริสตัล ลีนเซลลูโลส โดยกำหนดให้น้ำหนักของแกรฟีนออกไซด์คงที่	33
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิไวนิลพิลลินซึกซิเนต แกรฟีนออกไซด์และไมโครคริสตัล ลีนเซลลูโลส โดยกำหนดให้น้ำหนักของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคงที่.....	33
ตารางที่ 3.5 ภาวะที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน.....	34
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ที่ปรากฏบนอินฟราเรดสเปกตรัม	42
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของ PBS (P) และคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....	44
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของ PBS (P) คอมพอ สิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดย น้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....	47
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของของฟิล์ม PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....	54
ตารางที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ).....	56
ตารางที่ 4.6 น้ำหนักที่เหลือของแผ่นฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/ MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 4 วัน.....	57

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....60

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....62

ตารางที่ 4.9 สมบัติด้านแรงดึงของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ).....69

ตารางที่ 4.10 น้ำหนักที่เหลือของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 4 วัน.....72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้นทั้งจากการอุปโภคและบริโภค กลายเป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบัน โดยเฉพาะขยะที่เกิดจากพลาสติกกำลังเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลาสติกที่ใช้ในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบปิโตรเลียม นอกจากแหล่งวัตถุดิบดังกล่าวมีแนวโน้มจะเกิดการขาดแคลนแล้ว พลาสติกเหล่านี้มักใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นระยะเวลานานหลายพันปี ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic) เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนิยมคือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหรือพีบีเอส (poly(butylene succinate), PBS) เป็นพอลิเมอร์ที่นอกจากจะย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้ภาวะที่เหมาะสมแล้ว ปัจจุบันพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังสังเคราะห์ได้จากแหล่งวัตถุดิบทางธรรมชาติที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (renewable resource) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเอสเทอร์สายโซ่ตรงที่เกิดจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และกรดซัคซินิก (succinic acid) ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถทนความร้อน ทนสารเคมีได้ดี ขึ้นรูปง่าย มีความยืดหยุ่นสูง และมีสมบัติเชิงกลที่ดีเหมาะแก่การนำไปผลิตเป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหารหรือใช้ในทางการเกษตร แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงจึงมีการเรียงตัวกันของสายโซ่อย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดูดซึมน้ำได้น้อย ทำให้อัตราการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์โดยมีน้ำเป็นตัวกลางเกิดได้ช้า ดังนั้นจึงมีการใช้เซลลูโลสเป็นตัวเติมเพื่อปรับปรุงการดูดซึมน้ำ เนื่องจากเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการดูดซึมน้ำเข้าสู่พอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้เซลลูโลสยังเป็นแหล่งอาหารชั้นดีให้แก่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้เซลลูโลสสามารถช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่การเติมเซลลูโลสสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้น้อย ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ชนิดนี้ลดลง ดังนั้นจึงมีการเติมแกรฟีนออกไซด์เพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรง เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์สามารถให้ความแข็งแรงอันเกิดจากพันธะของคาร์บอนอะตอมที่เรียงตัวกันเป็นระนาบที่เป็นระเบียบ ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันบนแกรฟีนออกไซด์สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ ส่งผลให้ตัวเติมทั้งสองสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและทำหน้าที่เสริมแรงได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์

ปรับปรุงสมบัติการดูดซึมน้ำและสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยการใช้ไมโครคริสตัล-
ลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์เป็นตัวเติม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้

ได้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์คอมพอสิตที่สามารถดูดซึม-
น้ำได้ดีขึ้น ทำให้อยู่สบายทางชีวภาพได้ง่ายและมีสมบัติเชิงกลเหมาะสมกับการใช้งานทางด้านการ
เกษตร



บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกย่อยสลายได้ (compostable plastic) คือพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้ภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ จึงทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น สามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ซึ่งวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (Leejarkpai, 2017)

2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้แบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์

พลาสติกย่อยสลายได้สามารถแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งแหล่งวัตถุดิบดังกล่าวมี 2 แหล่ง คือ แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ และแหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม (Liwthaisong, 2013)

2.1.1.1 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้

แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวสาลี หรือมันฝรั่ง ซึ่งในแต่ละประเทศจะใช้แตกต่างกัน ประเทศอเมริกาใช้พืชผลทางการเกษตรหลักคือ ข้าวโพด กลุ่มประเทศในสหภาพยุโรปมีการใช้หางนม (whey permeates) นอกจากนี้ยังมีการค้นคว้าวัตถุดิบอื่นนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล เช่น เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลส ที่อยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้ พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคานอเอต (polyhydroxy alkanate) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิไตรเมทิลีนเทเลฟทาเลต (poly(trimethylene terephthalate)) พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเลฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate)) พอลิเอไมด์ (polyamide) และพอลิยูรีเทน (polyurethane) เป็นต้น

2.1.1.2 แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม

แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และแฉะ เป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถทดแทนได้ กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิโพรพิลีน (polypropylene) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (poly(vinyl chloride)) เป็นต้น

2.1.2 การย่อยสลายพลาสติก

การย่อยสลายพอลิเมอร์สามารถแบ่งตามกลไกการย่อยเป็น 5 ประเภท (Sukkathitiyakul, 2017) ได้แก่

2.1.2.1 การย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation)

การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงไป หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี เมื่อพอลิเมอร์สัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่มีข้อเสียคือ การย่อยสลายแบบนี้จะไม่เกิดในบ่อฝังกลบขยะ เนื่องจากแสงยูวีจะส่องลงไปไม่ถึง หรือแม้กระทั่งพลาสติกที่มีหมึกหนาบบนพื้นผิวเพราะไม่มีการสัมผัสยูวีโดยตรง

2.1.2.2 การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกลมีการให้แรงกระทำแก่พอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์แตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

2.1.2.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทั้งนี้ความร้อนและแสงยูวีเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, ROOH) และแตกตัวต่อไปเป็นอนุมูลอิสระ $RO\cdot$ และ $OH\cdot$ แล้วเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

2.1.2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น พอลิเอสเทอร์ (polyester) พอลิแอนไฮไดรด์ (polyanhydride) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสมี 2 ประเภท คือ ประเภทที่ไม่ใช้แคตตาลิสต์ (non-catalytic hydrolysis) และประเภทที่ใช้แคตตาลิสต์ (catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทที่ใช้แคตตาลิสต์แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้แคตตาลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย มี 2 ชนิดคือแคตตาลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ (enzyme) ต่าง ๆ เช่น Depolymerase, Lipase, Esterase และ Glycohydrolase และแคตตาลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์เบส และกรดที่มีอยู่ในภาวะแวดล้อม ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

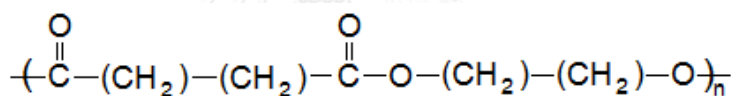
2.1.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation)

การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งมีการทำงาน 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ จุลินทรีย์จึงปล่อยเอนไซม์ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็ก จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยในขั้นตอนที่สอง และได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายคือพลังงานและสารประกอบขนาดเล็ก เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

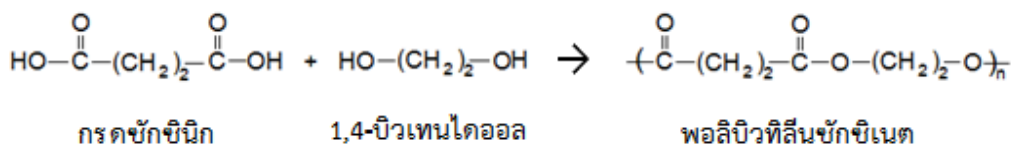
2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

2.2.1 การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจัดเป็นพอลิเอสเทอร์สายโซ่ตรง มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation polymerization) ของมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.2 (Paderni et al., 2014)

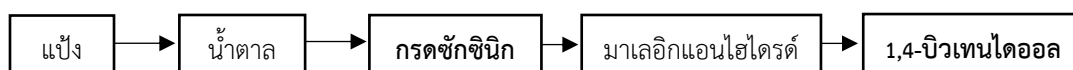


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

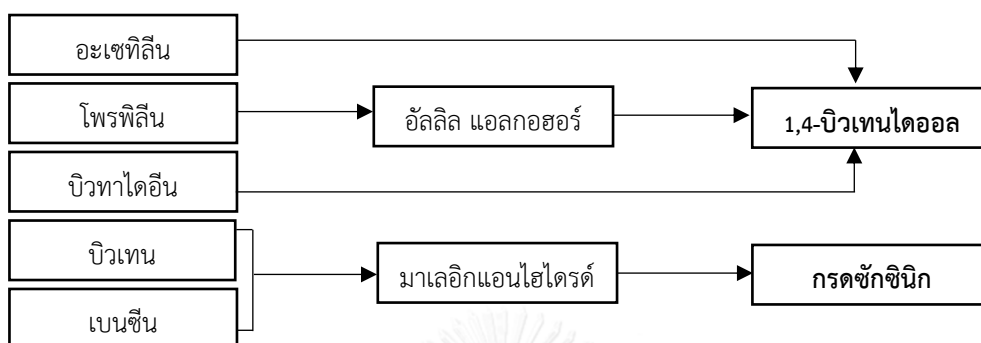


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

มอนอเมอร์ทั้งสองชนิดที่กล่าวข้างต้นสามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบธรรมชาติที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้และจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี ซึ่งวัตถุดิบจากธรรมชาติจะนำมาผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพ โดยเปลี่ยนแป้งไปเป็นน้ำตาล และน้ำตาลจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัคซินิก จากนั้นกรดซัคซินิกจะถูกเปลี่ยนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) แล้วจึงเปลี่ยนเป็น 1,4-บิวเทนไดออลต่อไป ดังรูปที่ 2.3 สำหรับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี เช่น อะเซทิลีน โพรพิลีน และ บิวทาไดอีน จะถูกเปลี่ยนเป็น 1,4-บิวเทนไดออล ส่วนบิวเทนและเบนซีนจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัคซินิก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์กรดซัคซินิกและ1,4-บิวเทนไดออลจากวัตถุดิบธรรมชาติ



รูปที่ 2.4 กระบวนการเตรียมกรดซัคซินิกและ1,4-บิวเทนไดออลจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี

2.2.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ซึ่งลักษณะทางกายภาพจะมีสีขาวขุ่น มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิด แต่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า นอกจากนี้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังสามารถทนความร้อน ทนสารเคมีได้ดี สามารถย่อยสลายได้ และที่สำคัญคือสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตประกอบด้วยหลายวิธี ได้แก่ การย่อยสลายแบบไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic hydrolytic degradation) การย่อยสลายแบบใช้เอนไซม์ (enzymatic hydrolytic degradation) และการย่อยสลายตามธรรมชาติ (environmental biodegradation) (Xu and Guo, 2010)

2.2.3.1 การย่อยสลายแบบไม่ใช้เอนไซม์

การย่อยสลายด้วยวิธีนี้มีปัจจัยที่สำคัญคือค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสิ่งแวดล้อม หากค่า pH มีค่าสูง จะส่งผลให้การย่อยดำเนินไปอย่างรวดเร็ว เช่น เมื่อแช่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไว้ในสารละลายที่มีค่า pH = 13 เป็นเวลา 9 วัน ทำให้น้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหายไปประมาณร้อยละ 3-8 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่แช่ในสารละลาย pH = 10.6 เป็นเวลา 27 วัน ทำให้น้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหายไปร้อยละ 23 และเมื่อแช่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในสารละลายที่มีค่า pH = 7.2 เป็นเวลา 9 สัปดาห์ พบว่าน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหายไปร้อยละ 10 (Li et

al., 2005) การย่อยสลายแบบไม่ใช้เอนไซม์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง และมีการตัดสายโซ่แบบสุ่ม (random chain scission) นอกจากนี้การย่อยสลายแบบไม่ใช้เอนไซม์ยังขึ้นอยู่กับประวัติทางความร้อน (thermal history) ของพอลิเมอร์ พบว่าส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) สามารถดูดซึมน้ำเข้าสู่พอลิเมอร์และส่งผลให้เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้เอนไซม์ได้เร็วกว่าส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) (Cho et al., 2001)

2.2.3.2 การย่อยสลายแบบใช้เอนไซม์

การย่อยสลายด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความมีขั้วและความไม่มีขั้วของสายโซ่หลัก และขึ้นอยู่กับปริมาณผลึก เมื่อลองเปรียบเทียบการย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบบเส้นใยและแบบฟิล์ม โดยนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทั้งสองแบบมาย่อยด้วยเอนไซม์ไลเปส (Lipase PB®) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และที่ pH = 6 นาน 2 สัปดาห์ พบว่าน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบบฟิล์มหายไปถึงร้อยละ 76 แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบบเส้นใยน้ำหนักหายไปเพียงแค่ร้อยละ 6 เท่านั้น เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบบเส้นใยมีปริมาณผลึกมากกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบบฟิล์ม แต่การย่อยสลายแบบใช้เอนไซม์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถย่อยสลายได้เพียงแค่ผิวหน้าของชิ้นงานเท่านั้น เมื่อย่อยแล้วเกิดผลิตภัณฑ์คือ 4-ไฮดรอกซีบิวทิลซัคซิเนต (4-hydroxybutyl succinate) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลที่เป็นมอนอเมอร์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต สาเหตุที่เอนไซม์ย่อยสลายได้แค่ผิวหน้าเนื่องจากเอนไซม์ไม่สามารถเคลื่อนเข้าสู่ภายในได้โดยเลือกย่อยเฉพาะส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้น ซึ่งการย่อยสลายแบบนี้ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (Taniguchi et al., 2002)

2.2.3.3 การย่อยสลายตามธรรมชาติ

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถย่อยสลายได้ในหลายภาวะ เช่น ในน้ำ (Kasuya et al., 1998) ในดิน (Suyama et al., 1998) และในโคลน (Ahn et al., 2001) เป็นต้น ทั้งนี้สมบัติของพอลิเมอร์และภาวะแวดล้อมไม่ว่าจะเป็น จุลินทรีย์ อุณหภูมิและความชื้น เป็นตัวแปรสำคัญในการย่อยสลายด้วยวิธีนี้

2.2.4 การใช้งานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การใช้งานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีหลายด้าน เช่น การใช้งานทางด้านเกษตรกรรมและการประมง ด้านภาชนะบรรจุภัณฑ์ ด้านการแพทย์และด้านอื่น ๆ

2.2.4.1 ทางด้านเกษตรกรรมและการประมง

ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถนำไปใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยของสารเคมีหรือปุ๋ยที่ใช้ในการเกษตรสำหรับเป้าหมายเฉพาะและที่อัตราเร็วเฉพาะ ซึ่งสารพวกนั้นจะนำมา

เคลือบหรือบรรจุในพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานเหล่านี้จะเป็นตัวควบคุมอัตราการนำส่ง การไหล และระยะเวลาในการออกฤทธิ์ ข้อดีของการใช้งานในลักษณะนี้คือใช้สารเคมีน้อยกว่า ช่วยให้สารออกฤทธิ์ในเวลาเหมาะสม และช่วยลดอันตรายต่อเกษตรกรได้ สำหรับการใช้งานทางด้านประมงก็มีการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้ทำเป็นเชือกและตาข่ายจับปลา (Park et al., 2013)

2.2.4.2 ทางด้านภาชนะบรรจุภัณฑ์

สำหรับภาชนะที่จะนำมาใช้บรรจุอาหารนั้น มีสิ่งที่ควรคำนึง 2 อย่างคือ การนำกลับมาใช้ใหม่และไม่อันตราย สำหรับภาชนะเหล่านี้ ลักษณะทางกายภาพขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นผลึก และกระบวนการในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ที่ใช้ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีการนำมาใช้เป็นถุงขนมขบเคี้ยวและฟิล์มสำหรับห่ออาหาร อีกทั้งยังทำเป็นถุงหรือถาดสำหรับใส่ผักและผลไม้ นอกจากนี้ยังมีการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาขึ้นรูปเป็นขวดน้ำ แก้วน้ำและภาชนะอื่น ๆ ทั้งนี้ยังมีการค้นพบว่าเมื่อนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดในอัตราส่วน 20:80 และ 10:90 โดยน้ำหนัก จะเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดบางประการ เช่น พอลิแล็กติกแอซิดมีความเปราะ ก็จะใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งมีความยืดหยุ่นมาช่วยแก้ไขสมบัติดังกล่าวได้ นอกจากนี้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังเพิ่มการทนความร้อน การทนการกัดกร่อนของสารเคมีและการทนแรงกระแทก ซึ่งทำให้ได้ภาชนะที่สามารถย่อยสลายได้ที่มีสมบัติดีขึ้น (Bhatia et al., 2007)

2.2.4.3 ทางด้านการแพทย์

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถใช้เป็นตัวควบคุมการปล่อยยาในร่างกาย และยังเป็นวัสดุที่มีการใช้ในการซ่อมแซมกระดูกและกระดูกอ่อนได้ (Wang et al., 2009) และเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่าและยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิแล็กติกแอซิด นอกจากนี้เมื่อนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมกับเรซิน (resin) ยังสามารถนำไปใช้ทำเป็นเครื่องมือทางการแพทย์และวัสดุอื่นได้อีกด้วย

2.2.4.4 ทางด้านอื่น ๆ

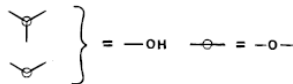
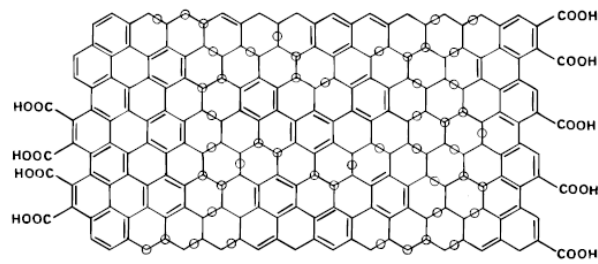
การใช้งานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในด้านอื่น ๆ เช่น ใช้ทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และใช้เป็นของใช้ในชีวิตประจำวัน เป็นต้น

2.3 แกรฟีนออกไซด์

แกรฟีน (graphene) เป็นวัสดุสองมิติ โดยมีอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมเหมือนรังผึ้ง มีความหนาในระดับนาโนเมตร (nanometer) มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา ในยุคแรกเตรียมแกรฟีนโดยใช้วิธีเชิงกล เปลี่ยนแกรไฟต์ (graphite) ให้กลายเป็นแกรฟีน (Novoselov et

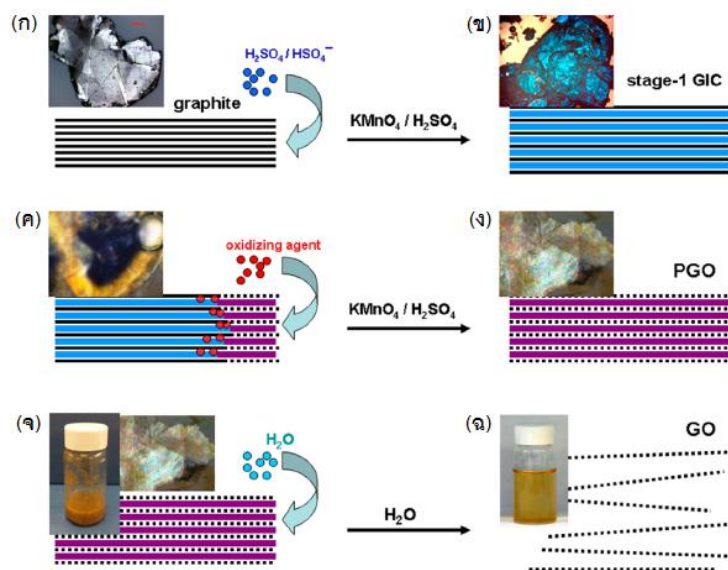
al., 2004) หลังจากนั้นจึงมีการพัฒนามาใช้วิธีทางเคมี โดยใช้ตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงเพื่อเปลี่ยนแกรไฟต์เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ (graphite oxide) โดยแกรไฟต์ออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่อีพ็อกซี (epoxy group) ปรากฏบนแกรไฟต์ ส่งผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้น ซึ่งเป็นการลดแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ระหว่างชั้นได้ เมื่อให้แรงเชิงกลแก่แกรไฟต์ออกไซด์ แต่ละชั้นสามารถหลุดออกจากกันกลายเป็นชั้นเดี่ยว เรียกว่า แกรฟีนออกไซด์ และเมื่อนำไปรีดิวซ์ หมู่ฟังก์ชันจะถูกกำจัดออกเกิดเป็นแกรฟีน ดังนั้นแกรฟีนออกไซด์จึงเป็นผลึกคาร์บอนที่อยู่ในรูปออกไซด์ของแกรฟีน ซึ่งเกิดจากการลอกออกของแผ่นแกรไฟต์ออกไซด์

การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1859 โดย Brodie ใช้โพแทสเซียมเปอร์คลอเรต (potassium perchlorate) และกรดไนตริก (nitric acid) เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นรุนแรงและอันตราย (Brodie, 1859) จนมีการพัฒนามาเรื่อย ๆ โดยใช้กรดซัลฟูริก กรดไนตริกเข้มข้นและโพแทสเซียมคลอเรตเป็นตัวออกซิไดซ์ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยายังรุนแรงและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานถึง 1 สัปดาห์ จนกระทั่ง Hummers และ Offeman (1958) ได้พัฒนามาใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น โซเดียมไนเตรตและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความปลอดภัยมากกว่าเพราะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำและสารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษน้อย นอกจากนั้นยังใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง ทั้งนี้จากการทดลอง ประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้สามารถวัดจากอัตราส่วนระหว่างอะตอมคาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งพบว่าเพิ่มขึ้นจาก 2.1 เป็น 2.9 นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ยังดูได้จากสีของแกรไฟต์ออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อนำแกรฟีนออกไซด์ไปกระจายตัวในน้ำ พบว่าสารละลายมีสีเหลืองเข้ม ถ้าแกรไฟต์ออกไซด์มีสีน้ำตาลหรือดำแสดงว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดไม่สมบูรณ์ นั่นคือมีปริมาณออกซิเจนบนระนาบแกรไฟต์น้อย ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีพื้นฐานในการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ในปัจจุบัน และถูกเรียกว่าวิธีของฮัมเมอร์ (Hummers' method) (Hummers and Offeman, 1958) ซึ่ง Lerf และคณะ (1998) ได้นำเสนอโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแกรไฟีนออกไซด์ (Lerf et al., 1998)

Lerf และคณะ (1998) อธิบายว่า ในระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน หมู่อิพ็อกซีและหมูไฮดรอกซิลจะปรากฏบนระนาบของแกรไฟีนออกไซด์ โดยหมูฟังก์ชันทั้งสองนี้อยู่ใกล้กันเสมอ สำหรับหมูคาร์บอกซิลส่วนใหญ่ปรากฏบริเวณขอบของแกรไฟีนออกไซด์ (Lerf et al., 1998) นอกจากนี้ Dimiev และ Tour (2014) ยังได้เสนอกฎการเกิดแกรไฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 2.6

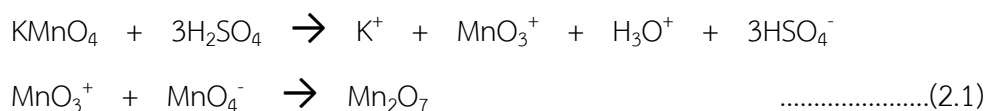


รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดแกรไฟีนออกไซด์ (Dimiev and Tour, 2014)

จากรูปที่ 2.6 สามารถอธิบายการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์ผ่าน 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แกรไฟต์ถูกแทรกตัวด้วยกรดซัลฟูริก ดังรูปที่ 2.6(ก) เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเห็นแกรไฟต์เป็นสีฟ้า ดังรูปที่ 2.6(ข) โดยเรียกแกรไฟต์ในขั้นตอนนี้ว่า “แกรไฟต์ที่อิมตัวด้วยกรดซัลฟูริก”

ขั้นตอนที่ 2 เติมตัวออกซิไดซ์ ซึ่งในที่นี้คือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งแกรไฟต์ที่อิมตัวด้วยกรดซัลฟูริกถูกเปลี่ยนให้เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ในระยะเวลาเริ่มแรก (pristine graphite oxide) โดยที่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้าทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก เกิดเป็นไดแมงกานีสเฮปตะออกไซด์ (Mn_2O_7) ดังสมการที่ 2.1 ซึ่งไดแมงกานีสเฮปตะออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงกว่าไดแมงกานีสเตตระออกไซด์ (MnO_4^+)



จากรูปที่ 2.6(ค) เมื่อเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สีฟ้าของแกรไฟต์ออกไซด์เริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลสว่างบริเวณขอบของแกรไฟต์ และเมื่อเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมากขึ้น สีของแกรไฟต์เริ่มเป็นสีน้ำตาลสว่างจากขอบเข้าสู่บริเวณกึ่งกลาง จนเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ สีของแกรไฟต์เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลสว่างทั้งหมด ดังรูปที่ 2.6(ง) จากการติดตามการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ในแต่ละขั้นตอนสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแกรไฟต์เป็นแกรไฟต์ออกไซด์เริ่มเกิดจากบริเวณขอบเข้าสู่บริเวณกึ่งกลาง

ขั้นตอนที่ 3 แกรไฟต์ออกไซด์ถูกกระจายตัวในน้ำและถูกแยกด้วยวิธีการต่าง ๆ จนหลุดเป็นชั้นเดี่ยวกลายเป็นแกรฟีนออกไซด์ (Dreyer et al., 2010)

2.3.1 วิธีการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์

กระบวนการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีของฮัมเมอร์ (Hummers' method) วิธีของฮัมเมอร์ที่ปรับปรุงแล้ว (improved Hummers' method) และวิธีของฮัมเมอร์ที่ปรับเปลี่ยนแล้ว (modified Hummers' method)

(1) วิธีของฮัมเมอร์ วิธีนี้ใช้อัตราส่วนของผงแกรไฟต์: โซเดียมไนเตรต: โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต: กรดซัลฟูริก เป็น 1 กรัม: 0.5 กรัม: 3 กรัม: 23 มิลลิลิตร

(2) วิธีของฮัมเมอร์ที่ปรับปรุงแล้ว วิธีนี้ใช้อัตราส่วนของผงแกรไฟต์: โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต: กรดซัลฟูริกและกรดฟอสฟอริก เป็น 1 กรัม: 6 กรัม: 134 มิลลิลิตร โดยอัตราส่วนของกรดซัลฟูริกต่อกรดฟอสฟอริกเป็น 9: 1 ซึ่งวิธีนี้ไม่มีการเติมโซเดียมไนเตรต เพื่อลดแก๊ส NO_x ที่เป็นแก๊สอันตราย (Marcano et al., 2010)

(3) วิธีของฮัมเมอร์ที่ปรับเปลี่ยนแล้ววิธีนี้ใช้อัตราส่วนของผงแกรไฟต์: โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต: กรดซัลฟูริก เป็น 1 กรัม: 5 กรัม: 100 มิลลิลิตร ซึ่งวิธีนี้ไม่มีการเติมโซเดียมไนเตรตและกรดฟอสฟอริก (Shahriary and Athawale, 2014)

2.3.2 สมบัติของแกรฟีนออกไซด์

เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเป็นจำนวนมากและมีพื้นผิวมาก จึงทำให้แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวในน้ำและในตัวทำละลายได้หลายชนิด โดย Konios และคณะ (2014) ได้ศึกษาการกระจายตัวของแกรฟีนออกไซด์ในน้ำ อะซิโตน (acetone) เมทานอล (methanol) เอทานอล (ethanol) 2-โพรพานอล (2-propanol) เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (dimethylformamide) เมทิล-2-ไพโรริโดน (methyl-2-pyroridone) เฮกเซน (hexane) ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) คลอโรฟอร์ม (chloroform) โทลูอิน (toluene) คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) ออโทไดคลอโรเบนซีน (ortho-dichloro- benzene) 1-คลอโรแนฟทาลีน (1-chloronaphthalene) อะเซทิลอะซิโตน (acetylacetone) และไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) พบว่าหลังจากนำแกรฟีนออกไซด์ไปสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงในตัวทำละลายต่าง ๆ แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายได้ดีในเมทิล-2-ไพโรริโดน ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เอทิลีนไกลคอล เตตระไฮโดรฟูแรนและน้ำ ซึ่งตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิด มีขั้วสูงจึงทำให้แกรฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากมายสามารถกระจายตัวอยู่ได้ แต่อย่างไรก็ตามไดคลอโรเบนซีนมีขั้วสูงเช่นเดียวกัน แต่แกรฟีนออกไซด์กลับไม่สามารถกระจายตัวอยู่ได้ แสดงว่าความมีขั้วของตัวทำละลายไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ทำให้แกรฟีนออกไซด์กระจายตัวได้ดี อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญสำหรับแกรฟีนออกไซด์คือ พื้นผิว ถ้าแกรฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวมากจะทำให้สามารถกระจายในตัวทำละลายได้ดี และเมื่อวางทิ้งไว้เป็นเวลา 3 สัปดาห์พบว่าแกรฟีนออกไซด์ยังคงกระจายตัวได้ดีในเมทิล-2-ไพโรริโดน แต่เริ่มตกตะกอนในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เอทิลีนไกลคอล เตตระไฮโดรฟูแรนและน้ำ (Konios et al., 2014) ซึ่งการที่แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด ทำให้แกรฟีนออกไซด์สามารถผสมกับพอลิเมอร์หรือเซรามิกได้ เมื่อผสมกับวัสดุเหล่านี้จะช่วยเพิ่มสมบัติหลายประการ ได้แก่ ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ค่าความแข็ง (hardness) และอื่น ๆ นอกจากนั้นแกรฟีนออกไซด์ยังมีราคาถูกกว่าแกรฟีนและสามารถนำเข้าสู่กระบวนการผลิตได้ง่ายกว่าแกรฟีน

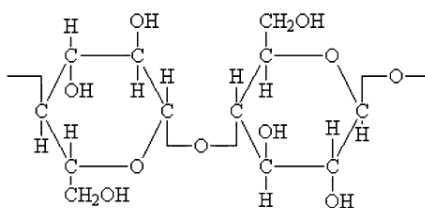
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

แกรฟีนออกไซด์ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เช่น การใช้แกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวเรืองแสง (fluorescence) เพื่อตรวจสอบเชื้อโรคและช่วยรักษาโรคมะเร็ง สำหรับการรักษาโรคมะเร็งนั้น แกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวนำส่งยาที่ดีเนื่องจากจะนำส่งไปที่เซลล์มะเร็งเท่านั้น และจะไม่ทำลายเซลล์ที่ดีแบบตัวส่งชนิดอื่น (Yang et al., 2011) นอกจากนี้แกรฟีนออกไซด์ยังใช้สำหรับทำลายแบคทีเรีย (antibacterial) ซึ่งสามารถยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียอีโคไล (E. Coli) และช่วยรักษาบาดแผลโดยการทำลายแบคทีเรียบริเวณรอบ ๆ บาดแผลได้ (Kim et al., 2010) และแกรฟีนออกไซด์ยังทำหน้าที่เป็นสาร

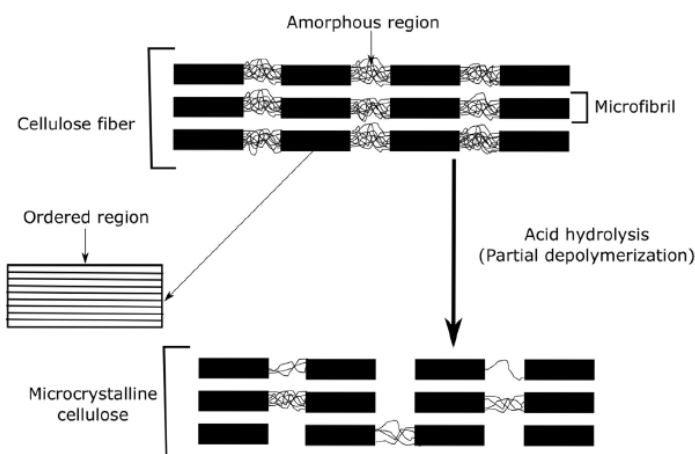
ลดแรงตึงผิว (surfactant) คล้ายสบู่และแชมพู เพราะแกรฟีนออกไซด์มีส่วนที่ชอบน้ำคือส่วนที่มีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำคือส่วนที่เป็นระนาบคาร์บอน ซึ่งสามารถช่วยกระจายสารที่ไม่ชอบน้ำ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ให้สามารถกระจายในน้ำได้ (Kim et al., 2010)

2.4 ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เป็นที่รู้จักกันดีชนิดหนึ่ง ซึ่งเซลลูโลสเกิดจากการเชื่อมต่อกันของกลูโคสเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะ 1,4-เบตาไกลโคซิดิก (1,4-beta glycosidic bond) แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยสายโซ่เหล่านี้รวมกลุ่มกันจนเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibril) ซึ่งแต่ละไมโครไฟบริลมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ และมีพันธะภายในเชื่อมต่อกันในแต่ละสายโซ่ ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึก และบางส่วนที่ไม่เกิดพันธะภายในจะเกิดเป็นโครงสร้างอสัณฐาน เมื่อนำไปผ่านกระบวนการตัดสายโซ่ด้วยกรด (acid hydrolysis) ทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานถูกทำลายไป เหลือเฉพาะส่วนที่เป็นผลึก เรียกเซลลูโลสที่เป็นผลึกที่เหลือว่า คริสตัลลินเซลลูโลส (crystalline cellulose) แสดงดังรูปที่ 2.8 หากผลึกกลุ่มนั้นมีขนาดความกว้างในระดับไมโครเมตรก็จะเรียกว่า ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (microcrystalline cellulose)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส (Harane et al., 2014)



รูปที่ 2.8 การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสจากเส้นใยเซลลูโลส (Trache et al., 2016)

2.4.1 การสังเคราะห์ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

การสังเคราะห์ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส สามารถทำได้ 3 วิธี คือวิธี reactive extrusion วิธี stream explosion และวิธี acid hydrolysis

2.4.1.1 Reactive extrusion

วิธีนี้เป็นการเติมเซลลูโลสลงในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) พร้อมกับสารละลายกรด ซึ่งในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ตัวสกรูจะถูกหมุนเพื่ออัดและบดเซลลูโลส ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ด้วยกรดจนกลายเป็นไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ซึ่งเซลลูโลสที่ใช้ อาจจะเป็นเซลลูโลสหรือลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ก็ได้ หากใช้ลิกโนเซลลูโลสต้องใช้สารละลายเบสเติมเข้าไปในเครื่องอัดรีดสกรูคู่เพื่อกำจัดลิกนิน (lignin) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ออกก่อน แล้วจึงเติมสารละลายกรดเพื่อสังเคราะห์ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อไป วิธีนี้มีข้อดีคือเป็นการผลิตแบบต่อเนื่องทำให้ใช้ระยะเวลาไม่นานในการผลิต นอกจากนี้ปริมาณกรดที่ใช้ในวิธีนี้ยังใช้ปริมาณน้อย ทำให้ของเสียกรดที่เกิดขึ้นก็น้อยเช่นกัน และยังได้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีขนาดอนุภาคเล็กอีกด้วย (Hanna et al., 2001)

2.4.1.2 Stream explosion

วิธีนี้เริ่มจากการเติมเซลลูโลสลงในถังปฏิกิริยาและปิดบอลวาล์ว (ball valve) ให้สนิท จากนั้นผ่านไอน้ำร้อนลงไป ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มเป็น 170 – 350 องศาเซลเซียส จากนั้นทิ้งไว้ระยะเวลาสั้น ๆ แล้วจึงเปิดบอลวาล์วออก เพื่อลดความดันของระบบอย่างรวดเร็ว แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการตัดสายโซ่ด้วยกรดจนเกิดเป็นไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อไป ซึ่งถ้ามีลิกนินและเฮมิเซลลูโลสปะปนอยู่ ก็จะถูกกำจัดออกพร้อมกับไอน้ำร้อนที่ผสมสารละลายเบสประมาณร้อยละ 0.1 – 5 โดยน้ำหนัก (Garrote et al., 1999)

2.4.1.3 Acid hydrolysis

วิธีนี้เป็นการนำเซลลูโลสผสมกับกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น แล้วจึงนำไปรีฟลักซ์ (reflux) เพื่อให้เกิดการตัดสายโซ่ด้วยกรด เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจึงนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีภาวะเป็นกลางและทำให้แห้ง (Fan et al., 1987)

2.4.2 สมบัติของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโมเลกุลค่อนข้างแข็ง มีพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ ทำให้โครงสร้างเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ไม่สามารถหลอมเหลวได้ ไม่ละลายในน้ำ เอทานอล อีเทอร์หรือตัวทำละลายอื่น ๆ (Zhang et al., 2005) สำหรับสมบัติเชิงกลของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสนั้นขึ้นอยู่กับพืชและกรดที่ใช้ในการสกัด เช่น การสกัดไม-

โครคริสตัลลินเซลลูโลสจากชานอ้อยและฟางข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าชานอ้อยมีค่าความทน-
แรงดึง (tensile strength) พลังงาน ณ จุดขาด (energy at break) และค่าความแข็ง (hardness)
เท่ากับ 3.82 เมกะปาสคาล, 769 จูล และ 71.7 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวมีค่าดังกล่าว
เท่ากับ 4.98 เมกะปาสคาล, 876 จูล และ 73.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับชานอ้อยและฟาง
ข้าวที่มีการสกัดด้วยกรดซัลฟูริก พบว่าชานอ้อยมีค่าดังกล่าวเท่ากับ 4.32 เมกะปาสคาล, 873 จูล
และ 75.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวมีค่าดังกล่าวเท่ากับ 5.18 เมกะปาสคาล, 905 จูล,
74.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ (El-Sakhawy and Hassan, 2007) นอกจากนี้ไมโครคริสตัลลิน
เซลลูโลสยังมีสมบัติการดูดซึมน้ำที่ดีอีกด้วย (Roja et al., 2011)

2.4.3 การใช้งานไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ด้านอาหารและ
เครื่องสำอาง ไม่ว่าจะเป็นสารกันบูด (stabilize) ในไอศกรีม อาหารแช่เย็น อาหารกระป๋องและเครื่องปรุง
อาหาร ใช้เป็นสารกันการรวมกันเป็นก้อน (anti-caking agent) ในอาหารที่เป็นแป้งอบ ใช้เป็นสาร
ทดแทนไขมัน (fat substitute) และเป็นสารก่ออิมัลชัน (emulsifier) ในอาหารจำพวกไอศกรีมและ
เครื่องปรุงอาหาร นอกจากนี้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสยังถูกใช้ในเครื่องสำอาง ไม่ว่าจะเป็น สารที่ทำให้
เกิดเจล (gelling agent) สารกันบูดหรือเป็นสารช่วยแขวนตะกอน (suspending agent) การใช้
ประโยชน์ทางด้านยา ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสจะถูกใช้เป็นสารเชื่อมติด (binder) และเป็นตัวดูดซึม
(adsorbent) ในยา สำหรับทางด้านเครื่องสำอาง ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสถูกใช้เป็นสารทดแทน
ไขมันเป็นสารเชื่อมติด และสารสร้างเนื้อเจล (thickener)

2.5 วัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิต คือ วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุที่มากกว่าหนึ่งชนิด ทั้งขนาดไมโคร (micro)
และแมโคร (macro) ซึ่งวัสดุคอมพอสิตที่ได้จะมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ โดย
สมบัติที่ได้จะดีกว่าเดิม หรือมีลักษณะสำคัญบางประการที่ต่างไปจากเดิม วัสดุคอมพอสิตประกอบขึ้น
จาก 2 เฟส คือเฟสหลักหรือเนื้อพื้น (matrix phase) ซึ่งติดกันและล้อมรอบอีกเฟสไว้ และเฟสที่สอง
คือ เฟสรองหรือเฟสกระจาย (dispersed phase)

2.5.1 เฟสหลัก

วัสดุที่เป็นเฟสหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ซึ่งเฟสหลักสามารถ
จำแนกได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.5.1.1 พอลิเมอร์ (polymer)

โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ มีหน่วยซ้ำที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว แต่พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่มากนักและมีความหนาแน่นต่ำ โดยพอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็น เทอร์โมเซตติง (thermosetting polymer) และเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polymer) ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านพฤติกรรมเชิงความร้อน โดยเทอร์โมเซตติงมีโครงสร้างแบบร่างแห (crosslink) และมีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแล้วจะเกิดการคงรูปไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งพฤติกรรมทางความร้อนนี้มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต (Gurit, 2017)

2.5.1.2 เซรามิก (ceramic)

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนต่อการกัดกร่อนและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก แต่เซรามิกมีข้อเสียคือมีความเหนียวน้อย ทำให้เปราะและแตกหักง่าย (Veranitisagul, 2017)

2.5.1.3 โลหะ (metal)

วัสดุชนิดนี้มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่เป็นสนิมง่ายและมีน้ำหนักมาก นอกจากนี้การทนต่อความล้าของโลหะยังต่ำมาก โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม (Veranitisagul, 2017)

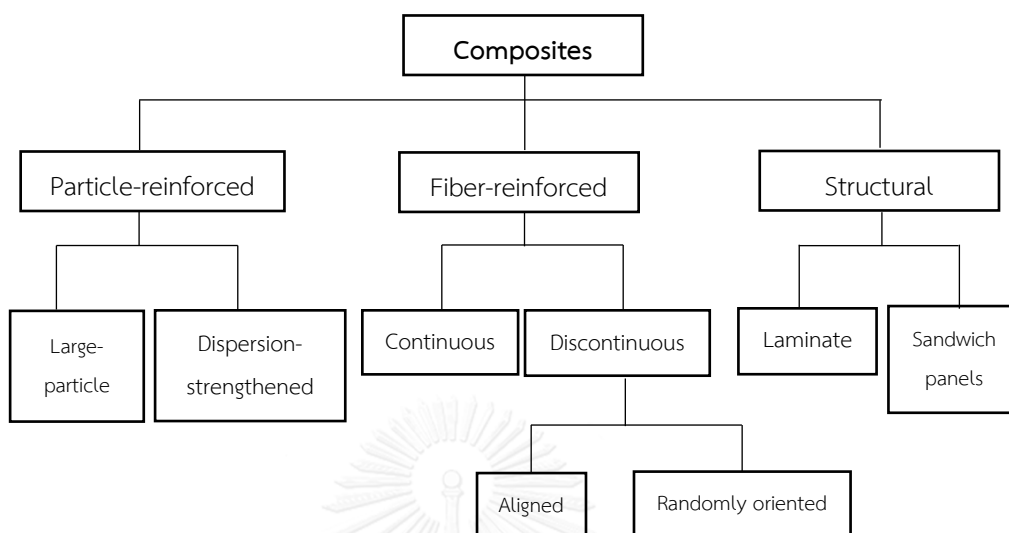
2.5.2 เฟสกระจาย

เฟสกระจายเป็นวัสดุที่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเฟสหลัก ตัวอย่างของเฟสกระจาย คือ วัสดุเสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรงที่ดีต้องมีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความแกร่ง ความยืดหยุ่น ความเหนียวที่ดีกว่าเฟสหลัก และต้องมีการยึดเกาะกับวัสดุในเฟสหลักได้ดี ลักษณะของวัสดุเสริมแรงสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทอนุภาค (particle) ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทเส้นใย (fiber) และลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทโครงสร้าง (structure) (Veranitisagul, 2017) แสดงดังรูปที่ 2.9

2.5.2.1 ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทอนุภาค

อนุภาคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ และวัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็กละเอียด ซึ่งทั้งสองชนิดแตกต่างกันในเรื่องของกลไกการเสริมแรง อนุภาคขนาดใหญ่จะเพิ่มความแข็งแรงโดยอาศัยเรื่องกลศาสตร์เท่านั้น โดยอนุภาคเสริมแรงเหล่านี้จะเหนียวรั้งหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของเฟสหลักบริเวณที่อยู่ใกล้กับอนุภาคนั้น และเฟสหลักจะส่งผ่านความเค้นเข้าไปสู่ออนุภาคที่รับแรงได้สูง ซึ่งระดับความสามารถในการเสริมแรงหรือการปรับปรุง

สมบัติเชิงกลของอนุภาคขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเมทริกซ์กับอนุ-



รูปที่ 2.9 แผนผังจำแนกลักษณะของวัสดุเสริมแรงที่เป็นเฟสกระจายในวัสดุคอมพอสิต (Lindeke, 2017)

ภาค สำหรับอนุภาคเสริมแรงขนาดเล็กละเอียด ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตรถึง 0.1 ไมโครเมตร ความแข็งแรงเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเฟสหลักกับอนุภาคระดับอะตอม อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้จะกระจายตัวและยับยั้งการเคลื่อนที่ของเฟสหลัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจึงต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานแรงดึงและความแข็งแรงที่จุดครากสูงขึ้น

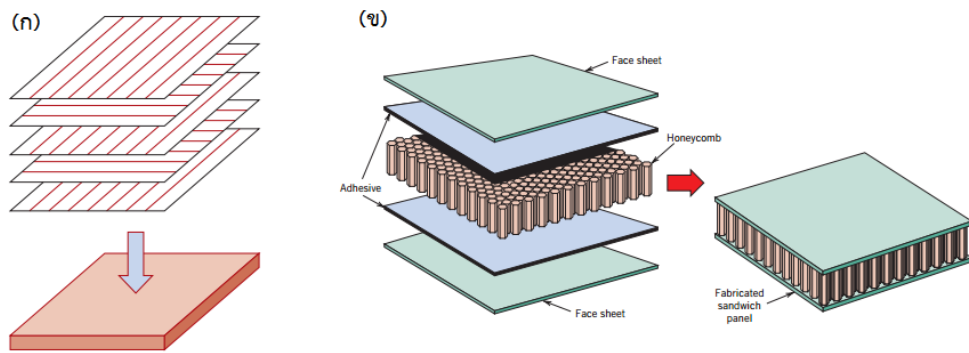
2.5.2.2 ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทเส้นใย

โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิตมักจะเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุคอมพอสิตจะมีความแข็งแรงสูงสุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย การเสริมแรงนี้ทำให้เฟสหลักสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง สำหรับสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตจะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากเฟสหลักและสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกัน ทำให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม โดยเส้นใยเสริมแรงจะทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุคอมพอสิตจะสามารถยืดได้สูงสุดไม่เกินระยะยืดของเส้นใยเสริมแรง และเฟสหลักควรมีความเหนียวมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยได้

2.5.2.3 ลักษณะวัสดุเสริมแรงประเภทโครงสร้าง

สมบัติของวัสดุนอกจากขึ้นกับองค์ประกอบของวัสดุแล้ว ยังขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างด้วย วัสดุประเภทโครงสร้างที่พบบ่อยคือ โครงสร้างลามินา (lamina) และโครง-

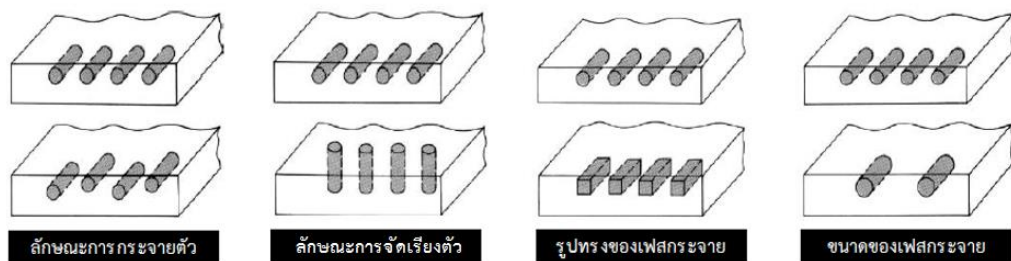
สร้างแผงประกอบแซนด์วิช (sandwich panels) แสดงดังรูปที่ 2.10 โครงสร้างลามิनाจะประกอบด้วยแผ่น 2 มิติ นำมาเรียงซ้อนทับกัน ซึ่งแต่ละแผ่นจะถูกให้แรงในทิศตั้งฉากเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ดังนั้นวัสดุประเภทนี้จึงมีความแข็งแรงสูงและสามารถรับแรงได้ทุกทิศทาง สำหรับโครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิชประกอบด้วยแผ่นนอกที่มีความแข็งแรงและแทรกด้วยชั้นของวัสดุอื่นที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า โดยแผ่นหน้าจะรับแรงส่วนใหญ่ในแนวระนาบและรับแรงดัดงอในทิศทางตามขวาง และชั้นแกนทำหน้าที่แยกแผ่นหน้าออกจากกัน นอกจากนี้ยังต้านทานการเปลี่ยนรูปในทิศตั้งฉากกับระนาบแผ่นหน้า วัสดุที่ใช้เป็นชั้นกลาง เช่น โฟมพอลิเมอร์ และยางสังเคราะห์ เป็นต้น



รูปที่ 2.10 (ก) โครงสร้างลามินา (ข) โครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช (Lindeke, 2017)

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต

ปัจจัยที่มีผลต่อวัสดุคอมพอสิต คือ องค์ประกอบของแต่ละเฟส ปริมาณของเฟสกระจายที่ถูกเติมในเฟสหลัก และลักษณะการกระจายตัวของเฟสกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.11

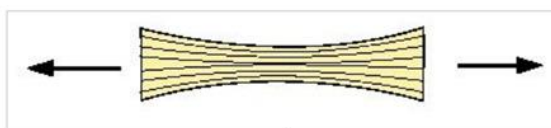


รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสกระจายในเฟสหลัก (Lindeke, 2017)

2.5.4 การรับแรงของวัสดุคอมพอสิต

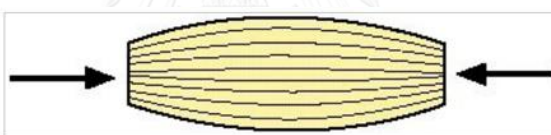
การรับแรงของวัสดุคอมพอสิตโดยทั่วไปมี 4 ประเภทคือ แรงดึง (tension) แรงกดอัด (compression) แรงเฉือน (shear) และแรงดัดโค้ง (flexure) (Gurit, 2017)

ลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุคอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 2.12 การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุขึ้นอยู่กับแรงที่ใช้ดึง และความแข็งแรงเชิงกลของเฟสกระจายที่ใช้



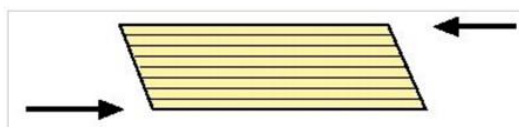
รูปที่ 2.12 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงดึง (Gurit, 2017)

ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงกดอัด แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งความแข็งแรงของวัสดุนี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงดึง (stiffness) และการยึดติด (adhesion) ของเฟสหลักและเฟสกระจาย



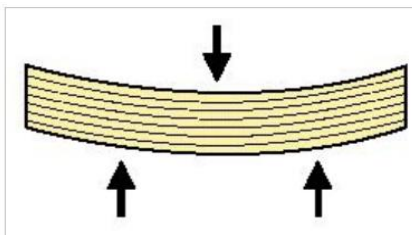
รูปที่ 2.13 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงกดอัด (Gurit, 2017)

แรงเฉือน เป็นแรงที่กระทำต่อวัสดุคอมพอสิต โดยแรงดิ่งกล่าวจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งในภาวะแบบนี้เฟสหลักจะมีบทบาทมากในเรื่องการยึดติดกับเฟสกระจาย



รูปที่ 2.14 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงเฉือน (Gurit, 2017)

แรงดัด เป็นลักษณะของแรงที่กระทำกับวัตถุมีลักษณะผสมของแรงดึง แรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน จะเห็นได้ว่ากึ่งกลางของด้านบนของวัตถุถูกแรงกดอัดกระทำ ขณะที่ไว้วัตถุจะถูกแรงยึดและแรงเฉือนจากการยึดตัวของวัตถุแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแรงดัด (Gurit, 2017)

2.6 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน

กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การผสม และการขึ้นรูป

2.6.1 การผสม

การผสมเป็นการผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ตรงกับความต้องการ การผสมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนร่วม (coagulation) การผสมผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) และการผสมโดยใช้สารละลาย (solution mixing) เป็นต้น ซึ่งการผสมโดยใช้สารละลาย พอลิเมอร์และสารเติมแต่งต้องละลายหรือกระจายตัวในตัวทำละลายอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ แต่ตัวทำละลายที่ผสมกันต้องมีความเข้ากันได้ดี เพื่อให้พอลิเมอร์และสารเติมแต่งผสมเข้ากันได้ดี เมื่อผสมแล้วสามารถกำจัดตัวทำละลายออกได้ จะได้พอลิเมอร์คอมพอสิตในที่สุด

2.6.2 การขึ้นรูป

กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยกระบวนการนี้เป็นการขึ้นรูปพอลิเมอร์ในเชิงอุตสาหกรรมที่เก่าแก่ที่สุด ซึ่งก่อนการขึ้นรูปต้องเตรียมพอลิเมอร์ให้เรียบร้อยก่อน เพราะกระบวนการนี้ไม่มีขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเหมือนเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการดังกล่าว มีดังนี้

(1) นำแม่แบบวางบนแผ่นเหล็ก และวางสารผสมในปริมาณที่พอเหมาะลงในแม่แบบ จากนั้นจึงประกบแผ่นเหล็กอีกแผ่นเข้าด้วยกัน

(2) วางชุดแม่แบบลงบนแท่นเหล็กที่มีการให้ความร้อนแล้ว จากนั้นอัดแท่นเหล็กเข้าหากันด้วยความดันคงที่ ด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulic) ต้องการจนกระทั่งแม่แบบประกบกันสนิทเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารผสม ความร้อนทำให้สารผสมสามารถเคลื่อนที่ได้ โดยจะไหลไปทั่วโพรงของแม่แบบ

(3) ทำการหล่อเย็นเพื่อให้สารผสมแข็งตัว

(4) คลายแรงดันลงเพื่อเปิดแม่แบบออก จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ออกจากแม่แบบ

การขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ทำให้การเรียงตัวของพอลิเมอร์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้เกิดข้อดีแก่ชิ้นงานหลายประการ เช่น สารเติมแต่งประเภทเส้นใยสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดี ไม่มีผลการรบกวนจากการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ผลิตภัณฑ์มีความเค้นตกค้างต่ำ และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยังเหมือนเดิมเนื่องจากมีการไหลภายใต้แรงเฉือนค่อนข้างต่ำ อีกทั้งเครื่องมือมีต้นทุนต่ำเนื่องจากอาศัยเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลาสติกที่ได้จากปิโตรเคมี ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายเป็นพันปีจึงก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาส่งผลให้เป็นปัญหาใหญ่ในปัจจุบัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อทดแทนพลาสติกที่ได้จากปิโตรเคมี โดยพลาสติกชนิดนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก เพื่อพัฒนาให้ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีสมบัติโดดเด่นหลายประการ ทั้งสามารถทนสารเคมีและความร้อนได้ดี ขึ้นรูปได้ง่าย และยังมีควมยืดหยุ่นสูง ดังนั้นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงถูกนำไปประยุกต์ในงานด้านบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะทางด้านเกษตรกรรม แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังย่อยสลายได้ช้า ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติการดูดซึมน้ำให้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยผสมกับวัสดุอื่นที่ช่วยเร่งการย่อยสลายได้ เช่น เซลลูโลสและแป้ง เป็นต้น และมีการผสมกับวัสดุอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เช่น แกรฟีนออกไซด์ แกรฟีนและท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่อาศัยจุลินทรีย์ในการช่วยย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์เหล่านั้นอาศัยน้ำเป็นตัวกลางในการเข้าไปในพอลิเมอร์ และทำการปล่อยเอนไซม์ให้ย่อยสายโซ่พอลิเมอร์จากสายโซ่ยาวจนกลายเป็นสายโซ่สั้น (oligomer) เมื่อพอลิเมอร์โดนย่อยจนเป็นโมเลกุลเล็ก ก็จะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ จุลินทรีย์จะจัดการย่อยโมเลกุลเหล่านั้นจนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนและน้ำ แต่เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเอสเทอร์สายโซ่ตรง ที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้การดูดซึมน้ำเป็นไปได้ยากมาก เมื่อเป็นเช่นนี้จุลินทรีย์สามารถย่อยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้เพียงแคผิวหน้าเท่านั้น (Taniguchi et al., 2002)

เซลลูโลสคือหนึ่งในพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถดูดซึมน้ำได้ดี เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้เซลลูโลสยังเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน มีนักวิจัยหลายท่านได้นำเซลลูโลสมาพัฒนาต่อเพื่อให้ใช้งานได้หลากหลายขึ้น เช่นเดียวกับ Chuayjuljit และคณะ (2009) ที่นำไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมาผสมกับยางธรรมชาติ (natural rubber) และศึกษาการดูด-

ชิมน้ำ พบว่าเมื่อเติมไมโครคริสตัลลินมากขึ้น การดูดซึมน้ำของยางธรรมชาติก็มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำจึงทำให้ดูดซึมน้ำได้ เมื่อน้ำสามารถเข้าไปในยางธรรมชาติ ทำให้จุลินทรีย์เช่น แบคทีเรียหรือฟังไจสามารถเติบโตได้โดยใช้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเป็นแหล่งอาหาร และจุลินทรีย์เหล่านั้นสามารถย่อยยางธรรมชาติได้ ดังนั้นน้ำจึงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Chuayjuljit et al., 2009)

นอกจากนั้น Chuayjuljit และคณะ (2010) ได้นำพอลิไวนิลคลอไรด์ (poly(vinyl chloride), PVC) ผสมกับไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส เพื่อศึกษาการย่อยสลายและสมบัติต่าง ๆ จากผลการดูดซึมน้ำพบว่าเมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมากขึ้น การดูดซึมน้ำยิ่งดีขึ้นเช่นเดียวกับการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสในยางธรรมชาติ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำฟิล์มไปทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าน้ำหนักฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่หายไปสัมพันธ์กับปริมาณไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เติม นอกจากนั้นเมื่อมีการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมากขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและน้ำหนักของฟิล์มที่ถูกย่อยสลายไปมากขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาสมบัติความทนแรงดึงพบว่า เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส 25 ส่วนในพอลิไวนิลคลอไรด์ 100 ส่วน มีค่าความทนแรงดึงได้มากที่สุดและสำหรับค่ายังส์มอดุลัส เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมากขึ้นทำให้ค่ายังส์มอดุลัสมากขึ้นเช่นกัน (Chuayjuljit et al., 2010)

ดังนั้นการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสในพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ สามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น Chaiwutthinan และคณะ (2012) จึงได้นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมกับไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ พบว่าการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) ของคอมพอสิต แต่ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ประมาณ 34.5 เมกกะปาสคาล แต่เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมากขึ้น ทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ค่าความทนแรงดึงลดลงเหลือ 20 เมกกะปาสคาล ในทางตรงกันข้ามการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสทำให้ค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus) มีค่าสูงขึ้น (Chaiwutthinan et al., 2012)

ในปัจจุบันวัสดุคาร์บอนนิยมนำมาใช้เสริมแรงให้กับวัสดุชนิดอื่นและที่ได้รับความนิยมมากคือแกรไฟิน เนื่องจากแกรไฟินมีลักษณะเป็น 2 มิติ คือมีเฉพาะความกว้างและความยาว สำหรับความสูงของแกรไฟินจัดอยู่ในหน่วยนาโนเมตร จึงจัดแกรไฟินอยู่ในกลุ่มของวัสดุนาโนคาร์บอน แกรไฟินสามารถเสริมแรงให้กับวัสดุหลายชนิดได้ดี ถึงแม้เติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามแกรไฟินสามารถกระจายตัวได้ไม่ดีในวัสดุที่มีขั้ว ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้แกรไฟินออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากและมี

ชี้ว่าสูงกว่าแทนการใช้แกรฟีน Pinto และคณะ (2013) ได้เปรียบเทียบการเสริมแรงของแกรฟีนนาโน-เพลต (graphene nanoplate) และแกรฟีนออกไซด์ โดยเติมสารทั้งสองลงในพอลิแล็กติกแอซิด ในปริมาณเท่ากัน จากนั้นขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ในการทดลองจะเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ 2 ภาวะ คือ ภาวะที่ฟิล์มไม่มีการอบไล่ตัวทำละลายก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยมีตัวทำละลายเหลืออยู่ในฟิล์มประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และภาวะที่สอง ฟิล์มถูกนำไปอบไล่ตัวทำละลายก่อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีตัวทำละลายหลงเหลือในฟิล์ม พบว่าภาวะแรกเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ายังสัมดูล์สและค่าความเค้นจุดคราก (yield strength) เพิ่มขึ้นร้อยละ 115 และ 95 ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกับการเติมแกรฟีนนาโนเพลตปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก โดยทำให้ค่ายังสัมดูล์สและค่าความเค้นจุดครากเพิ่มขึ้นร้อยละ 156 และ 129 ตามลำดับ สำหรับในภาวะที่สอง เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์และแกรฟีนนาโนเพลตปริมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ายังสัมดูล์สเพิ่มขึ้นร้อยละ 85 และค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แกรฟีนออกไซด์สามารถเสริมแรงให้กับพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีพอ ๆ กับแกรฟีน เหตุผลเนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ซึ่งสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ติดกับหมู่ฟังก์ชันบนพอลิแล็กติกแอซิดได้ แต่ทั้งแกรฟีนออกไซด์และแกรฟีนนาโนเพลตสามารถทำหน้าที่เสริมแรงได้ดีเมื่อเติมในปริมาณน้อยเท่านั้น เมื่อเติมมากกว่าร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักพบว่าแกรฟีนออกไซด์และแกรฟีนนาโนเพลตเกิดการเกาะกลุ่มกันและทำหน้าที่เสริมแรงได้ไม่ดี (Pinto et al., 2013)

นอกจากนี้แกรฟีนออกไซด์ยังถูกนำมาเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์อีกหลายชนิด โดย Wan และคณะ (2012) ได้นำพอลิเมอร์ 4 ชนิด ได้แก่ พอลิแอลแล็กติกแอซิด (poly(L-lactic acid)) พอลิคาร์โปแล็กโตน (poly(carpolactone)) พอลิสไตรีน (polystyrene) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่กราฟด้วยพอลิเอทิลีนโดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นตัวช่วย (high density polyethylene/maleic-anhydride grafted polyethylene) มาเสริมแรงด้วยแกรฟีนออกไซด์ ซึ่งใช้วิธีการผสมแบบใช้ตัวทำละลาย โดยแกรฟีนออกไซด์กระจายตัวในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พอลิแอลแล็กติกแอซิดละลายในคลอโรฟอร์ม (chloroform) พอลิคาร์โปแล็กโตนละลายในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พอลิสไตรีนละลายในโทลูอีน (toluene) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงละลายในพาราไซลีน (p-xylene) หลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน พบว่าเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักในพอลิคาร์โปแล็กโตน ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งและเปราะมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง ค่ายังสัมดูล์สและค่าพลังงาน ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นร้อยละ 77, 10 และ 60 ตามลำดับ สำหรับพอลิแอลแล็กติกแอซิดเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์จะทำให้ฟิล์มมีความเปราะมากขึ้น เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักลงในพอลิแอลแล็กติกแอซิดและพอลิสไตรีนจะทำให้ค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 28 และ 89 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำให้ค่ายังสัมดูล์สของพอลิ-

แอลเล็กทิกแอซิดและพอลิस्टรีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 59 และ 95 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกลับพบว่า ความเหนียวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลดลงและมีความเปราะมากขึ้นจนไม่สามารถวัดค่าความทนแรงดึงได้ และมีค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดน้อยมาก ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เสนอว่า ความสามารถในการกระจายตัวและการเสริมแรงของแกรฟีนออกไซด์ในพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ชนิด คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับแกรฟีนออกไซด์และความเข้ากันได้ของตัวทำละลายที่ใช้ สำหรับพอลิस्टรีนที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่ แต่แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดี เนื่องจากหมู่เบนซิลของพอลิस्टรีนและวงอะโรมาติกของแกรฟีนออกไซด์สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันได้ จึงทำให้แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวในพอลิस्टรีนได้ดี แต่ในกรณีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่าแกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้น้อย จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่ดีซึ่งมีสาเหตุมาจากตัวทำละลายที่ใช้คือพาราไซลีนและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ไม่สามารถละลายเข้ากันได้ จึงทำให้โอกาสที่แกรฟีนออกไซด์จะเข้าไปแทรกตัวในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีน้อยมาก และนอกจากนี้แกรฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วสูงจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้น้อยมาก เพราะตัวพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นความเข้ากันได้ของตัวทำละลาย และความสามารถในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแกรฟีนออกไซด์และพอลิเมอร์ จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกระจายตัวและการเสริมแรงของแกรฟีนออกไซด์ (Wang et al., 2012)

หลังจากนั้น Wan และ Chen (2013) ได้นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมกับแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อย เพื่อเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งใช้วิธีการผสมแบบใช้ตัวทำละลาย โดยนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตละลายในคลอโรฟอร์ม ผสมกับแกรฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ปริมาณของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมมีค่าร้อยละ 0, 0.3, 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง ค่ายังสมอดูลัสและความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นร้อยละ 53, 70 และ 12 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ในปริมาณเดียวกัน แกรฟีนออกไซด์สามารถเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ดีกว่า เนื่องจากลักษณะรูปร่างของแกรฟีนออกไซด์ที่เป็นแผ่นซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าสามารถทำหน้าที่เสริมแรงได้ดีกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นท่อ และนอกจากนี้หมู่ฟังก์ชันบนแกรฟีนออกไซด์สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกับหมู่คาร์บอนิลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ จึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าสูงขึ้นและพอลิเมอร์มีความแข็งมากขึ้น สำหรับสมบัติทางด้านความร้อน เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์จะมีผลต่อจุดหลอมเหลว (melting temperature) น้อยมาก แต่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallinity temperature) คือเมื่อเพิ่มปริมาณแกรฟีนออกไซด์ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้น พิจารณาจากการเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิ

ภูมิภาคเกิดผลึกเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แกรฟีนออกไซด์ยังส่งผลต่อปริมาณผลึก โดยเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น ปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึก (nucleating agent) ทำให้สายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถจัดเรียงเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการเติมแกรฟีนออกไซด์จึงมีส่วนช่วยในการเสริมแรงและเพิ่มปริมาณผลึกให้กับพอลิบิว-ทิลีนซัคซิเนตได้ (Wan and Chen, 2013)

นอกจากแกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ได้แล้ว แกรฟีนออกไซด์ยังสามารถช่วยเร่งให้เกิดกระบวนการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolytic degradation) ได้อีกด้วย โดย Du และคณะ (2016) ได้ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและแกรฟีนออกไซด์เข้าด้วยกัน เพื่อศึกษาผลของแกรฟีนออกไซด์ที่มีต่อการเกิดผลึกและการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ผู้วิจัยได้วัดค่ามุมของหยดน้ำเพื่อพิจารณาความมีขั้วของพอลิบิวทิลีน/แกรฟีนออกไซด์คอมพอสิต พบว่าค่ามุมหยดน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าเท่ากับ 75.3 องศา และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่ามุมของหยดน้ำลดลงเหลือ 60.4 องศา แสดงให้เห็นว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้คอมพอสิตมีขั้วสูงขึ้นและความสามารถในการดูดซึมน้ำดีขึ้น จึงทำให้ค่ามุมของหยดน้ำลดลง สำหรับการทดสอบการย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสพบว่า เมื่อผ่านไป 216 ชั่วโมง น้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังคงเหลืออยู่ถึงร้อยละ 95.2 และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าเวลาผ่านไป 120 ชั่วโมง ส่งผลให้น้ำหนักของคอมพอสิตเหลือน้อยกว่าร้อยละ 30 ดังนั้นแกรฟีนออกไซด์จึงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสได้ (Du et al., 2016)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนและวิธีการทดลอง
- 3.1.3 จัดหาวัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง
- 3.1.4 ศึกษาการใช้เครื่องมือขึ้นรูปและเครื่องมือทดสอบ
- 3.1.5 สังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีของฮัมเมอร์
- 3.1.6 เตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรไฟีนออกไซด์คอมพอสิต ด้วยวิธีการผสมในตัวทำละลาย ในอัตราส่วนต่าง ๆ
- 3.1.7 ขึ้นรูปชิ้นงานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรไฟีนออกไซด์คอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน
- 3.1.8 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซึมน้ำ และสมบัติการย่อยสลายด้วยเบสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรไฟีนออกไซด์คอมพอสิต
- 3.1.9 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS)	FZ91PM สำหรับงานฟิล์ม	PTT MCC Biochem Company Limited/ประเทศไทย
แกรไฟต์ (graphite)	-	Sigma-Aldrich/ประเทศ
กรดซัลฟูริก (sulfuric acid, H ₂ SO ₄)	เกรดวิเคราะห์	RCI Labscan/ประเทศไทย

วัตถุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate, KMnO ₄)	เกรดวิเคราะห์	RCI Labscan/ประเทศไทย
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H ₂ O ₂) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 30	เกรดวิเคราะห์	Ajax Finechem Pty Ltd./ ประเทศออสเตรเลีย
คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl ₃)	เกรดวิเคราะห์	RCI Labscan/ประเทศไทย
ไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ (dimethylformamide, DMF)	เกรดวิเคราะห์	RCI Labscan/ประเทศไทย
ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (microcrystalline cellulose, MCC) ขนาด 20 ไมโครเมตร	เกรดวิเคราะห์	Sigma-Aldrich/ประเทศ สหรัฐอเมริกา
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)	เกรดวิเคราะห์	Ajax Finechem Pty Ltd./ ประเทศออสเตรเลีย
น้ำปราศจากไอออน (deionized water)	-	RCI Labscan/ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
เครื่องกวนแบบเชิงกล (mechanical stirrer)	EUROSTAR รุ่น RW-20
ตู้อบ (hot air oven)	Memmer รุ่น UNB 400
เครื่องชั่งดิจิตอล (digital balance) ทศนิยม สองตำแหน่ง	Mettler Toldo รุ่น AB204-S/FACT
เครื่องชั่งดิจิตอล (digital balance) ทศนิยมสี่ ตำแหน่ง	Mettler Toldo รุ่น AB204-S/FACT

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
เครื่องกวนสารแบบใช้ความร้อน (hot plate)	Heidolph
เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuged machine)	Med inter รุ่น Senova TD5M-WS
เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonication)	Wisd Laboratory Instrument รุ่น WUC-D06H
เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)	Labtech Engineering รุ่น LP20-b
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	Bruker รุ่น D8 Advance
เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)	Thermo Scientetific รุ่น Nicolet 6700
เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA)	NETZSCH รุ่น 209F3 Tarsus
เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC)	Mettler Toldo รุ่น DSC1/STAR ^e
เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine)	Hounfield รุ่น H10KM
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	Hitachi รุ่น SU3500

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์

3.4.1.1 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์

การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยใช้วิธีของฮัมเมอร์ (Hummers' method) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เริ่มจากเติมผงแกรไฟต์ปริมาณ 20 กรัม ลงในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 98 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวน 5 นาที แล้วจึงเติมโซเดียมไนเตรตปริมาณ 10 กรัม โดยใช้อ่างน้ำแข็งรองด้านล่างเพื่อลดอุณหภูมิ กวนสารผสมเป็นเวลา 30 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมโพแทสเซียม-

เปอร์แมงกาเนตปริมาณ 60 กรัม อย่างช้า ๆ แล้วกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำอ่างน้ำแข็งออกและเปลี่ยนไปใช้อ่างน้ำมันแทน แล้วจึงปรับอุณหภูมิของสารผสมให้สูงขึ้นประมาณ 35 องศาเซลเซียส และกวนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 720 มิลลิลิตร ส่งผลให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มเป็น 98 องศาเซลเซียส และกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเทสารผสมลงในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 2,280 มิลลิลิตร และกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที พร้อมทั้งลดอุณหภูมิให้กลับสู่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงหยุดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 ลงในสารผสมจนไม่เกิดฟองอากาศ จากนั้นทิ้งให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 1 คืน แล้วจึงนำตะกอนแกรไฟต์ออกไซด์มาปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยง แสดงดังรูปที่ 3.1 และนำตะกอนสีน้ำตาลเข้มที่ได้เทใส่จานเพาะเชื้อ แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน จะได้แผ่นแกรไฟต์ออกไซด์ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม วิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.2

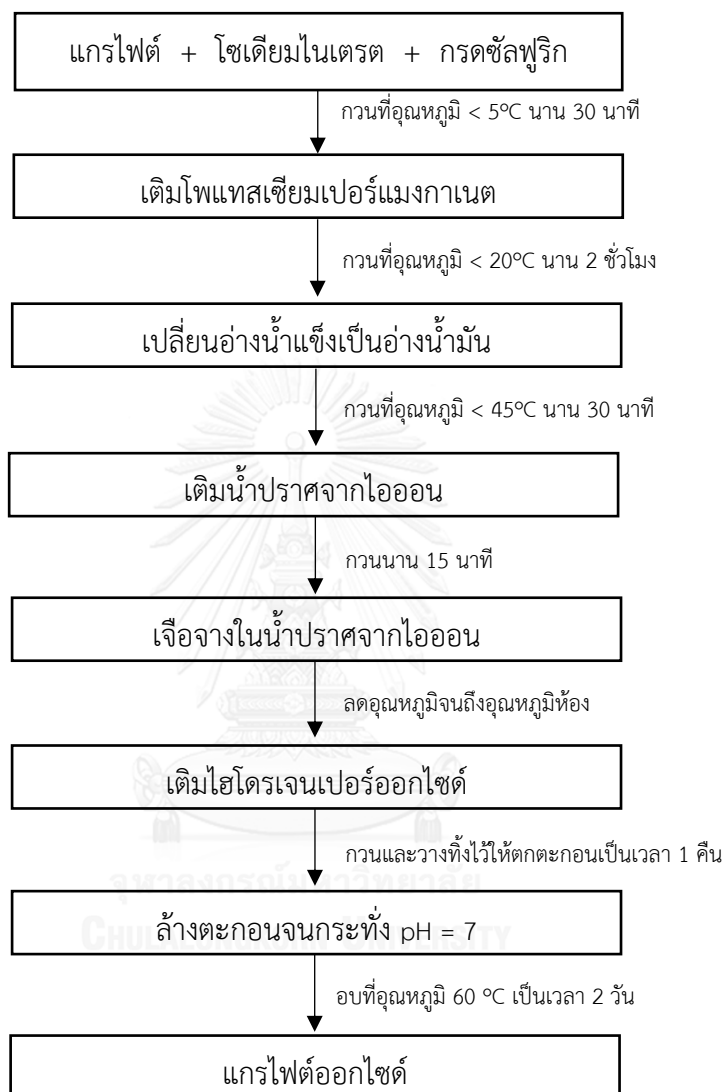


รูปที่ 3.1 เครื่องปั่นเหวี่ยงยี่ห้อ Med inter รุ่น Senova TD5M-WS

3.4.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์

เริ่มจากการเติมแกรไฟต์ออกไซด์ปริมาณ 5 กรัม ลงในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วนำไปสั่นโดยใช้คลื่นความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ดังรูปที่ 3.3 ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งเกิดเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที สารแยกเป็น 2 ชั้น แกรไฟต์ออกไซด์กระจายตัวอยู่ในน้ำ สำหรับตะกอนที่อยู่ด้านล่างคือแกรไฟต์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และแกรไฟต์ออกไซด์ที่ไม่เกิดการลอกเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นเทสารละลายส่วนที่อยู่ด้านบนใส่จานเพาะเชื้อ และนำไปอบที่

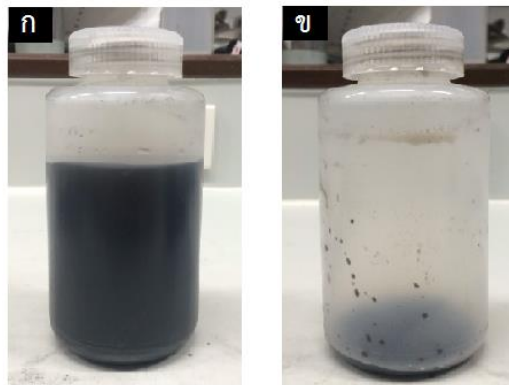
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้แกรไฟต์ออกไซด์เป็นแผ่นสีน้ำตาลเข้ม ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.5



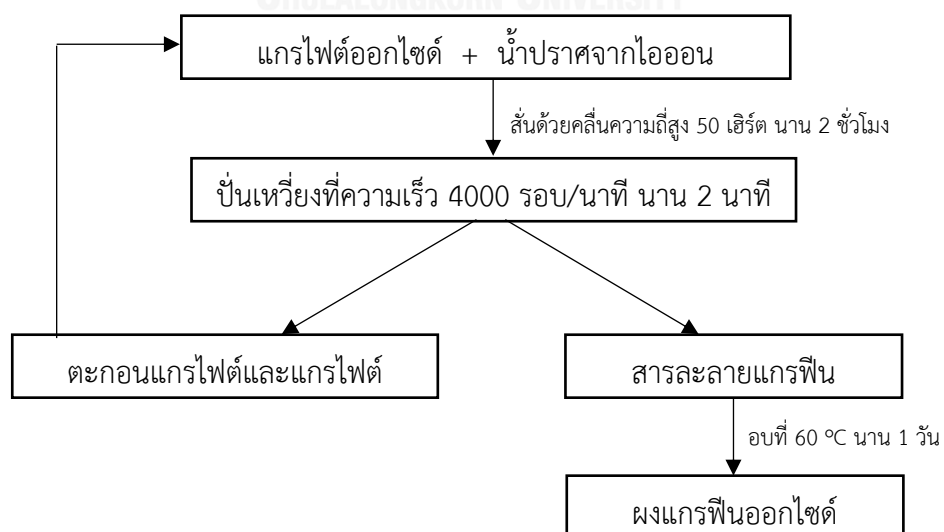
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์



รูปที่ 3.3 เครื่องอัลตราโซนิกยี่ห้อ Wisd Laboratory Instrument รุ่น WUC-D06H



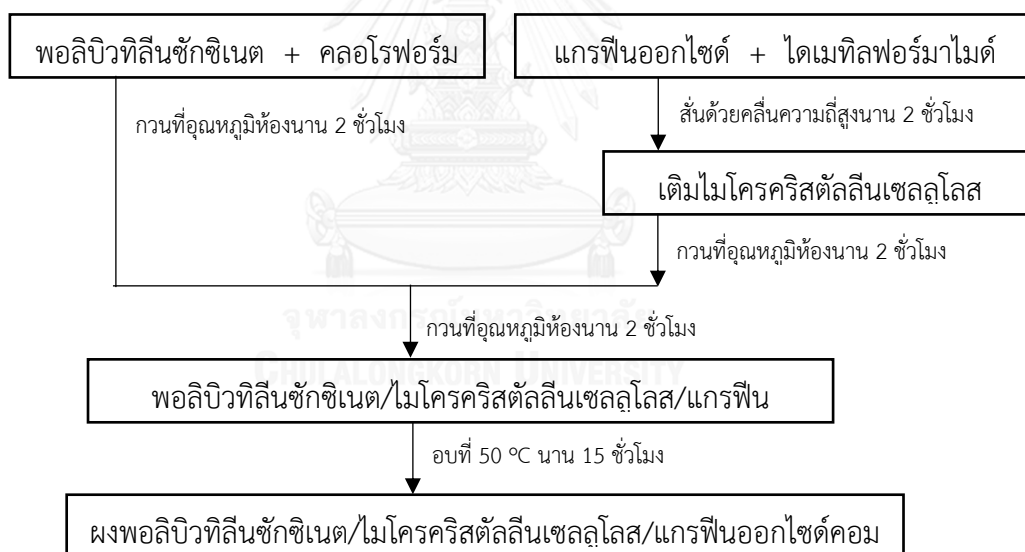
รูปที่ 3.4 (ก) สารละลายแกรฟีนออกไซด์ (ข) ตะกอนแกรไฟต์และแกรไฟต์ออกไซด์ที่ไม่เกิดการลอกเป็นแกรฟีนออกไซด์



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์

3.4.2 การเตรียมคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

การเตรียมคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ โดยใช้วิธีผสมด้วยสารละลาย เริ่มจากนำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและผงไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงในคลอโรฟอร์มด้วยความเข้มข้น 70 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเตรียมแกรฟีนออกไซด์ในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างคลอโรฟอร์ม : ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ คือ 70 : 30) แล้วจึงนำไปสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง 50 เฮิร์ตเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงในสารละลายแกรฟีนออกไซด์และกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงเทสารละลายทั้งสองผสมกัน กวนต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนได้เป็นสารผสมสีน้ำตาลเข้ม สารผสมถูกเทใส่จานเพาะเชื้อและนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ได้เป็นผงสีเทาอ่อน ขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 3.6 และอัตราส่วนต่าง ๆ ของคอมพอสิตที่เตรียม แสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิต

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แกรฟีนออกไซด์ และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส โดยกำหนดให้น้ำหนักของแกรฟีนออกไซด์คงที่

ตัวอย่าง	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P)	แกรฟีนออกไซด์ (G)	ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (M)
P	100	-	-
PG	99	1	-
PGM5	94	1	5
PGM10	89	1	10
PGM15	84	1	15
PGM20	79	1	20

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แกรฟีนออกไซด์และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส โดยกำหนดให้น้ำหนักของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคงที่

ตัวอย่าง	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P)	แกรฟีนออกไซด์ (G)	ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (M)
P	100.0	-	-
PM	95.0	-	5
PMG0.1	94.9	0.1	5
PMG0.3	94.7	0.3	5
PMG0.5	94.5	0.5	5
PMG1	94.0	1	5
PMG2	93.0	2	5
PMG3	92.0	3	5

3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

ก่อนการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ผงคอมพอสิตถูกนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบที่มีความหนา 0.2 มิลลิเมตร ความกว้าง 8 เซนติเมตร และความยาว 16 เซนติเมตร โดยเริ่มจากชั่งผงคอมพอสิตปริมาณ 5 กรัม เทใส่แม่แบบ แล้วจึงนำเข้า

เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนดังรูปที่ 3.7 โดยภาวะที่ใช้สำหรับการทำงานของเครื่องแสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนยี่ห้อ Labtech Engineering รุ่น LP20-b

ตารางที่ 3.5 ภาวะที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

อุณหภูมิที่ใช้ตลอดการทำงาน	140 องศาเซลเซียส
ความดัน	5 เมกะปาสคาล
ระยะเวลาในการหลอมสาร	8 นาที
จำนวนครั้งในการกดอัดเพื่อไล่ฟองอากาศ	3 ครั้ง
ระยะเวลาในการกดอัดเพื่อกำจัดฟองอากาศต่อครั้ง	0.5 นาที
ระยะเวลาในการกดอัด	5 นาที
ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ	20 นาที

3.4.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์

3.4.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี

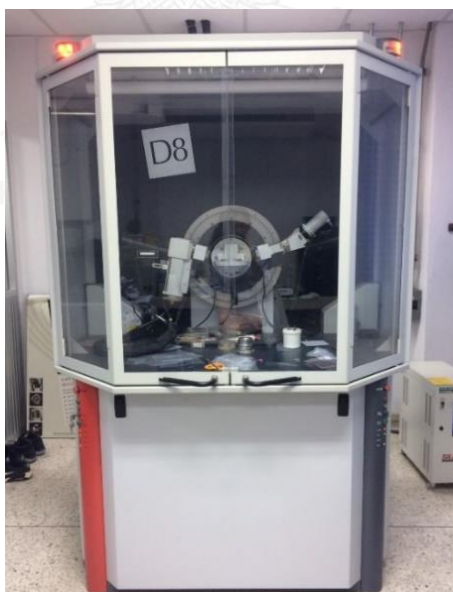
การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยดูหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.8 ในช่วงเลขคลื่น $400\text{-}3,800\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo Scientetic รุ่น Nicolet 6700

3.4.4.2 การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก

การวิเคราะห์ลักษณะของแกรไฟต์และแกรไฟนออกไซด์ โดยดูระยะห่างระหว่างชั้นคาร์บอนที่เปลี่ยนไปด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยแสกนในช่วง $2\theta = 5-60$ องศา กระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 1.5406 แอมแปร์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.9 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.4.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคอมพอลิเมอร์พอลิไวนิลซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน เซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

3.4.5.1 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของผงคอมพอลิเมอร์

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของผงคอมพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ภายใต้เทคนิคแบบให้ความร้อน-ทำให้เย็นตัว-ให้ความร้อน (heating-cooling-heating) ในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและอัตราการทำให้เย็นตัวที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ปริมาณผลึกของพอลิไวนิลซัคซิเนตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 (Wan and Chen, 2013)

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^\circ \times (1-W_f)} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

โดยที่ ΔH_c คือ เอนทาลปีของการเกิดผลึกขณะให้ความเย็นตัวแก่ตัวอย่าง มีหน่วยเป็น จูล/กรัม (J/g)

ΔH_m° คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ของพอลิไวนิลซัคซิเนตบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น จูล/กรัม โดยเป็นค่าคงที่คือ 110.3 จูล/กรัม

W_f คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมลงในฟิล์มคอมพอลิเมอร์



รูปที่ 3.10 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR^c

3.4.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอมพอลิเมอร์ภายใต้ความร้อน

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอมพอลิเมอร์ภายใต้ความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวของคอมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยทดสอบสารภายใต้ภาวะอุณหภูมิตั้งแต่ 35 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



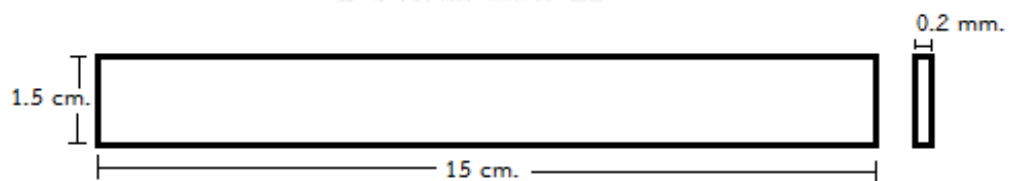
รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ยี่ห้อ Netzsch รุ่น TG 209 F3 Tarsus

3.4.5.3 การทดสอบความทนแรงดึง

การทดสอบความทนแรงดึง ณ จุดขาด (tensile strength at break) ค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus) และความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยขนาดชิ้นงานมีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความหนา 0.20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.13 โดย Load cell ที่ใช้ในการทดสอบคือขนาด 500 นิวตัน และที่ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราเร็วในการดึง 12.5 มิลลิเมตร/นาที และระยะการวัด (gauge length) 8 เซนติเมตร



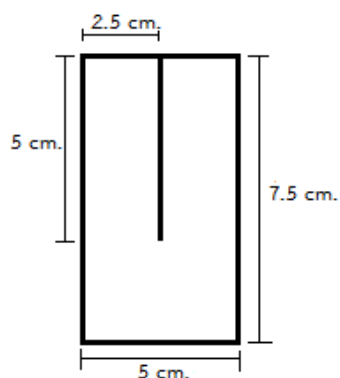
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ยี่ห้อ Hounfield รุ่น H10KM



รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดึง

3.4.5.4 การทดสอบความทนแรงฉีกขาด

การทดสอบความทนแรงฉีกขาด (tear resistance) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D1938 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 2.5 เซนติเมตร ความยาว 7.5 เซนติเมตร และความหนา 0.20 มิลลิเมตร และชิ้นงานมีรอยขาดช่วงกึ่งกลางของด้านกว้างเป็นระยะ 5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.14 ทดสอบโดยใช้ load cell ขนาด 50 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.14 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงฉีกขาด

3.4.5.5 การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยา

การทดสอบลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิ-เนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการหักหลังจุ่มในไนโตรเจนเหลว ซึ่งตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ต้องเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater การวิเคราะห์ที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า 1,000 เท่า และ 3,000 เท่า

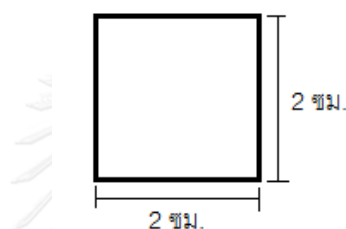


รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500

3.4.5.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ใช้แผ่นฟิล์มขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร และความหนา 0.20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.16 เริ่มจากนำแผ่นฟิล์มไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปชั่งน้ำหนัก และกำหนดเป็นน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) แล้วจึงนำแผ่นฟิล์มไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง และบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนไปในระยะเวลา 7 วัน โดยนำฟิล์มออกมาเช็ดด้วยผ้าสะอาด แล้วจึงชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว น้ำหนักที่ได้คือน้ำหนักที่เปลี่ยนไป (W_n) ร้อยละของการดูดซึมน้ำของแผ่นฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = ((W_n - W_0)/W_0) \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$



รูปที่ 3.16 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ

3.4.5.7 การทดสอบการย่อยสลายด้วยเบส

การทดสอบการย่อยสลายด้วยเบส (hydrolytic degradation) ใช้แผ่นฟิล์มขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร แสดงดังรูป 3.16 เริ่มจากการนำแผ่นฟิล์มไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปชั่งน้ำหนัก และกำหนดเป็นน้ำหนักเริ่มต้น (H_0) แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH = 13 ที่อุณหภูมิห้อง บันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุก 24 ชั่วโมง โดยนำแผ่นฟิล์มออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วจึงเช็ดด้วยผ้าสะอาด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำแผ่นฟิล์มมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่ได้คือน้ำหนักที่เปลี่ยนไป (H_n) ร้อยละของน้ำหนักที่เหลือของแผ่นฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่เหลือ} = (H_n / H_0) \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

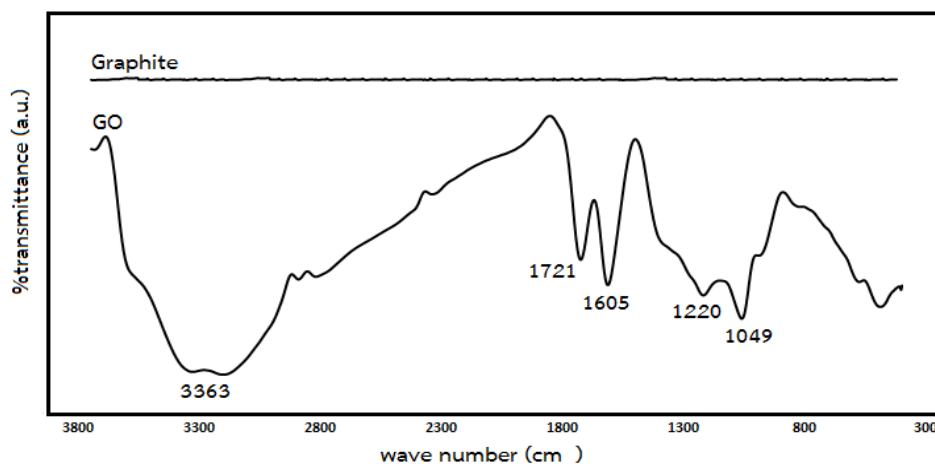
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

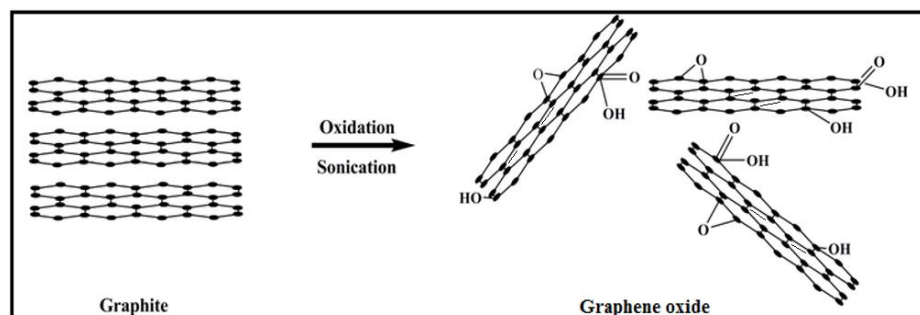
4.1 สมบัติของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์

4.1.1 หมู่ฟังก์ชันทางเคมี

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์เทียบกับแกรไฟต์ พบว่าไม่มีพีกปรากฏบนสเปกตรัมของแกรไฟต์ แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากโครงสร้างของแกรไฟต์ประกอบด้วยระนาบของคาร์บอนเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4.2 แต่เมื่อนำแกรไฟต์ไปเติมออกซิเจนโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันจนเกิดเป็นแกรฟีนออกไซด์ พบว่าสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์มีพีกปรากฏและตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันบนแกรฟีนออกไซด์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic) อะโรมาติก (aromatic) และหมู่อีพอกซี (epoxy) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ (GO)



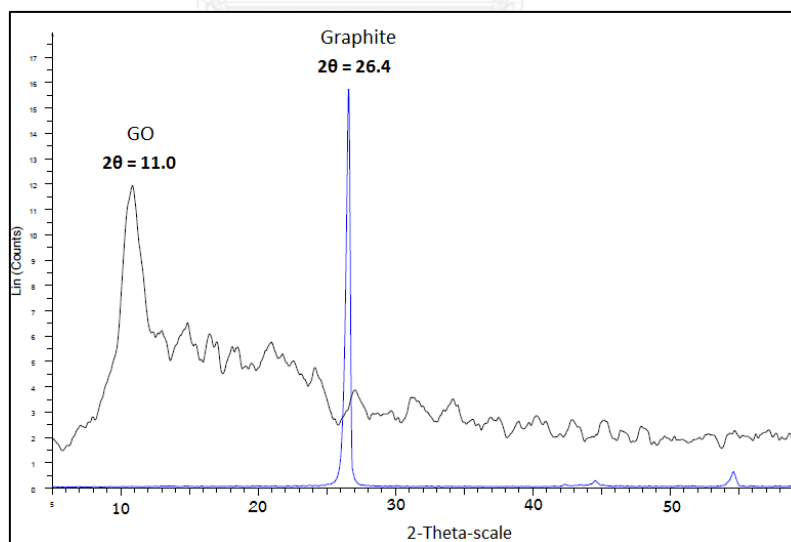
รูปที่ 4.2 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ (Jang et al., 2014)

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ที่ปรากฏบนอินฟราเรดสเปกตรัม

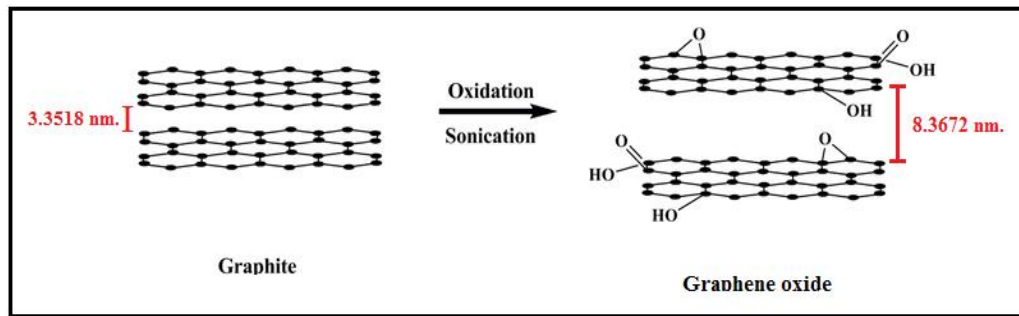
เลขคลื่น (cm ⁻¹)	การสั่นของพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน
3363	O-H stretching	หมู่ไฮดรอกซิล
1721	C=O stretching	หมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลิก
1605	C=C stretching	วงอะโรมาติก
1220 และ 1049	C-O-C stretching	หมู่อีพอกซี

4.1.2 การจัดเรียงตัวของผลึก

การศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นคาร์บอนของผลึกแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ จากการวิเคราะห์พบว่า แกรไฟต์แสดงพีกที่มีความเข้มสูงสุดที่ $2\theta = 26.4$ องศา แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยมีค่าความกว้างระหว่างระนาบคาร์บอน (d-spacing) เท่ากับ 3.3518 นาโนเมตร สำหรับแกรไฟต์ที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นแกรฟีนออกไซด์ ปรากฏพีกที่ $2\theta = 11.0$ องศา แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยมีความกว้างระหว่างระนาบคาร์บอนเท่ากับ 8.3672 นาโนเมตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความกว้างระหว่างระนาบคาร์บอนเกิดจากการที่แกรไฟต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเป็นการเพิ่มออกซิเจนเข้าไปสร้างพันธะกับคาร์บอน เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จึงทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอนเพิ่มขึ้น (Konios et al., 2014) แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 เอกซเรย์สเปกตรัมของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ (GO)



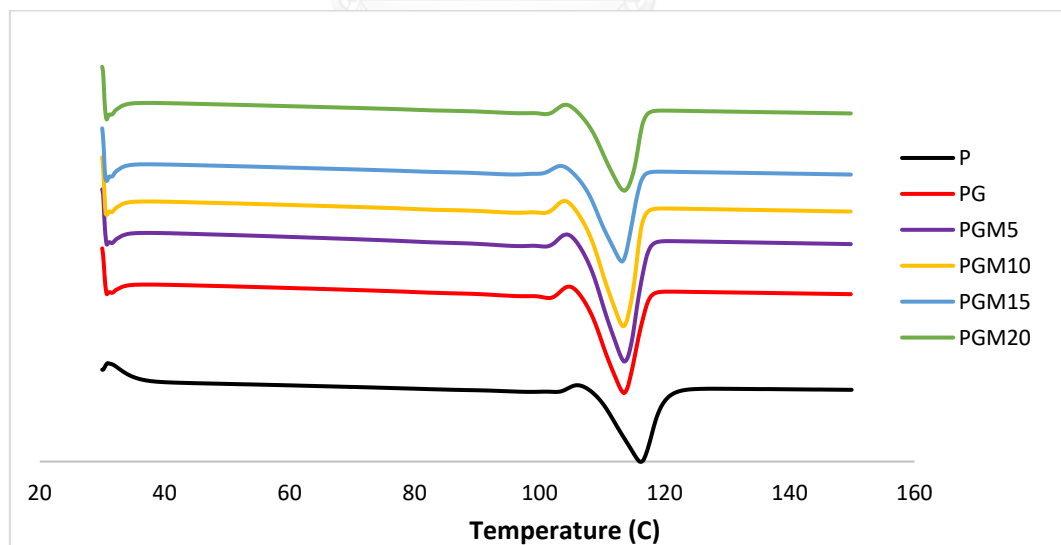
รูปที่ 4.4 ระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอนของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ (Jang et al., 2014)

4.2 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) เมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์คงที่ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)

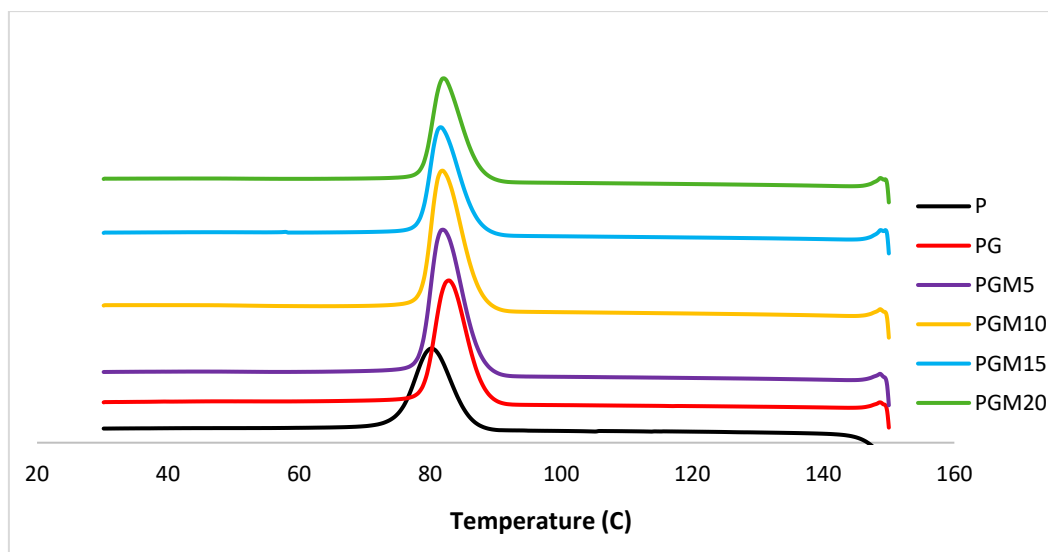
4.2.1 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PGM

4.2.1.1 อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกและปริมาณผลึก

การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยศึกษา อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) แสดงผลดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตารางที่ 4.2 และภาคผนวก ก



รูปที่ 4.5 รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) และคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) ขณะให้ความร้อนครั้งที่สอง



รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) และคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มี ปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) ขณะลดอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของ PBS (P) และคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	T_c (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
P	80.4	116.3	38.6
PG	83.3	113.5	48.4
PGM5	82.5	113.7	62.8
PGM10	82.3	113.5	63.3
PGM15	82.0	113.2	50.7
PGM20	82.4	113.6	48.9

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของ P, PG และ PGM ด้วยเทคนิคดีฟ-เฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี โดยศึกษาอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง ซึ่งเป็นการให้ความร้อนโดยไม่มีประวัติทางความร้อน (thermal history) มาเกี่ยวข้อง สำหรับอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ศึกษาจากกราฟการเย็นตัว (cooling curve)

เนื่องจากเป็นช่วงที่สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทำให้เกิดเป็นผลึก สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยภาวะการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

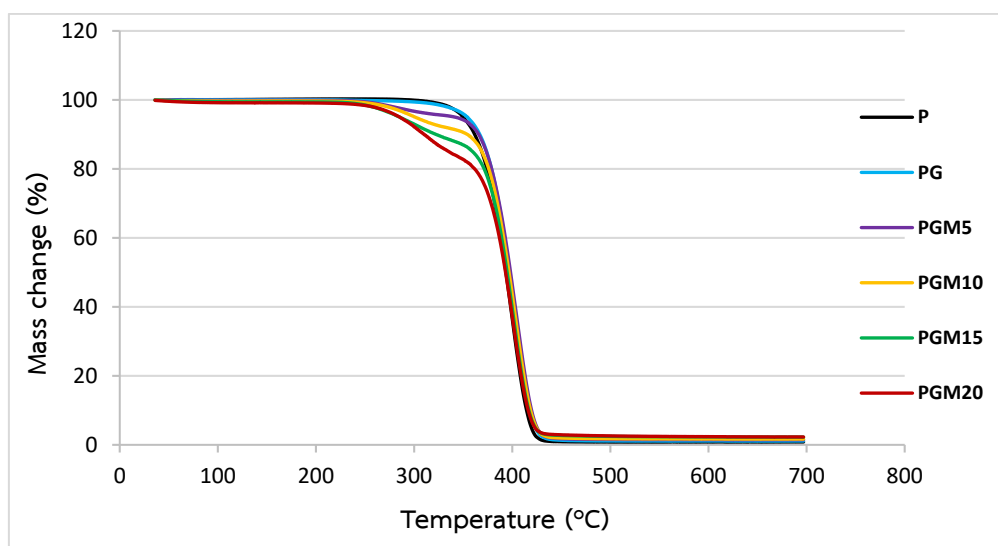
จากการศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสพบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสูงขึ้น จาก 80.4 เป็น 83.3 องศาเซลเซียส นั่นคือเมื่อลดอุณหภูมิลง สายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเคลื่อนที่มาก่อผลึกได้เร็วขึ้น แสดงว่าแกรฟีนออกไซด์มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงไป พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้ปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เติมลงไป (ร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก) ไม่มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 82 องศาเซลเซียส

สำหรับอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) คืออุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้อผลึกหลอมและสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จากตารางที่ 4.2 พบว่า อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าประมาณ 116.3 องศาเซลเซียส เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์พบว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกลดลงเหลือ 113.5 องศาเซลเซียส นั่นคือแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหลอมได้เร็วขึ้น แต่การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงในคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wang และคณะ (2009) ที่พบว่าไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Wang et al., 2009)

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกพบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีปริมาณมากขึ้นประมาณร้อยละ 25 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ อธิบายได้ว่าแกรฟีนออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกที่ดี ทำให้สายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเคลื่อนตัวมาจัดเรียงเป็นผลึกบนระนาบของแกรฟีนออกไซด์ได้ (Pinto et al., 2013) เมื่อมีการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของผลึกเพิ่มขึ้นร้อยละ 63 แสดงว่าการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักสามารถทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกร่วมกับแกรฟีนออกไซด์ได้ดีจึงทำให้ปริมาณของผลึกเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักกลับพบว่า ปริมาณของผลึกลดลง อธิบายได้ว่าเมื่อมีการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมากเกินไป สามารถขัดขวางการเคลื่อนตัวมาก่อผลึกของสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ จึงทำให้ปริมาณของผลึกลดลง

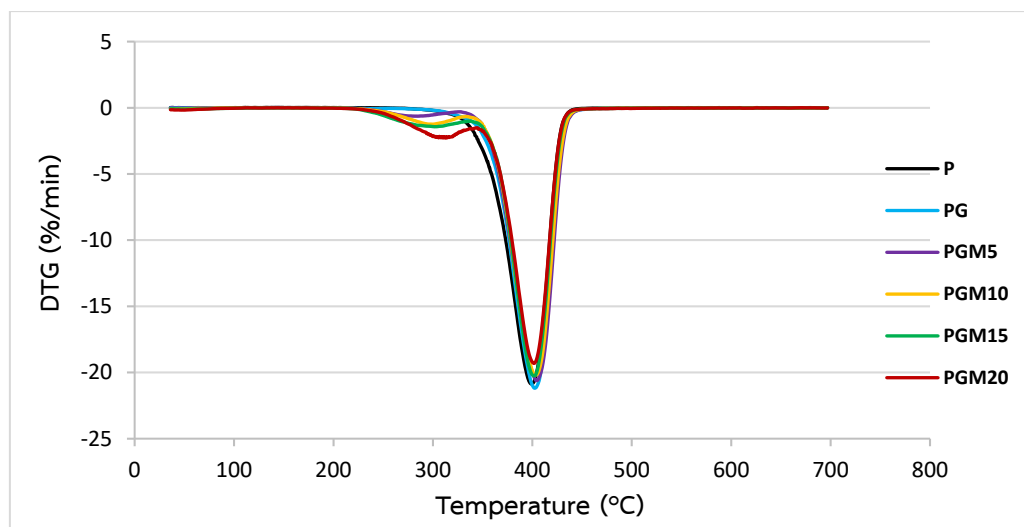
4.2.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) โดยศึกษาอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว (onset decomposition temperature, T_{onset}) อุณหภูมิที่สารสลายตัวมากที่สุด (maximum decomposition temperature, T_{max}) และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัว (endset decomposition temperature, T_{endset}) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ (P) คอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ข



รูปที่ 4.7 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/ MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

จากผลการทดลองพบว่า พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ (P) และคอมพอสิตพอลิ-บิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักช่วงเดียวอยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 369.6 - 420.3 องศาเซลเซียส ส่วนคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองช่วง โดยในช่วงแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 285-313 องศาเซลเซียส (T_{peak}) เป็นการสลายตัวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสบริสุทธิ์ ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 270 - 380 องศา-



รูปที่ 4.8 DTG เทอร์โมแกรม ของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มี ปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	การสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 1			การสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 2			
	T_{onset} (°C)	T_{peak} (°C)	น้ำหนักที่ เปลี่ยนแปลง (%)	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	T_{endset} (°C)	น้ำหนักที่ เปลี่ยนแปลง (%)
P	-	-	-	369.6	399.1	417.2	99.15
PG	-	-	-	373.9	402.5	420.3	98.88
PGM5	238.6	285.7	4.43	-	404.4	422.2	94.07
PGM10	259.9	300.3	8.09	-	403.0	420.8	90.20
PGM15	254.0	302.9	11.59	-	401.6	418.6	86.11
PGM20	270.0	313.7	16.58	-	401.5	418.1	81.14

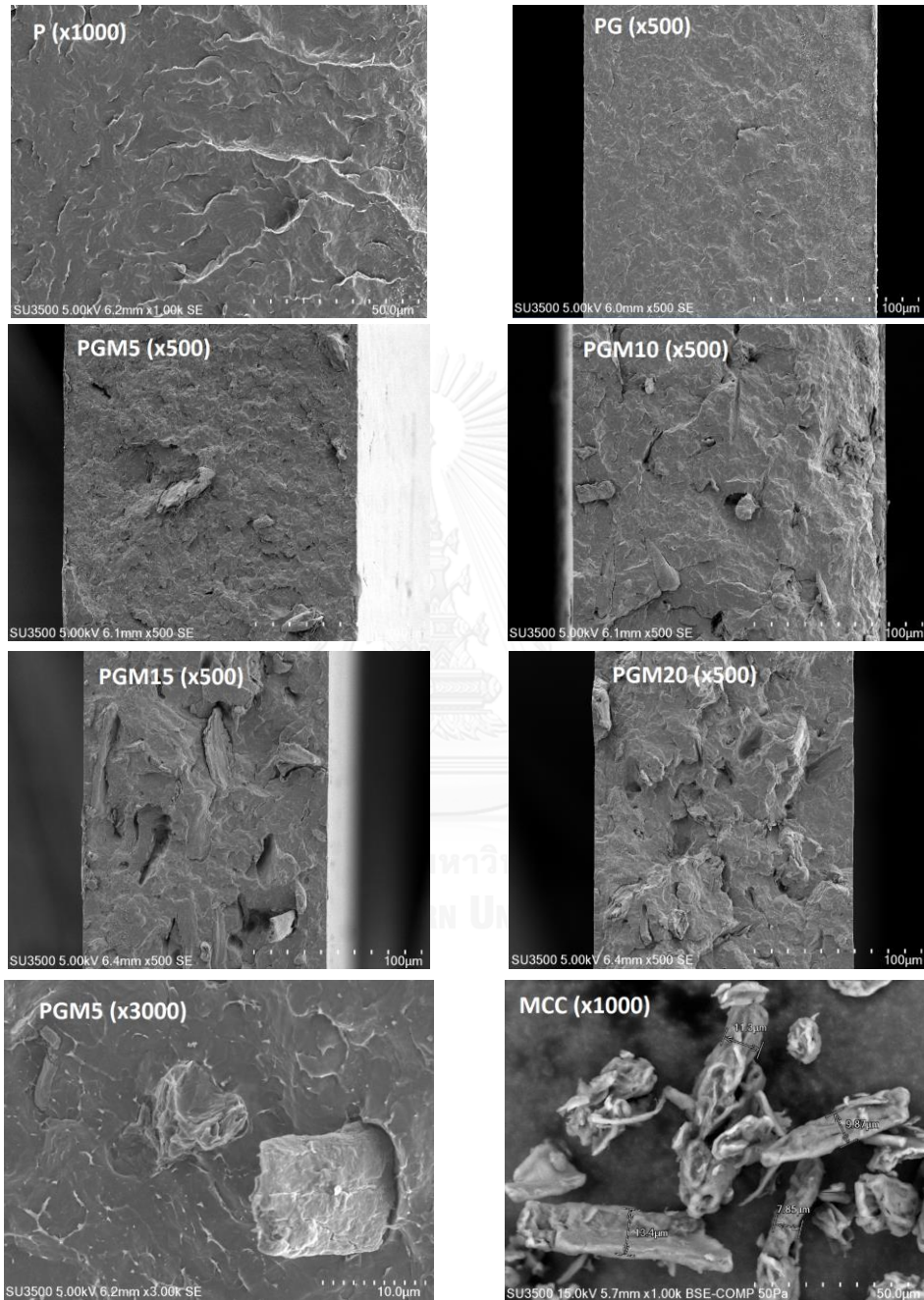
เซลเซียส (Vivekanandhan et al., 2012) นอกจากนี้ยังยืนยันได้จากร้อยละปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในการสลายตัวช่วงแรก โดยสอดคล้องกับน้ำหนักของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เดิมในคอมพอสิต สำหรับการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงที่สองของคอมพอสิต PGM เป็นการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ อีกทั้งน้ำหนักที่ลดลงยังสอดคล้องกับปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในคอมพอสิต PGM เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวมากที่สุด (T_{max}) พบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักสามารถเหนี่ยวนำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถทนความร้อนเพิ่มขึ้น 3 องศาเซลเซียส และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์สามารถทนความร้อนได้มากที่สุดเมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักทำให้การทนความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสถึงแม้ทำให้คอมพอสิตเริ่มสลายตัวด้วยความร้อนเร็วขึ้น แต่เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสามารถเหนี่ยวนำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถทนความร้อนได้มากที่สุด

4.2.2 สันฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต PGM

สันฐานวิทยาของภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (PGM) และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (MCC) แสดงดังรูปที่ 4.9

จากสันฐานวิทยาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ (PG) แต่เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ พบว่าพื้นผิวของฟิล์มคอมพอสิตมีความขรุขระมากขึ้นตามปริมาณของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เติมเข้าไป ทั้งนี้ความขรุขระดังกล่าวเกิดจากการกระจายตัวของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ ซึ่งความเข้ากันไม่ได้ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส เกิดขึ้นจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีเพียงพันธะเอสเทอร์ ซึ่งมีขั้วน้อยกว่าไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังสังเกตได้จากการมีช่องว่างระหว่างไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เช่นเดียวกับที่ Borba และคณะ (2014) เจาะช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีนไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ (styrene-butadiene-styrene triblock copolymer) เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวภายนอกระหว่างกันน้อย (Borba et al., 2014) แสดงตัวอย่างช่องว่างดังรูปที่ 4.9 (PGM5 (x3000)) และเมื่อสังเกตการกระจายตัวของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสในเนื้อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่า ไมโคร-

คริสตัลลีนเซลลูโลสสามารถกระจายตัวได้ดี แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 20 ไมโครคริสตัล-
ลีนเซลลูโลสเริ่มเกาะกลุ่มกัน ทำให้การกระจายตัวในเนื้อพอลิบิวทิลีนซัคซินเตลดลง

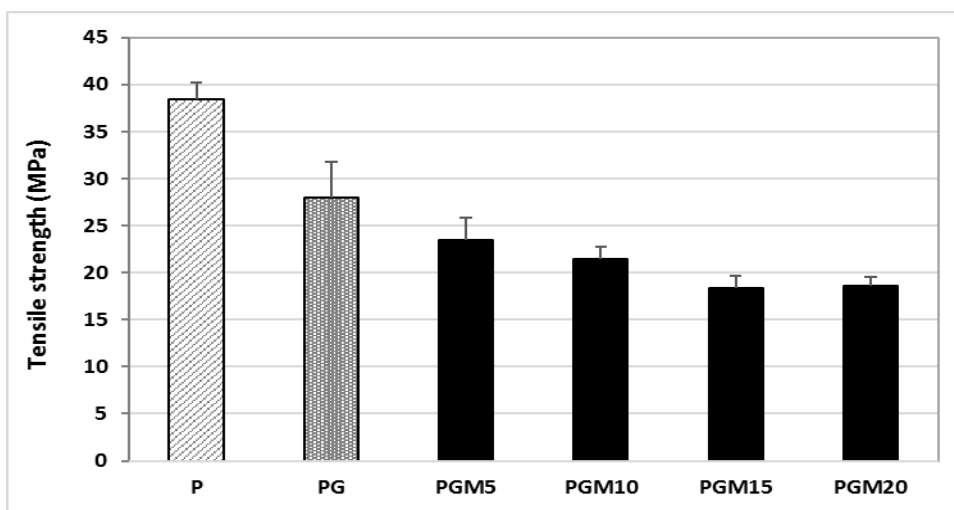


รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของภาคตัดขวางของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) ที่ผ่านการหักและสัณฐานวิทยาของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (MCC)

4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิต PGM

4.2.3.1 ความทนแรงดึง (tensile strength)

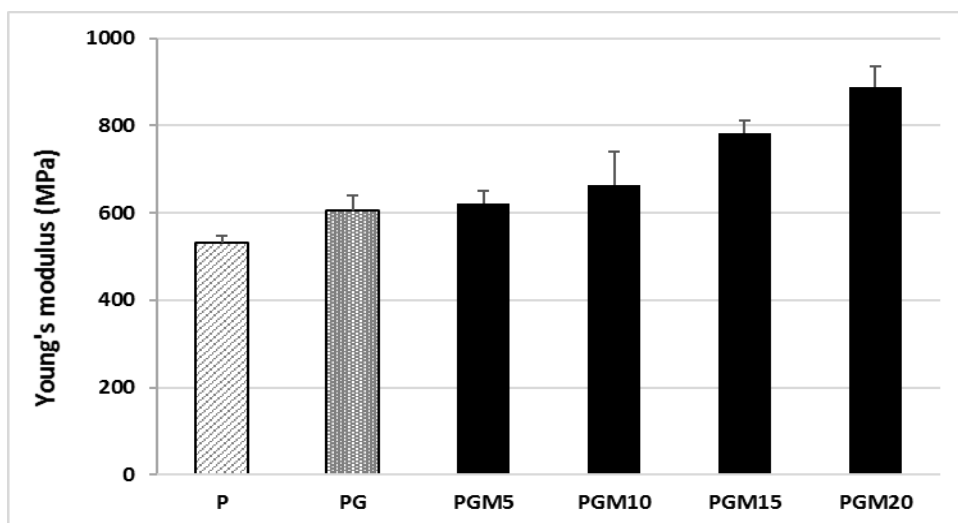
ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) แสดงดังรูปที่ 4.10 แสดงค่าในตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ค พบว่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลงร้อยละ 27 เมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นเพราะการเติมแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณมากทำให้เกิดการรวมกลุ่มกัน และทำหน้าที่เสริมแรงได้ไม่ดีจึงทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง (Pinto et al., 2013) นอกจากนี้พบว่าความทนแรงดึงของความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส เนื่องจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และปริมาณการเติมของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมากกว่าเมื่อเทียบกับแกรฟีนออกไซด์ ดังนั้นสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส จึงมีผลมาจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมากกว่าแกรฟีนออกไซด์ ทั้งนี้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็นอนุภาคที่มีความมีขั้วสูง ซึ่งต่างจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีขั้วต่ำ ดังนั้นสารทั้งสองชนิดจึงมีความเข้ากันได้น้อย พิจารณาจากลักษณะทางด้านสัญญาณวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสดังรูปที่ 4.9 อนุภาคของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ แต่ปรากฏช่องว่างระหว่างไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นั้นหมายความว่า ถึงแม้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสกระจายตัวได้ดีในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่ก็ไม่ได้สร้างพันธะที่ยึดติดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จึงทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของสารทั้งสองน้อย เมื่อให้แรงกระทำภายนอกแก่ฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าว ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสจึงทำหน้าที่ช่วยกระจายแรงจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ไม่ดี ค่าความทนแรงดึงจึงลดลง (Dufresne et al., 2003, Borba et al., 2014) เมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนแรงดึงลดลงร้อยละ 52 เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

4.2.3.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus)

ผลการวิเคราะห์ยั่งส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) แสดงดังรูปที่ 4.11 แสดงค่าดังตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ค ซึ่งค่ายั่งส์มอดุลัสคือค่าที่บอกถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุเมื่อมีความเค้นมากกระทำ (Wosang et al., 2017) ผลจากการทดลองพบว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ายั่งส์มอดุลัสของพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นร้อยละ 14 อีกทั้งยังพบว่าค่ายั่งส์มอดุลัสของฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเมื่อเทียบกับพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ แสดงว่าการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถคงรูปอยู่ได้มากขึ้นเมื่อมีแรงมากกระทำ โดยฟิล์มคอมพอสิตที่มีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีค่ายั่งส์มอดุลัสเพิ่มขึ้นร้อยละ 68 เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ จึงกล่าวได้ว่าการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสสามารถเพิ่มค่ายั่งส์มอดุลัสให้แก่คอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ได้

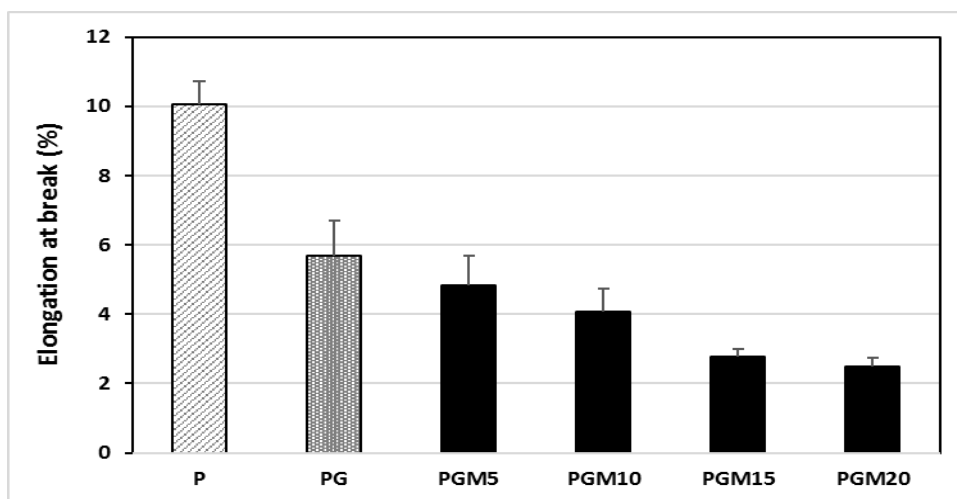


รูปที่ 4.11 ยังสัมมอดูลัสของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

4.2.3.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break)

ผลการวิเคราะห์ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) แสดงดังรูปที่ 4.12 แสดงค่าในตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ค ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดคือร้อยละการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น จากผลการทดลองพบว่าค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลงประมาณร้อยละ 44 เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นเพราะการเติมแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากขึ้น ดังตารางที่ 4.2 ทำให้ความยืดหยุ่นของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ลดลง ซึ่งแปรผันตามส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Wongchanapiboon, 2013) ค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดจึงลดลง นอกจากนี้ค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสดังตารางที่ 4.2 พบว่าการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสส่งผลให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง และมีส่วนที่เป็นผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณผลึกมากขึ้นทำให้ความยืดหยุ่นของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุจึงเป็นไปได้ยากขึ้น

ค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดจึงลดลง และนอกจากนี้การเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิไวนิลซัคซิเนต ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นน้อยลง เมื่อเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดจึงลดลงร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิไวนิลซัคซิเนตบริสุทธิ์

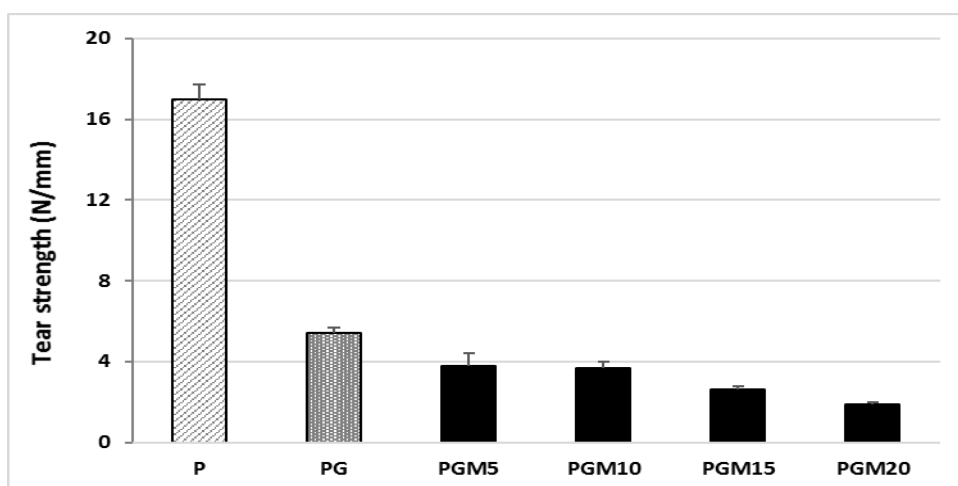


รูปที่ 4.12 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/ MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

4.2.3.4 ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิไวนิลซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิไวนิลซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิไวนิลซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (PGM) แสดงดังรูปที่ 4.13 แสดงค่าดังตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ค จากการศึกษพบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิไวนิลซัคซิเนตทำให้ลดความทนแรงฉีกขาดของพอลิไวนิลซัคซิเนตถึงร้อยละ 68 เนื่องจากการเติมแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มคอมพอสิตพอลิไวนิลซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์มีความเปราะมากขึ้น จึงส่งผลให้ความทนแรงฉีกขาดลดลง อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิไวนิลซัคซิเนตและฟิล์มคอมพอสิตพอลิไวนิลซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส พบว่าความสามารถในการทนแรงฉีกขาดของฟิล์มคอมพอสิตพอลิไวนิลซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมากขึ้น เนื่องจากการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสอาจทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้การ

เกิดช่องว่างระหว่างเฟสของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิวิทาไลน์ซิงค์ซิงเนตดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตเกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้น และเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดลดลงร้อยละ 88 เมื่อเทียบกับพอลิวิทาไลน์ซิงค์ซิงเนตบริสุทธิ์



รูปที่ 4.13 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

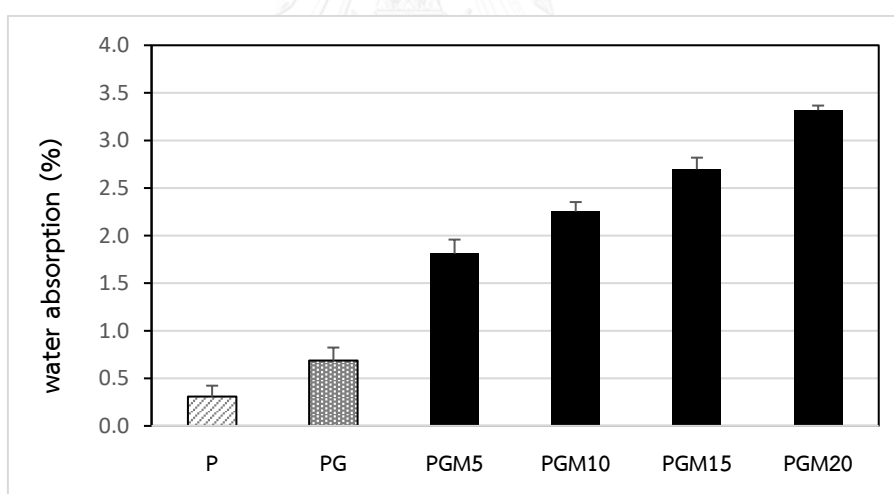
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBS (P) คอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ย้งส์มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืด ตัวสูงสุด ณ จุดขาด	ความทนแรง ฉีกขาด (นิวตัน/มิลลิเมตร)
P	38.4 ± 1.8	532.5 ± 14.5	10.1 ± 0.7	17 ± 0.7
PG	28.0 ± 3.8	606.5 ± 32.5	5.7 ± 1.0	5.4 ± 0.3
PGM5	23.4 ± 2.4	621.0 ± 28.8	4.8 ± 0.8	3.8 ± 0.6
PGM10	21.5 ± 1.3	663.0 ± 77.1	4.1 ± 0.7	3.7 ± 0.3
PGM15	18.4 ± 1.2	783.1 ± 27.2	2.8 ± 0.2	2.6 ± 0.2
PGM20	18.6 ± 0.9	888.1 ± 47.6	2.5 ± 0.2	1.9 ± 0.1

หมายเหตุ ความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงดังภาคผนวก ฉ

4.2.4 สมบัติการดูดซึมน้ำของฟิล์มคอมพอสิต PGM

จากการศึกษาการดูดซึมน้ำของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของฟิล์มก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ ซึ่งคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ผลแสดงดังรูปที่ 4.14 และภาคผนวก ง จากการศึกษพบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์สามารถช่วยให้ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดูดซึมน้ำได้เล็กน้อย ประมาณร้อยละ 0.38 เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีหมู่ไฮดรอกซิลบนระนาบคาร์บอน และเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเข้าไปพบว่าการดูดซึมน้ำดีขึ้นมาก ทั้งนี้การดูดซึมน้ำยิ่งมากขึ้นเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณมากขึ้น เพราะหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสสามารถเกิดแรงดึงดูดกับน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสจึงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการทำให้น้ำถูกดูดซึมเข้าสู่แผ่นฟิล์มได้ ซึ่งการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนักลงในคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ ทำให้การดูดซึมน้ำของฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าวเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 ถึง ร้อยละ 3.01



รูปที่ 4.14 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วันของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

นอกจากนี้ยังยืนยันได้ด้วยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) แสดงดังตารางที่ 4.5 จากการทดลองพบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่า 84.17 องศา ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบ

กับฟิล์มอื่น ๆ นั่นคือพอลิไควิไทลีนซึกซิเนตมีความไม่ชอบน้ำสูง แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 1) และเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเข้าไปร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเหลือ 77.33 องศา นั่นคือการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสสามารถเพิ่มความชอบน้ำให้แก่พอลิไควิไทลีนซึกซิเนตได้ ผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำ โดยฟิล์มที่สามารถดูดซึมน้ำได้ดีมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำ

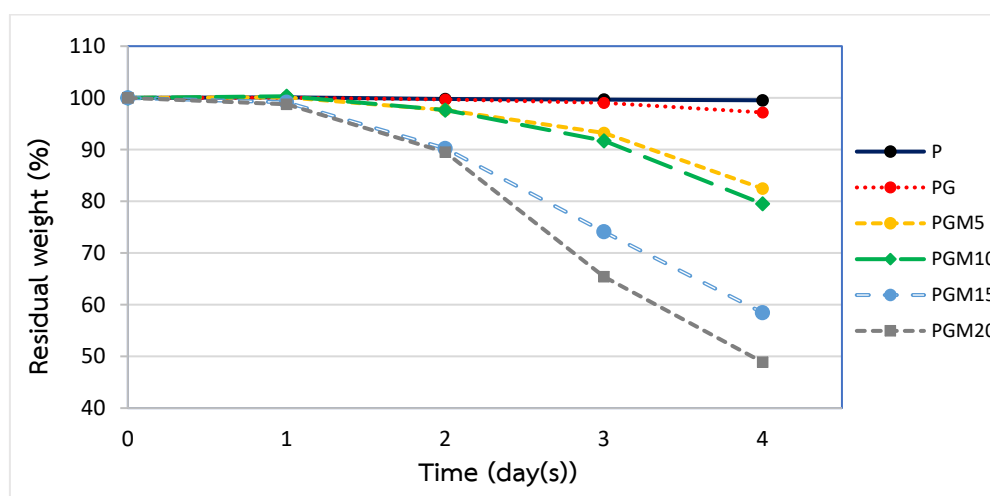
ตารางที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (องศา)
P	84.17 ± 5.2
PG	83.33 ± 3.1
PGM5	78.91 ± 2.1
PGM10	78.67 ± 3.3
PGM15	77.67 ± 2.1
PGM20	77.33 ± 5.4

4.2.5 สมบัติการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิต PGM

การศึกษาการย่อยสลายด้วยเบสที่ pH = 13 ของแผ่นฟิล์มพอลิไควิไทลีนซึกซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิไควิไทลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิไควิไทลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของแผ่นฟิล์มก่อนแช่ในสารละลายเบสและหลังแช่ในสารละลายเบส โดยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักฟิล์มที่เหลือ ผลแสดงดังรูปที่ 4.15 แสดงผลดังตารางที่ 4.6 และภาคผนวก จ จากการทดลองพบว่า หลังนำฟิล์มแช่ในเบสเป็นเวลา 4 วัน น้ำหนักของฟิล์มพอลิไควิไทลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์ยังคงเหลือประมาณร้อยละ 99.54 ซึ่งโดนย่อยสลายไปในปริมาณน้อยมาก พิจารณาจากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าฟิล์มพอลิไควิไทลีนซึกซิเนตยังคงรูปเป็นแผ่นฟิล์มไว้เหมือนเดิม ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มคอมพอสิตพอลิไควิไทลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ แต่สำหรับฟิล์มคอมพอสิตพอลิไควิไทลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีน้ำหนักแผ่นฟิล์มที่เหลือหลังจากแช่ในสารละลายเบสนั้นลดลง ทั้งนี้ปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้นทำให้น้ำหนักที่เหลือของฟิล์มน้อยลงตามไปด้วย และเห็นว่าเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณ

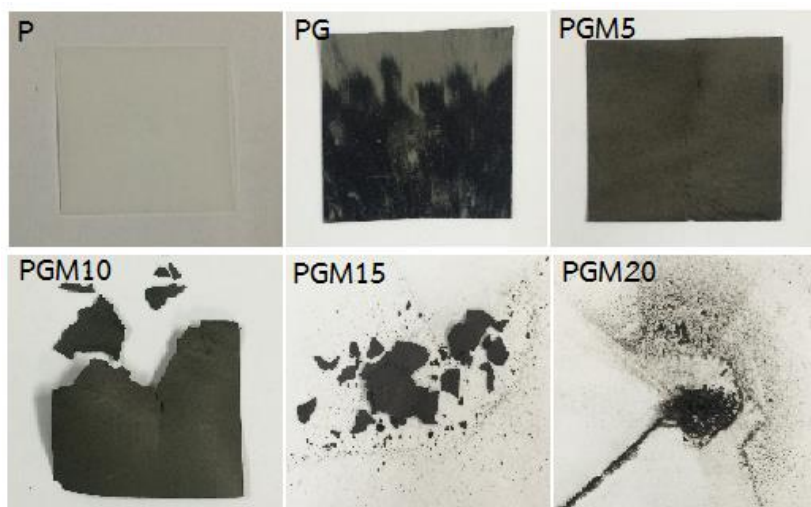
ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมพอสิตโดนย่อยจนเหลือเป็นผงเล็ก ๆ เนื่องจากไมโครคริสตัลลิ-เซลลูโลสสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปในแผ่นฟิล์มได้มาก และน้ำสามารถเหนี่ยวนำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนของสารละลายเบสเข้าไปในแผ่นฟิล์ม และเกิดการตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่ลีนซึกซึเนตได้ตรงตำแหน่งพันธะเอสเทอร์ (Reusch, 2017) ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ลีนซึกซึเนตกลายเป็นพอลิเมอร์สายโซ่สั้นและทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ที่ลีนซึกซึเนตลดลง เมื่อแผ่นฟิล์มถูกแรงกระทำ เช่น แรงกระแทก แผ่นฟิล์มก็แตกเป็นแผ่นเล็ก ๆ ได้ง่ายและกลายเป็นผงในที่สุด



รูปที่ 4.15 น้ำหนักของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 วัน

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักที่เหลือของแผ่นฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 4 วัน

ตัวอย่าง	ร้อยละของน้ำหนักฟิล์มที่เหลือ
P	99.54 ± 0.06
PG	97.18 ± 1.97
PGM5	82.46 ± 3.05
PGM10	79.51 ± 3.84
PGM15	58.45 ± 1.57
PGM20	48.89 ± 3.04



รูปที่ 4.16 ลักษณะฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/GO (PG) และ PBS/GO/MCC ที่มีปริมาณ MCC ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 4 วัน

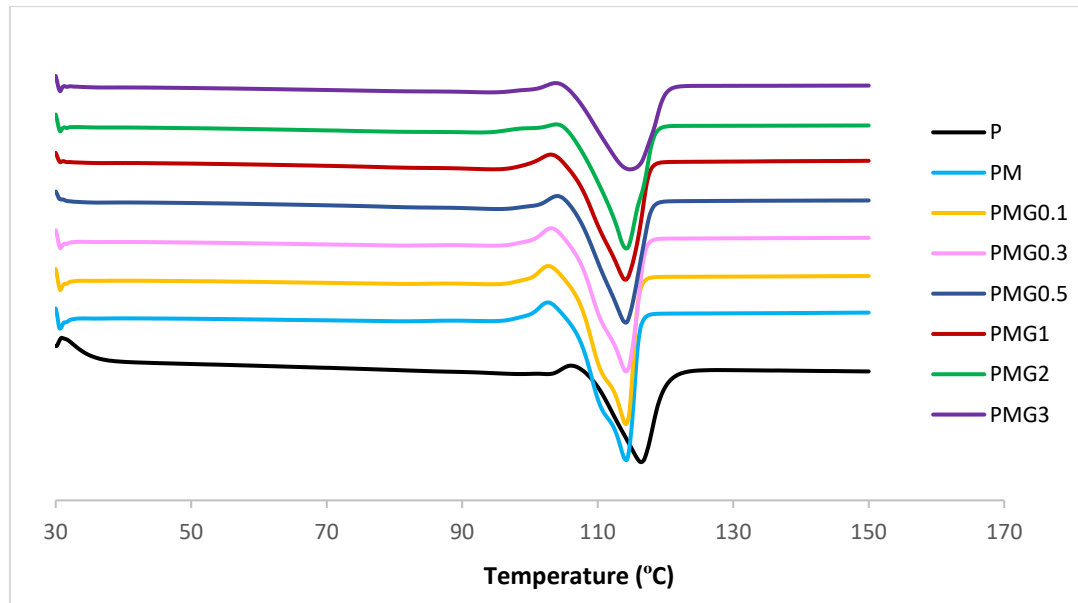
4.3 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคงที่ (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก)

4.3.1 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PMG

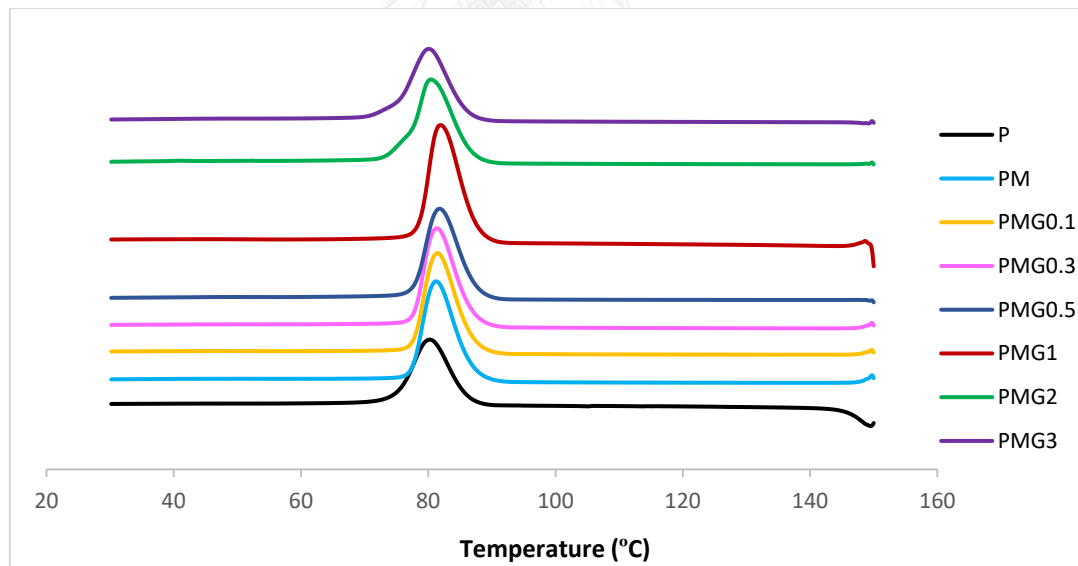
4.3.1.1 อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกและปริมาณผลึก

การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) แสดงผลดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตารางที่ 4.7 และภาคผนวก ก

จากการศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส และคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์พบว่า เมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1, 0.3 และ 0.5 โดยน้ำหนักส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1, 2 และ 3 พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกลดลงประมาณ 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณน้อยไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกแต่เมื่อเติมในปริมาณมากแกรฟีนออกไซด์ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกลดลง



รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอลิเมอร์ PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) ขณะให้ความร้อนครั้งที่สอง



รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอลิเมอร์ PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) ขณะลดอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	T_c (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
P	80.4	116.1	38.40
PM	81.5	113.8	58.38
PMG0.1	81.9	113.8	57.96
PMG0.3	81.7	113.8	56.50
PMG0.5	81.7	113.8	53.30
PMG1	80.7	113.8	53.55
PMG2	80.5	114.0	54.16
PMG3	80.3	114.6	49.89

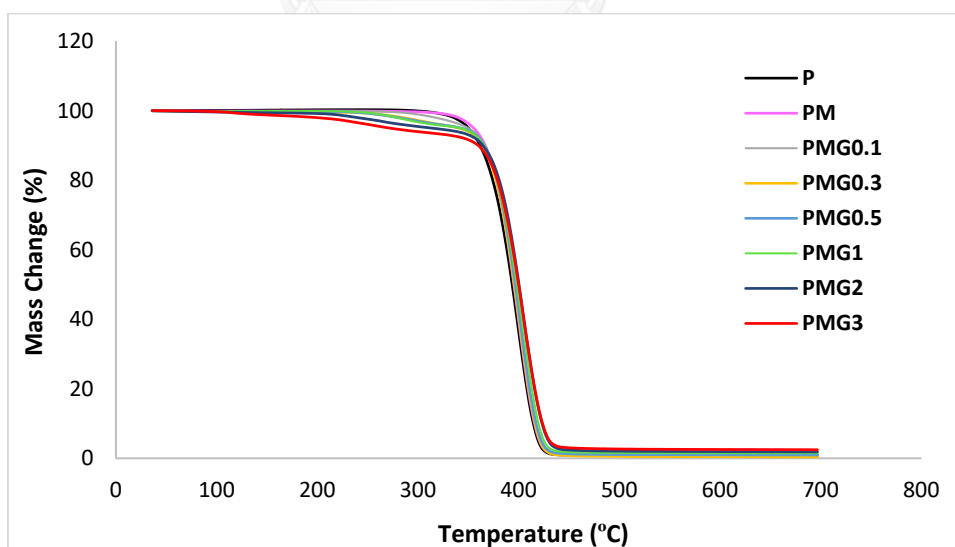
สำหรับอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าประมาณ 116.1 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่า อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกลดลงเหลือ 113.8 องศาเซลเซียส เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1 ถึง 1 โดยน้ำหนักลงไปในการคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2 และ 3 พบว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกกลับเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจากโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์เป็นระนาบคาร์บอนที่มีความแข็งแรงและเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้การทนความร้อนของคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ความร้อนสูงขึ้นในการหลอมผลึก

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (X_c) พบว่า การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสูงขึ้นประมาณร้อยละ 52 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mathew และคณะ (2006) ที่มีการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในพอลิแล็กติกแอซิด และพบว่าปริมาณผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นร้อยละ 132 เนื่องจากความสามารถในการทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกของเซลลูโลสแปรผกผันกับปริมาณลิกนิน นั่นคือไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกเท่านั้นและมีปริมาณลิกนินน้อยมาก สายโซ่พอลิเมอร์จึงสามารถเคลื่อนที่มาเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบบนไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสได้ ส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์สูงขึ้น (Mathew et al.,

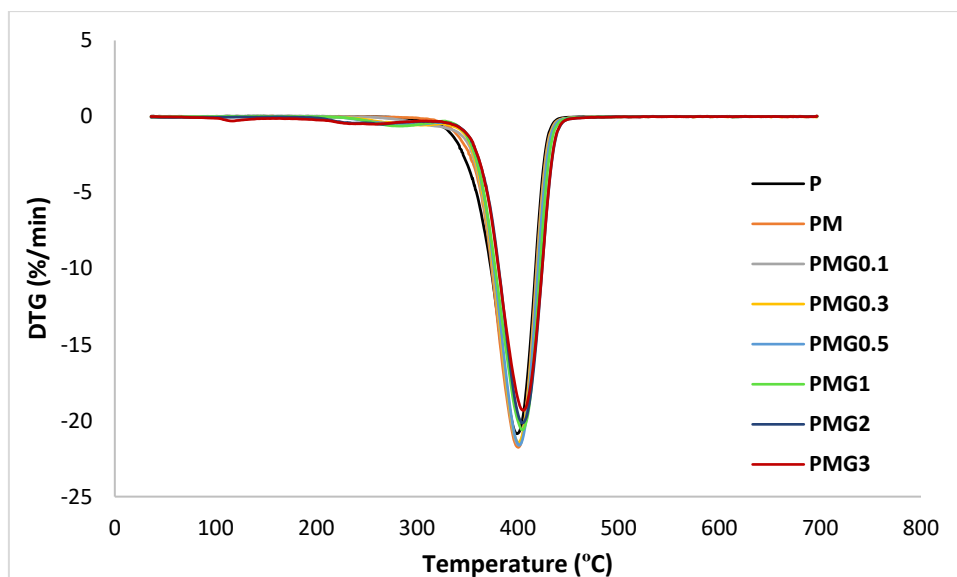
2006) อีกทั้งยังพบว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ อธิบายได้ว่าแกรฟีนออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกที่ดี ทำให้สายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเคลื่อนตัวมาจัดเรียงเป็นผลึกบนระนาบของแกรฟีนออกไซด์ได้ (Pinto et al., 2013) แต่เมื่อมีการเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์มากขึ้นกลับทำให้ปริมาณผลึกลดลง แสดงดังตารางที่ 4.7 สามารถอธิบายได้ว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้แกรฟีนออกไซด์เกิดการกระจายตัวได้น้อย และทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ไม่เต็มที่ จึงทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ซึ่งมาเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบบนระนาบของแกรฟีนออกไซด์เกิดได้น้อยลง จึงทำให้ปริมาณของผลึกลดลง

4.3.1.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน

ผลการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน โดยศึกษาอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว (onset decomposition temperature, T_{onset}) อุณหภูมิที่สารสลายตัวมากที่สุด (maximum decomposition temperature, T_{max}) และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัว (endset decomposition temperature, T_{endset}) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) พิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตารางที่ 4.8 และภาคผนวก ข



รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)



รูปที่ 4.20 DTG เทอร์โมแกรมของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PBS (P) คอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

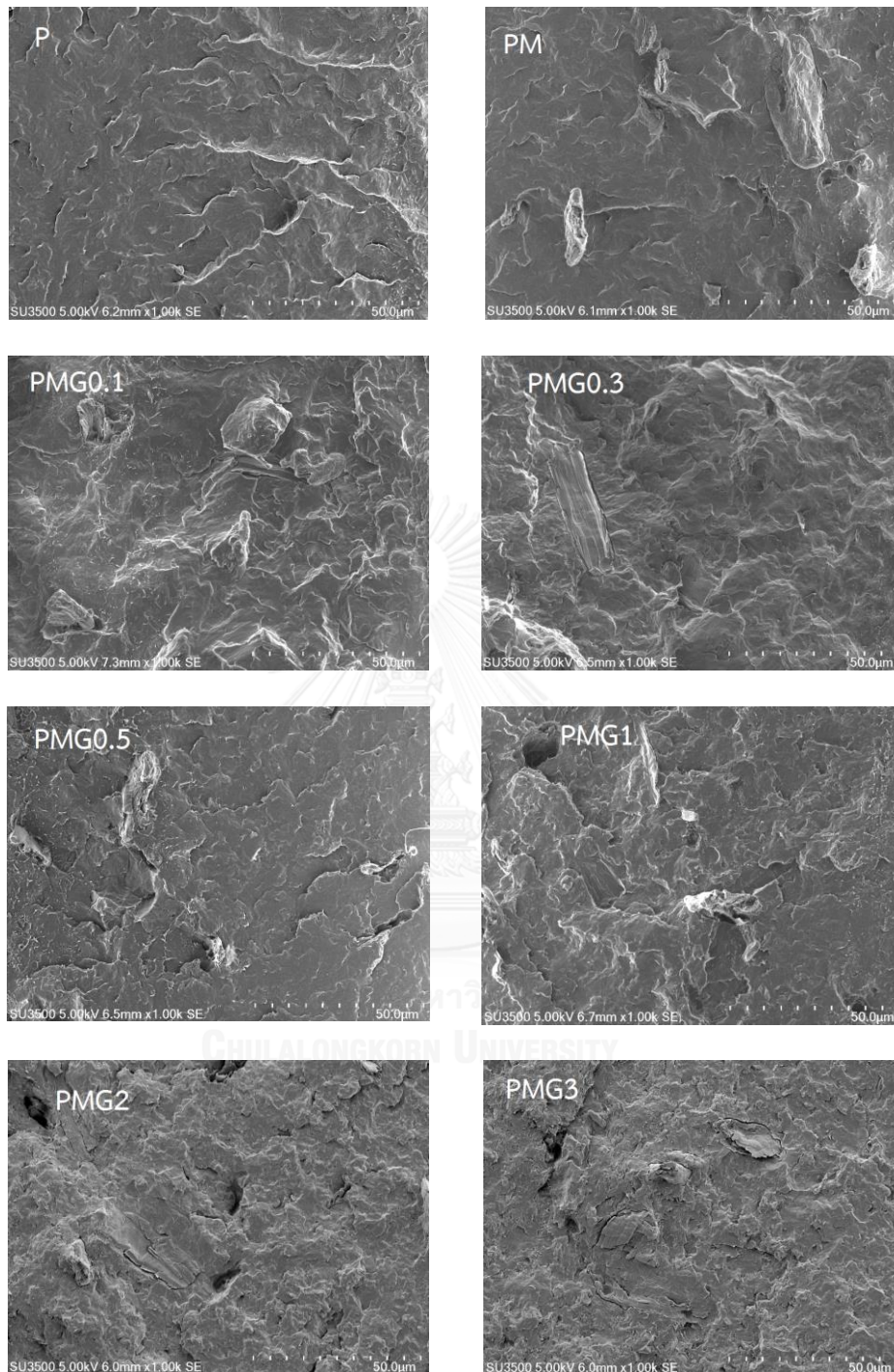
ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (°C)		
	T_{onset}	T_{max}	T_{endset}
P	369.6	399.1	417.2
PM	372.5	400.4	417.8
PMG0.1	372.7	400.5	418.4
PMG0.3	373.5	400.5	419.3
PMG0.5	374.0	401.4	419.8
PMG1	375.2	404.4	422.2
PMG2	377.3	404.5	424.7
PMG3	373.2	405.5	424.4

จากผลการทดลองพบว่า การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีผลทำให้อุณหภูมิที่สารเริ่มการสลายตัว (T_{onset}) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นประมาณ 3 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่สารสลายตัวมากที่สุด (T_{max}) เพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมากขึ้น ทำให้การทนความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จัดวางตัวและเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับระนาบแกรฟีนออกไซด์ ทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น นอกจากนี้ระนาบคาร์บอนของแกรฟีนออกไซด์ยังประพฤติตัวคล้ายกับสารหน่วงไฟให้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต การสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น (Bastiurea et al., 2015) และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมากที่สุดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น 6 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวมากที่สุดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์

4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอลิต PMG

สัณฐานวิทยาของภาคตัดขวางฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) ที่ผ่านการหักแสดงดังรูปที่ 4.21

จากสัณฐานวิทยาของฟิล์มดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงในเนื้อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่าพื้นผิวของส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ยังคงมีความเรียบอยู่ แต่เห็นอนุภาคของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์เข้าไปในคอมพอลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส สังเกตเห็นพื้นผิวของพอลิเมอร์คอมพอลิตมีความขรุขระ และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ความขรุขระของพื้นผิวมากขึ้น อย่างไรก็ตามอนุภาคของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมเข้าไปจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเมื่อเติมปริมาณของแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น จึงส่งผลให้เห็นพื้นผิวมีลักษณะขรุขระดังรูปที่ 4.21

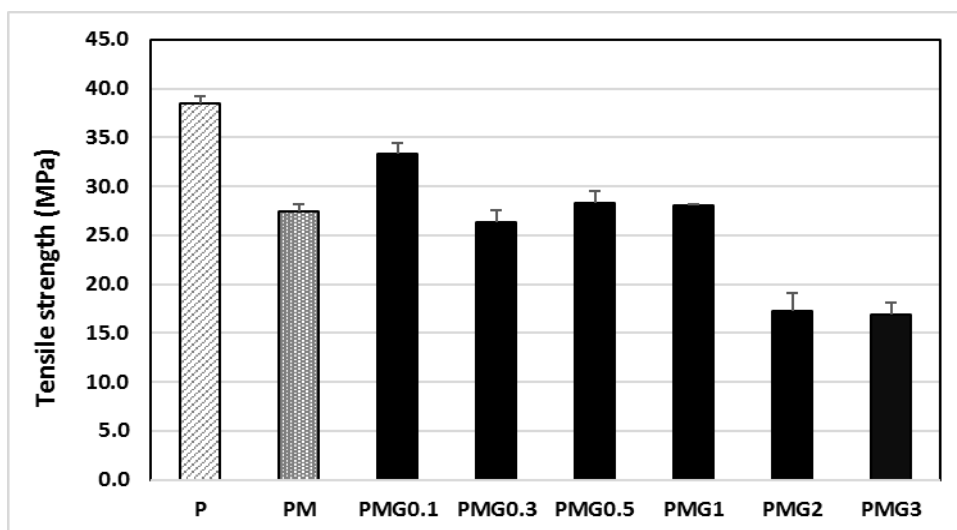


รูปที่ 4.21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของภาคตัดขวางแผ่นฟิล์มที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) ที่ผ่านการหัก

4.3.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิต PMG

4.3.3.1 ความทนแรงดึง (tensile strength)

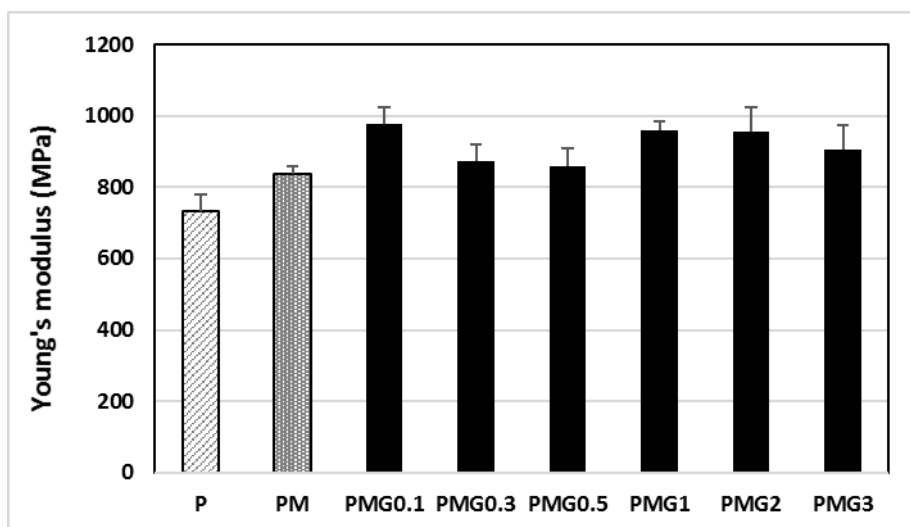
ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) แสดงดังรูปที่ 4.22 แสดงค่าดังตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ค พบว่า การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงในพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตมีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงของพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตลดลงร้อยละ 29 ซึ่งเป็นผลเนื่องจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีแรงยึดเหนี่ยวกับพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตค่อนข้างต่ำ ทำให้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสรับและกระจายแรงได้ไม่ดี แต่เมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักเข้าไปในคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พบว่าความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากแกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต เพราะแกรฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวเยอะและมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับหมู่เอสเทอร์ของพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตได้ จึงทำให้แกรฟีนออกไซด์สามารถรับแรงและกระจายแรงที่มากกระทำได้ (Cao et al., 2010) อย่างไรก็ตาม การเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.3, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตแต่มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์เป็นอนุภาคเสริมแรงขนาดเล็ก เมื่อมีการเติมในปริมาณมากขึ้น ทำให้แกรฟีนออกไซด์สามารถเกิดการรวมกลุ่มกันได้ง่าย (Pinto et al., 2013) และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตลดลงร้อยละ 55 และร้อยละ 56 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตดังรูปที่ 4.21 โดยเห็นว่าฟิล์มคอมพอสิต PMG2 และ PMG3 มีพื้นที่ผิวของภาคตัดขวางขรุขระมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มอื่น ๆ เพราะการรวมกลุ่มกันของแกรฟีนออกไซด์ จึงทำให้ทนแรงดึงได้น้อย



รูปที่ 4.22 ความทนแรงดึงของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

4.3.3.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

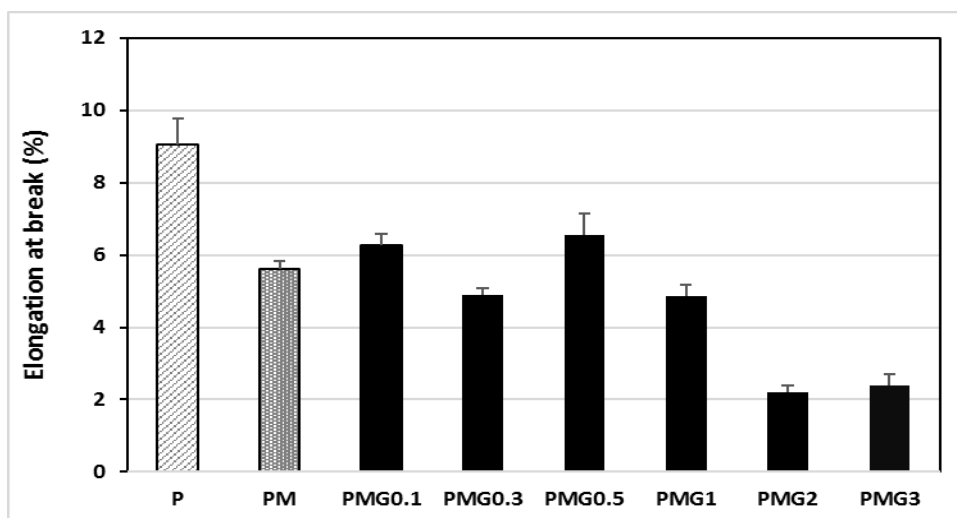
ผลการวิเคราะห์ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิต-พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) แสดงดังรูปที่ 4.23 แสดงค่าดังตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ค ผลจากการทดลองพบว่าการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสสามารถเพิ่มค่ายังส์มอดุลัสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตร้อยละ 15 อีกทั้งยังพบว่าค่ายังส์มอดุลัสของคอมพอสิตฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ มีค่ายังส์มอดุลัสมากกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ แสดงว่าไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถคงรูปอยู่ได้มากขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำ โดยฟิล์มคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มีค่ายังส์มอดุลัสเพิ่มขึ้นร้อยละ 34 เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ จึงกล่าวได้ว่าการเติมทั้งไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์สามารถปรับปรุงค่ายังส์มอดุลัสให้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



รูปที่ 4.23 ยังสัมมอดูลัสของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

4.3.3.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break)

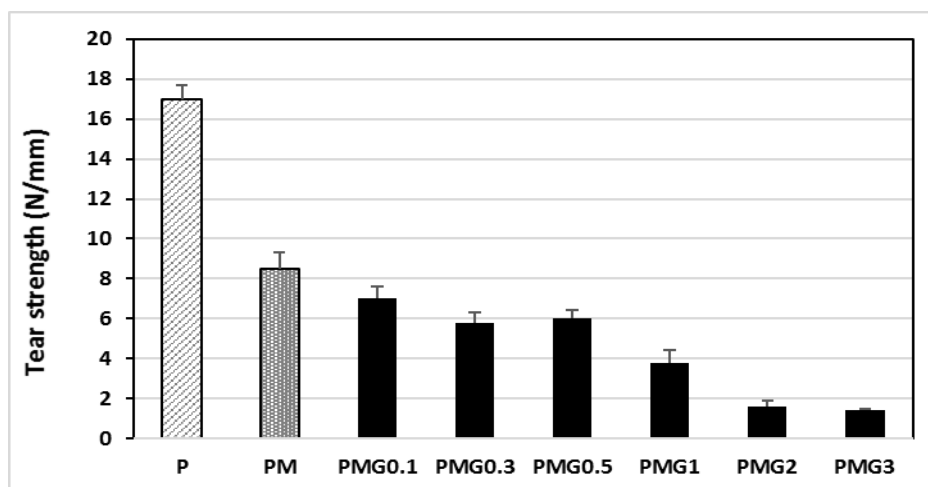
ผลการวิเคราะห์ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) แสดงดังรูปที่ 4.24 แสดงค่าดังตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ค พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับแนวโน้มของค่าความทนแรงดึง ทั้งนี้ค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีค่าลดลงร้อยละ 38 แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด สูงขึ้นร้อยละ 13 เพราะแกรฟีนออกไซด์ที่เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตได้ดีช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฟิล์มคอมพอสิตได้ แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก พบว่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดก็ลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาฐานวิทยาในรูปที่ 4.21 พบว่าความขรุขระของฟิล์มคอมพอสิต PMG0.3 มากกว่าของฟิล์มคอมพอสิต PMG0.1 และ PMG0.5 ดังนั้นความขรุขระที่เกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของแกรฟีนออกไซด์อาจส่งผลให้แกรฟีนออกไซด์ช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฟิล์มคอมพอสิตได้น้อยลง จึงทำให้ฟิล์มคอมพอสิต PMG0.3 มีค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดลดลง สำหรับการเติมแกรฟีนออกไซด์สูงถึงร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ทำให้ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดลดลงร้อยละ 76 และ 74 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์



รูปที่ 4.24 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

4.3.3.4 ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) แสดงดังรูปที่ 4.25 ตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ค จากการวิเคราะห์ผลพบว่าการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดของพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตลดลงร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตและฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ พบว่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากการเติมแกรฟีนออกไซด์อาจทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป และจากสัณฐานวิทยาที่แสดงในรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมพอสิตมีพื้นผิวที่มีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้น เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดลดลงร้อยละ 92 เมื่อเทียบกับพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



รูปที่ 4.25 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

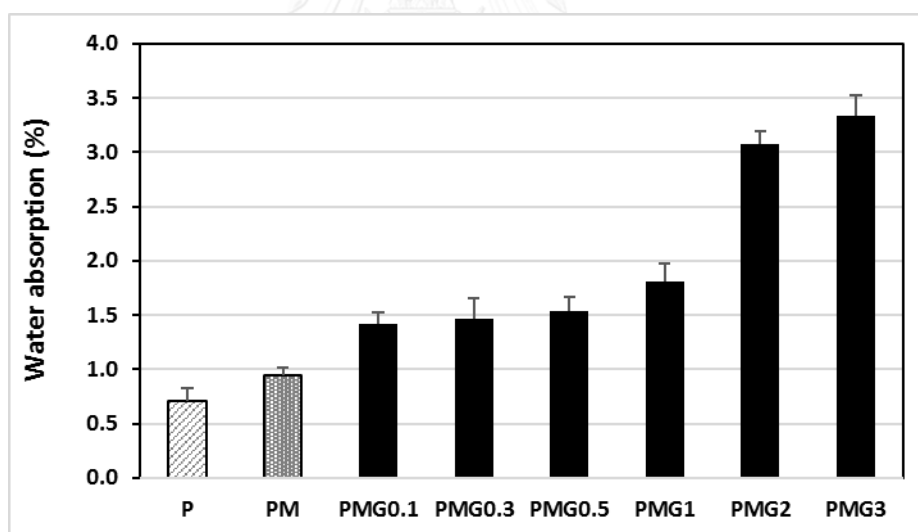
ตารางที่ 4.9 สมบัติด้านแรงดึงของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ยังส์มอดุลัส (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดตัว สูงสุด ณ จุดขาด	ความทนแรงฉีกขาด (นิวตัน/มิลลิเมตร)
P	38.5 ± 0.7	534.4 ± 45.7	9.1 ± 0.7	17.0 ± 0.7
PM	27.5 ± 0.7	611.3 ± 21.8	5.6 ± 1.0	8.5 ± 0.8
PMG0.1	33.3 ± 1.1	712.1 ± 47.2	6.3 ± 0.8	7.0 ± 0.6
PMG0.3	26.3 ± 1.2	635.3 ± 48.4	4.9 ± 0.7	5.8 ± 0.5
PMG0.5	28.3 ± 1.2	626.7 ± 49.8	6.6 ± 0.2	6.0 ± 0.4
PMG1	28.0 ± 0.2	700.7 ± 24.9	4.9 ± 0.2	3.8 ± 0.6
PMG2	17.3 ± 1.8	696.6 ± 68.6	2.2 ± 0.2	1.6 ± 0.3
PMG3	16.9 ± 1.2	660.7 ± 68.3	2.4 ± 0.3	1.4 ± 0.1

หมายเหตุ ความแตกต่างระหว่างข้อมูลในระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงด้วยภาคผนวก ฉ

4.3.4 สมบัติการดูดซึมน้ำของฟิล์มคอมพอสิต PMG

จากการศึกษาการดูดซึมน้ำของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของฟิล์มก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ ซึ่งคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ผลแสดงดังรูปที่ 4.26 และภาคผนวก ง จากการศึกษพบว่า การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 เพราะไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำได้ จึงทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์สามารถเพิ่มการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส ประมาณร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 136 เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีหมู่ไฮดรอกซิลบนระนาบคาร์บอนจึงช่วยให้เกิดแรงดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจน และเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น การดูดซึมน้ำยิ่งมากขึ้น ดังนั้นแกรฟีนออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการทำให้น้ำถูกดูดซึมเข้าสู่แผ่นฟิล์มได้เช่นเดียวกับไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส

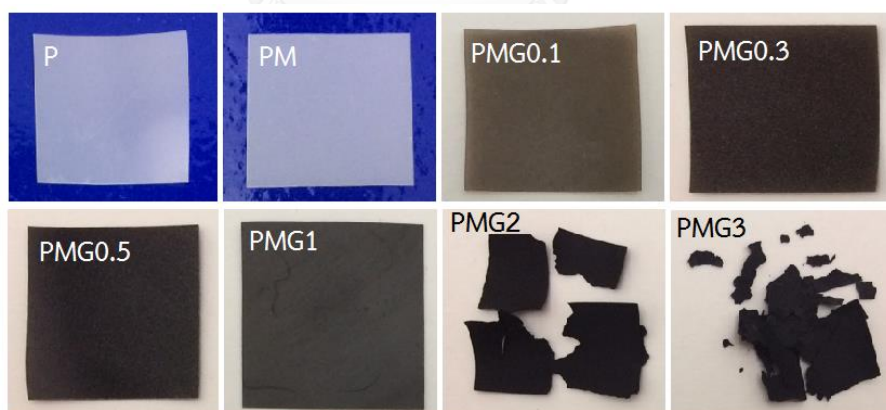


รูปที่ 4.26 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วันของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

4.3.5 สมบัติการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิต PMG

การศึกษาการย่อยสลายด้วยเบสที่ pH=13 ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริส-

ตัลลินเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (PMG) โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของแผ่นฟิล์มก่อนแช่ในสารละลายเบสและหลังแช่ในสารละลายเบส ซึ่งคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักฟิล์มที่เหลือ ผลแสดงดังรูปที่ 4.27 ตารางที่ 4.10 และภาคผนวก จ จากการทดลองพบว่า หลังนำฟิล์มแช่ในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน น้ำหนักของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ยังคงเหลือประมาณร้อยละ 99.44 ซึ่งโดนย่อยสลายไปในปริมาณน้อยมาก พิจารณาจากรูปที่ 4.27 เห็นว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ยังคงรูปเป็นแผ่นฟิล์มไว้เช่นเดิม อีกทั้งยังพบว่าผลการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีความใกล้เคียงกับผลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ แต่สำหรับการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ พบว่าน้ำหนักแผ่นฟิล์มคอมพอสิตที่เหลือหลังจากแช่ในสารละลายเบสนั้นลดลงเมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์สามารถดูดซึมน้ำเข้าไปในแผ่นฟิล์มได้เช่นเดียวกับไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส จึงทำให้ฟิล์มคอมพอสิตสามารถย่อยสลายได้ ทั้งนี้การเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.1, 0.3 และ 0.5 โดยน้ำหนักพบว่าน้ำหนักที่เหลือของแผ่นฟิล์มคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เหลือของแผ่นฟิล์มคอมพอสิตหลังแช่ในสารละลายเบส เห็นชัดเจนขึ้นเมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ตั้งแต่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและเห็นได้ชัดเจนที่สุดที่การเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ลักษณะแผ่นฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

ตารางที่ 4.10 น้ำหนักที่เหลือของฟิล์ม PBS (P) ฟิล์มคอมพอสิต PBS/MCC (PM) และ PBS/MCC/GO ที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ) หลังแช่ในสารละลายเบส (pH = 13) เป็นเวลา 4 วัน

ตัวอย่าง	ร้อยละของน้ำหนักฟิล์มที่เหลือ
P	99.44 ± 0.34
PM	98.95 ± 0.86
PMG0.1	98.77 ± 0.22
PMG0.3	98.74 ± 0.07
PMG0.5	95.08 ± 1.01
PMG1	83.53 ± 1.76
PMG2	75.12 ± 1.64
PMG3	69.23 ± 2.77

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ และนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีการศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใช้สารตัวเติม 2 ชนิดคือไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ ทั้งนี้สมบัติที่ศึกษาประกอบด้วยสมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำและการย่อยสลายด้วยเบส โดยฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าวเตรียมขึ้นโดยใช้วิธีผสมในตัวทำละลาย ซึ่งมีการศึกษา 2 ภาวะสำหรับการใช้สารตัวเติมได้แก่ ภาวะที่ 1 กำหนดให้ความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์คงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก และภาวะที่ 2 กำหนดให้ความเข้มข้นของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคงที่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจึงขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยความร้อน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์

แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการออกซิเดชันของแกรไฟต์ พบว่าได้แกรฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีตามต้องการ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และหมู่อีพอกซี และมีระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแกรไฟต์

2. สมบัติทางความร้อน

การเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T_{max}) แต่มีผลต่อปริมาณผลึก (X_c) โดยเพิ่มปริมาณผลึก เมื่อเปรียบเทียบกับผลึกของ PG และ PM พบว่าฟิล์ม PM มีปริมาณผลึกสูงกว่าฟิล์ม PG ร้อยละ 20 แต่การเติมปริมาณมากมีผลในการลดปริมาณผลึก เนื่องจากตัวเติมสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่มาเกิดเป็นผลึกของสายโซ่พอลิ-บิวทิลีนซัคซิเนตได้

3. สัณฐานวิทยา

การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ในพอลิ-บิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ สามารถเห็นได้จากสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต อีกทั้งยังพบว่าพื้นผิวของการหักของฟิล์มคอมพอสิตมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส

และแกรฟีนออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องจากสารทั้งสองมีขั้วที่ต่างกันมากจึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันน้อย ดังนั้นจึงปรากฏช่องว่างระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส

4. สมบัติเชิงกล

โดยภาพรวมของการวิเคราะห์พบว่า การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีแนวโน้มเพิ่มค่ายังสัมมอดุลัสเท่านั้น แต่มีแนวโน้มลดค่าความทนแรงดึง ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดและความทนแรงฉีกขาด ซึ่งเห็นผลชัดเจนสำหรับการเติมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดนี้ในปริมาณมาก แต่การเติมแกรฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อย ประมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยเพิ่มความทนแรงดึงและความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส เนื่องจากการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณน้อยทำให้มีการกระจายตัวที่ดีและทำหน้าที่เสริมแรงได้ดี แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์มากขึ้นทำให้มีโอกาสรวมกลุ่มกันได้ง่าย แกรฟีนออกไซด์จะทำหน้าที่เสริมแรงได้ไม่ดี ค่าความทนแรงดึงและความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มคอมพอสิตจึงลดลง

5. สมบัติการดูดซึมน้ำ

การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้การดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น และปริมาณสารตัวเติมที่สูงขึ้นส่งผลให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติการดูดซึมน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำได้ จึงส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตสามารถดูดซึมน้ำได้

6. สมบัติการย่อยสลายด้วยเบส

ฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติมนั้น มีสมบัติการย่อยสลายด้วยเบสได้ดีกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ซึ่งสมบัติการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้นและเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมดังกล่าวให้มากขึ้น เนื่องจากฟิล์มคอมพอสิตสามารถดูดซึมน้ำได้ ดังนั้นน้ำจึงเป็นตัวกลางในการนำหมู่ไฮดรอกซิลของเบสเข้าสู่ฟิล์มคอมพอสิต และหมู่ไฮดรอกซิลจะทำหน้าที่ตัดสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตตรงตำแหน่งพันธะเอสเทอร์ทำให้สายโซ่แตกออก ส่งผลให้เกิดการย่อยสลาย

โดยภาพรวมแล้วฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ให้สมบัติเด่นคือสามารถดูดซึมน้ำได้และมีสมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านเกษตรได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์-เซลลูโลส ที่มีการใช้สารคู่ควบเช่น PBS-g-MA เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติม
2. ศึกษาสมบัติการย่อยสลายด้วยกรดและการย่อยสลายในดินของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส
3. ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส



รายการอ้างอิง

- AHN, B., KIM, S., KIM, Y. & YANG, J. (2001). Synthesis and characterization of the biodegradable copolymers from succinic acid and adipic acid with 1, 4-butanediol. *Journal of Applied Polymer Science*, 82, 2808-2826.
- BASTIUREA, M., RODEANU, M., DIMA, D., MURARESCU, M. & ANDREI, G. (2015). Thermal and mechanical properties of polyester composites with graphene oxide and graphite. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 10, 521-533.
- BHATIA, A., GUPTA, R., BHATTACHARYA, S. & CHOI, H. (2007). Compatibility of biodegradable poly (lactic acid)(PLA) and poly (butylene succinate)(PBS) blends for packaging application. *Korea-Australia Rheology Journal*, 19, 125-131.
- BORBA, P. M., TEDESCO, A. & LENZ, D. M. (2014). Effect of reinforcement nanoparticles addition on mechanical properties of SBS/Curauá fiber composites. *Materials Research*, 17, 412-419.
- BRODIE, B. C. (1859). On the atomic weight of graphite. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 149, 249-259.
- CAO, Y., FENG, J. & WU, P. (2010). Preparation of organically dispersible graphene nanosheet powders through a lyophilization method and their poly (lactic acid) composites. *Carbon*, 48, 3834-3839.
- CHAIWUTTHINAN, P., SONG, Z. H. & LEEJARKPAI, T. (2012). Use of microcrystalline cellulose prepared from cotton fabric waste to prepare poly (butylene succinate) composites. *Advanced Materials Research*, 356-360, 430-434.
- CHO, K., LEE, J. & KWON, K. (2001). Hydrolytic degradation behavior of poly (butylene succinate) s with different crystalline morphologies. *Journal of Applied Polymer Science*, 79, 1025-1033.
- CHUAYJULJIT, S., SU-UTHAI, S. & CHARUCHINDA, S. (2010). Poly (vinyl chloride) film filled with microcrystalline cellulose prepared from cotton fabric waste: properties and biodegradability study. *Waste Management & Research*, 28, 109-117.

- CHUAYJULJIT, S., SU-UTHAI, S., TUNWATTANASEREE, C. & CHARUCHINDA, S. (2009). Preparation of microcrystalline cellulose from waste-cotton fabric for biodegradability enhancement of natural rubber sheets. *Journal of reinforced plastics and composites*, 28, 1245-1254.
- DIMIEV, A. M. & TOUR, J. M. (2014). Mechanism of graphene oxide formation. *American Chemical Society Nano*, 8, 3060-3068.
- DREYER, D. R., PARK, S., BIELAWSKI, C. W. & RUOFF, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, 39, 228-240.
- DU, X. C., XU, X. L., LIU, X. H., YANG, J. H., WANG, Y. & GAO, X. L. (2016). Graphene oxide induced crystallization and hydrolytic degradation of poly (butylene succinate). *Polymer Degradation and Stability*, 123, 94-104.
- DUFRESNE, A., DUPEYRE, D. & PAILLET, M. (2003). Lignocellulosic flour-reinforced poly (hydroxybutyrate-co-valerate) composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 87, 1302-1315.
- EL-SAKHAWY, M. & HASSAN, M. L. (2007). Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues. *Carbohydrate Polymers*, 67, 1-10.
- FAN, L.-T., GHARPURAY, M. M. & LEE, Y.-H. (1987). Acid hydrolysis of cellulose. *Cellulose hydrolysis*. Springer, 3, 121-148.
- GARROTE, G., DOMINGUEZ, H. & PARAJO, J. (1999). Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 57, 191-202.
- GURIT. (2017). *guide to composites* [Online]. Available at: <http://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials> [Accessed 14 Jun. 2017].
- HANNA, M., BIBY, G. & MILADINOV, V. (2001). Production of microcrystalline cellulose by reactive extrusion [Online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/266356447> [Accessed 14 Jun. 2017]
- HARANE, R. S., MEHRA, N. R., TAYADE, P. B. & ADIVAREKAR, R. V. (2014). A facile energy and water-conserving process for cotton dyeing. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5, 96-99.

- HUMMERS, W. S. & OFFEMAN, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80, 1339-1339.
- JANG, J., PHAM, V. H., HUR, S. H. & CHUNG, J. S. (2014). Dispersibility of reduced alkylamine-functionalized graphene oxides in organic solvents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 424, 62-66.
- KASUYA, K. I., TAKAGI, K. I., ISHIWATARI, S. I., YOSHIDA, Y. & DOI, Y. (1998). Biodegradabilities of various aliphatic polyesters in natural waters. *Polymer Degradation and Stability*, 59, 327-332.
- KIM, J., COTE, L. J., KIM, F., YUAN, W., SHULL, K. R. & HUANG, J. (2010). Graphene oxide sheets at interfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 132, 8180-8186.
- KONIOS, D., STYLIANAKIS, M. M., STRATAKIS, E. & KYMAKIS, E. (2014). Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 430, 108-112.
- LEEJARKPAI, T. (2017). *Compostable plastic* [Online]. Available: <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9530000001038> [Accessed 14 Jun. 2017].
- LERF, A., HE, H., FORSTER, M. & KLINOWSKI, J. (1998). Structure of graphite oxide revisited. *The Journal of Physical Chemistry B*, 102, 4477-4482.
- LI, H., CHANG, J., CAO, A. & WANG, J. (2005). In vitro evaluation of biodegradable poly (butylene succinate) as a novel biomaterial. *Macromolecular Bioscience*, 5, 433-440.
- LINDEKE. (2017). *Composite Materials* [Online]. Available: www.d.umn.edu/~rlindek1/ENGR2110/Composite%20Materials.ppt [Accessed 14 Jun. 2017].
- LIWTHAISONG, M. 2013. *Production of biodegradable foodpackaging from banana sheath* [Online]. Available: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4762/2/Fulltext.pdf> [Accessed 14 Jun. 2017].
- MARCANO, D. C., KOSYNKIN, D. V., BERLIN, J. M., SINITSKII, A., SUN, Z., SLESAREV, A., ALEMANY, L. B., LU, W. & TOUR, J. M. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *American Chemical Society Nano*, 4, 4806-4814.

- MATHEW, A. P., OKSMAN, K. & SAIN, M. (2006). The effect of morphology and chemical characteristics of cellulose reinforcements on the crystallinity of polylactic acid. *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 300-310.
- NOVOSELOV, K. S., GEIM, A. K., MOROZOV, S. V., JIANG, D., ZHANG, Y., DUBONOS, S. V., GRIGORIEVA, I. V. & FIRSOV, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666-669.
- PADERNI, K., FABBRI, P., TOSELLI, M. & MESSORI, M. (2014). Shape Memory Properties of PBS-Silica Hybrids. *Materials*, 7, 751-768.
- PARK, S.-W., KIM, S.-H., LIM, J.-H. & CHOI, H.-S. (2013). The Durability of Polybutylene Succinate Monofilament for Fishing Net Twines by Outdoor Exposure Test. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 25, 766-774.
- PINTO, A. M., CABRAL, J., TANAKA, D. A. P., MENDES, A. M. & MAGALHÃES, F. D. (2013). Effect of incorporation of graphene oxide and graphene nanoplatelets on mechanical and gas permeability properties of poly (lactic acid) films. *Polymer International*, 62, 33-40.
- REUSCH, W. (2017). *Chemical Reactivity* [Online]. Available: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/react1.htm> [Accessed 14 Jun. 2017].
- ROJA, J., MOREN, S. & LOPEZ, A. (2011). Assessment of the water sorption properties of several microcrystalline celluloses. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3, 1302-1309.
- SHAHRIARY, L. & ATHAWALE, A. A. (2014). Graphene oxide synthesized by using modified hummers approach. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2, 58-63.
- SUKKATHITIYAKUL, P. (2017). *Bioplastic* [Online]. Available: thaigoodview.com/node/17034 [Accessed 14 Jun. 2017].
- SUYAMA, T., TOKIWA, Y., OUCHANPAGDEE, P., KANAGAWA, T. & KAMAGATA, Y. (1998). Phylogenetic affiliation of soil bacteria that degrade aliphatic polyesters available commercially as biodegradable plastics. *Applied and Environmental Microbiology*, 64, 5008-5011.
- TANIGUCHI, I., NAKANO, S., NAKAMURA, T., EL-SALMAWY, A., MIYAMOTO, M. & KIMURA, Y. (2002). Mechanism of Enzymatic Hydrolysis of Poly (butylene succinate) and

- Poly (butylene succinate-co-L-lactate) with a Lipase from *Pseudomonas cepacia*. *Macromolecular Bioscience*, 2, 447-455.
- TRACHE, D., HUSSIN, M. H., CHUIN, C. T. H., SABAR, S., FAZITA, M. N., TAIWO, O. F., HASSAN, T. & HAAFIZ, M. M. (2016). Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application—A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 789-804.
- VERANITISAGUL, C. 2017. *An Overview of Composite Materials* [Online]. Available: http://www.eng.ku.ac.th/ejournal_th/download.php?name=zoXKryVMon21201.pdf&file_basename=18-32%20%CB%C4%B7%C0%D1%A4.pdf [Accessed 14 Jun. 2017].
- VIVEKANANDHAN, S., CHRISTENSEN, L., MISRA, M. & MOHANTY, A. K. (2012). Green process for impregnation of silver nanoparticles into microcrystalline cellulose and their antimicrobial bionanocomposite films. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 3, 371-376.
- WAN, C. & CHEN, B. (2013). Reinforcement of biodegradable poly (butylene succinate) with low loadings of graphene oxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 127, 5094-5099.
- WANG, H., JI, J., ZHANG, W., ZHANG, Y., JIANG, J., WU, Z., PU, S. & CHU, P. K. (2009). Biocompatibility and bioactivity of plasma-treated biodegradable poly (butylene succinate). *Acta Biomaterialia*, 5, 279-287.
- WANG, X., ZHANG, C.-A., WANG, P., ZHAO, J., ZHANG, W., JI, J., HUA, K., ZHOU, J., YANG, X. & LI, X. (2012). Enhanced performance of biodegradable poly (butylene succinate)/graphene oxide nanocomposites via in situ polymerization. *Langmuir*, 28, 7091-7095.
- WONGCHANAPIBOON, T. (2013). *Polymer chemistry*, Bangkok: Chulalongkorn University Printing House.
- WOSANG, S., KONGSUMLEE, P., PHUKLONGNAK, C., SRIPUNNA, T. & SUPHA, C. (2017). *Properties of materials* [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/3tidesign/porkaerm-calculator> [Accessed 14 Jun. 2017].
- XU, J. & GUO, B.-H. 2010. Microbial succinic acid, its polymer poly (butylene succinate), and applications. *Plastics from Bacteria*, 14, 347-388.

- YANG, X., WANG, Y., HUANG, X., MA, Y., HUANG, Y., YANG, R., DUAN, H. & CHEN, Y. (2011). Multi-functionalized graphene oxide based anticancer drug-carrier with dual-targeting function and pH-sensitivity. *Journal of Materials Chemistry*, 21, 3448-3454.
- ZHANG, H., WU, J., ZHANG, J. & HE, J. (2005). 1-Allyl-3-methylimidazolium chloride room temperature ionic liquid: a new and powerful nonderivatizing solvent for cellulose. *Macromolecules*, 38, 8272-8277.





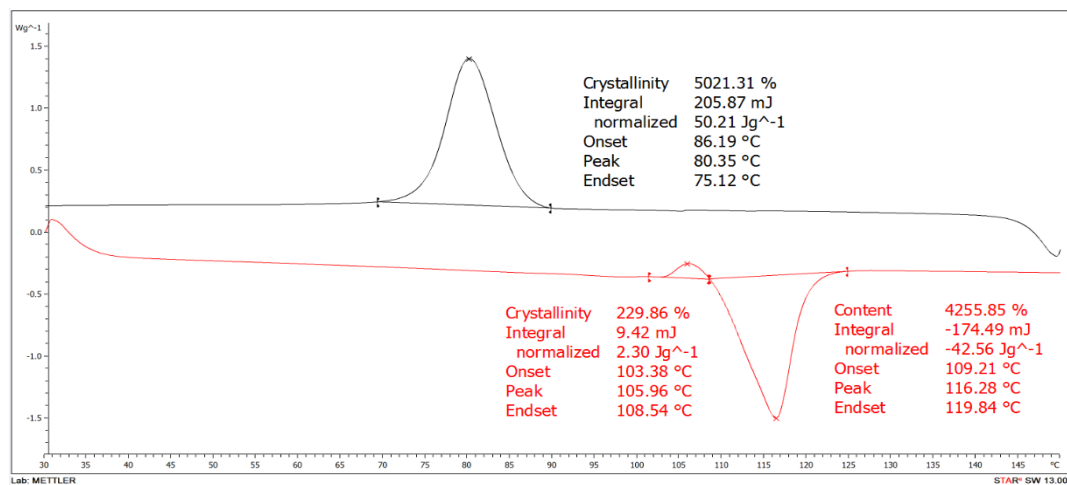
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

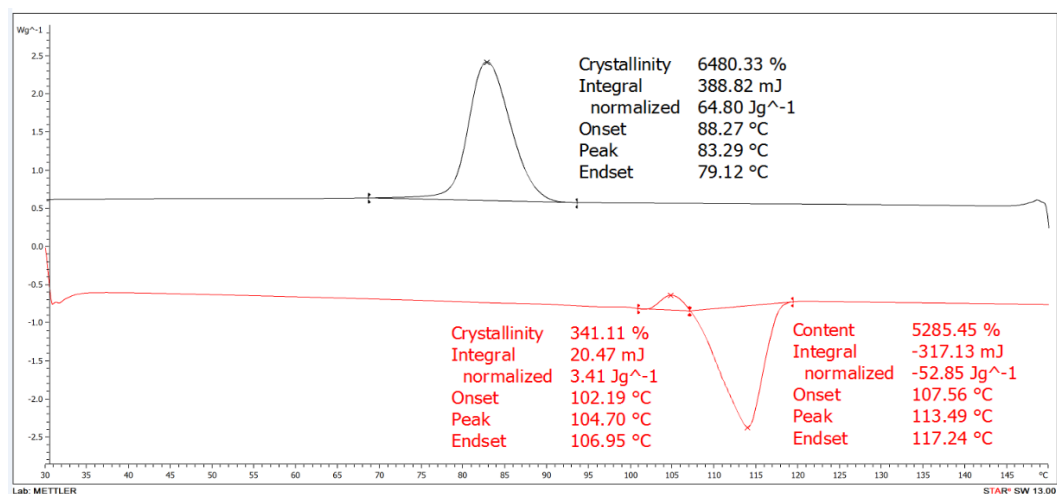
DSC เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีน ออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีน ออกไซด์

ก-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

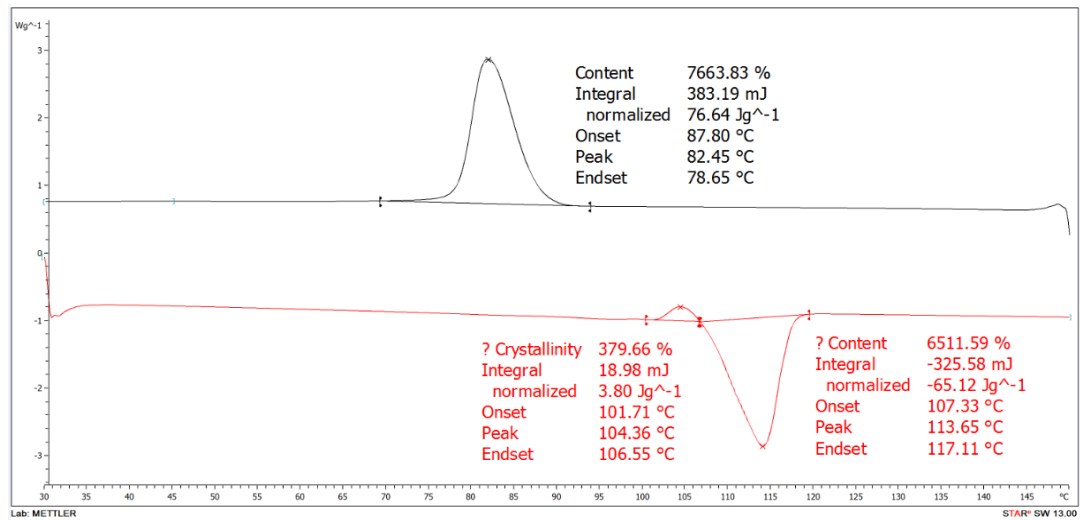


รูปที่ ก-1.1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P)

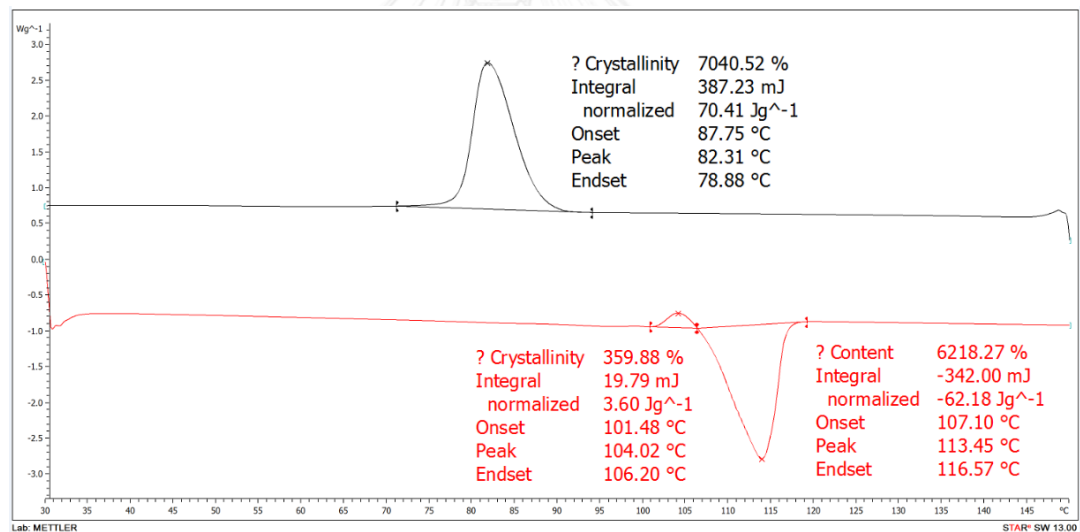
ก-2 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส เมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์คงที่ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)



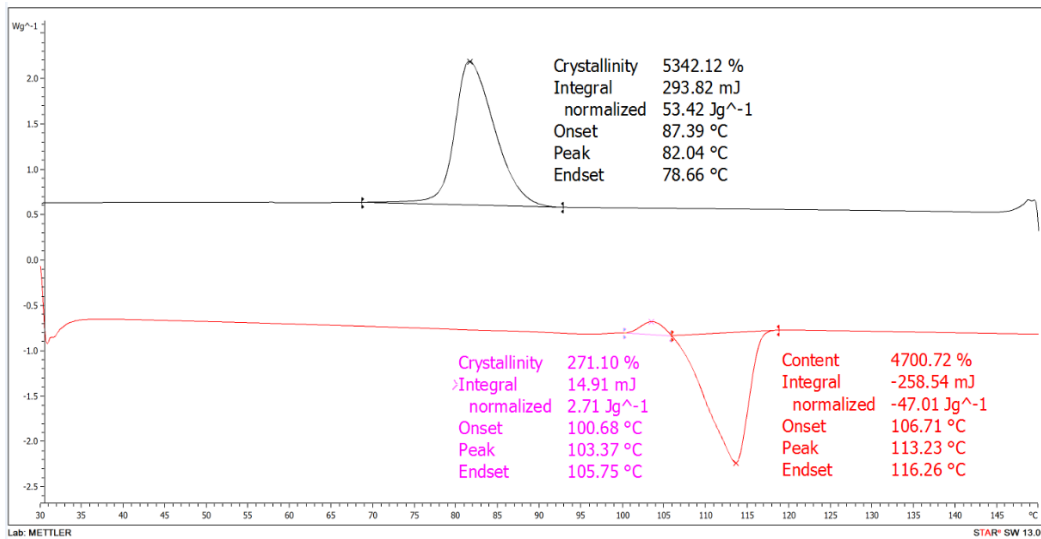
รูปที่ ก-2.1 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG)



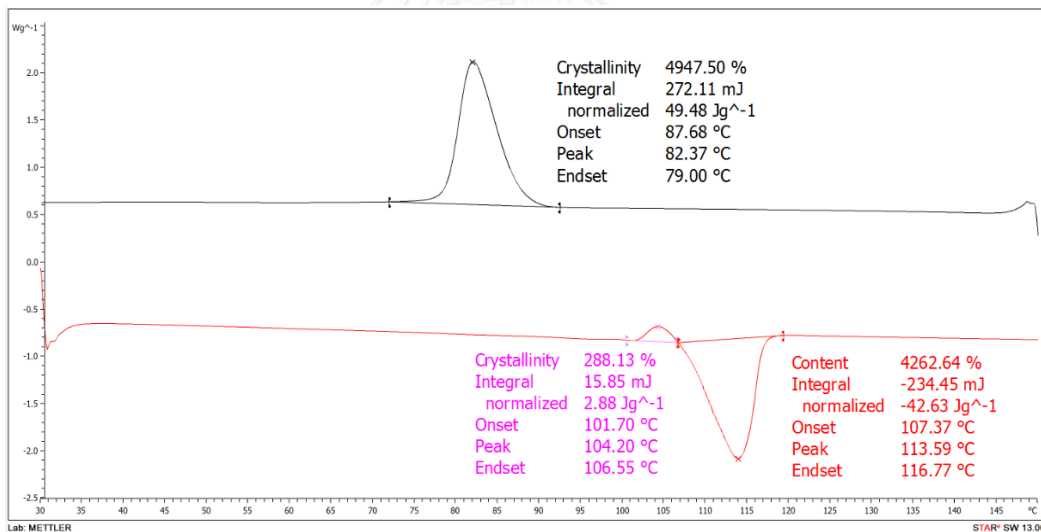
รูปที่ ก-2.2 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทีลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัล-
 ลินเซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PGM5)



รูปที่ ก-2.3 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทีลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัล-
 ลินเซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (PGM10)

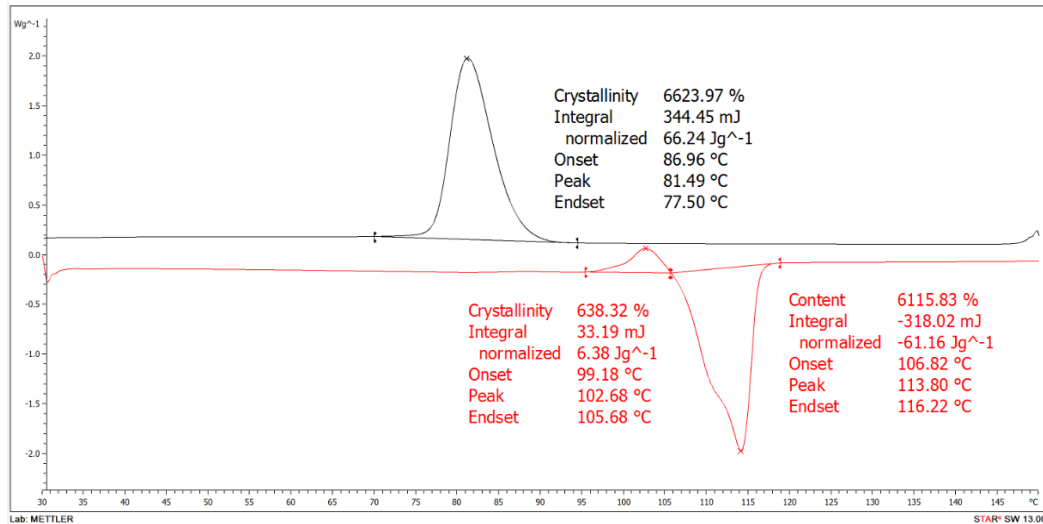


รูปที่ ก-2.4 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิวิวิทิสันซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัล-
ลีนเซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (PGM15)

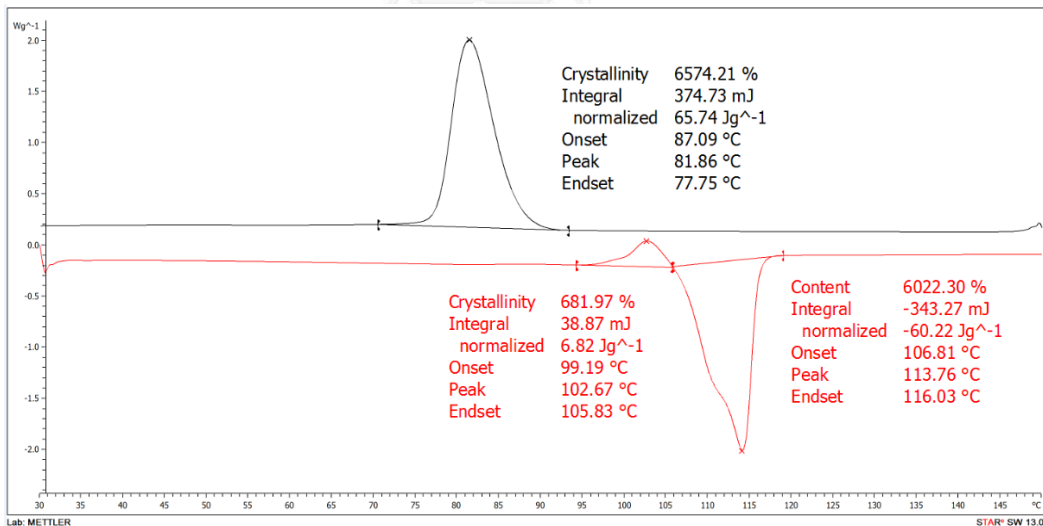


รูปที่ ก-2.5 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิวิวิทิสันซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัล-
ลีนเซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (PGM20)

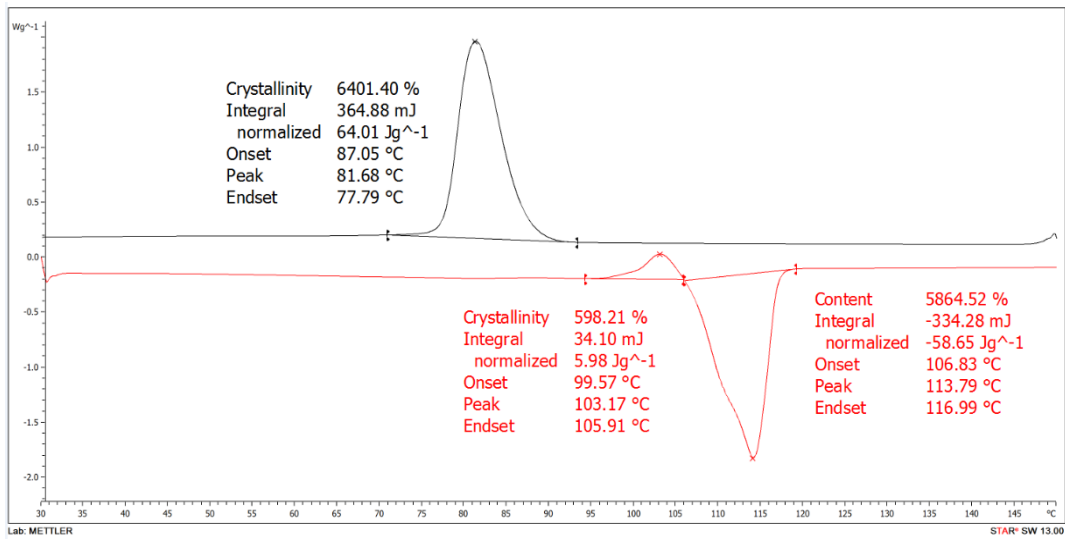
ก-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส /แกรฟีนออกไซด์ เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคงที่ (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก)



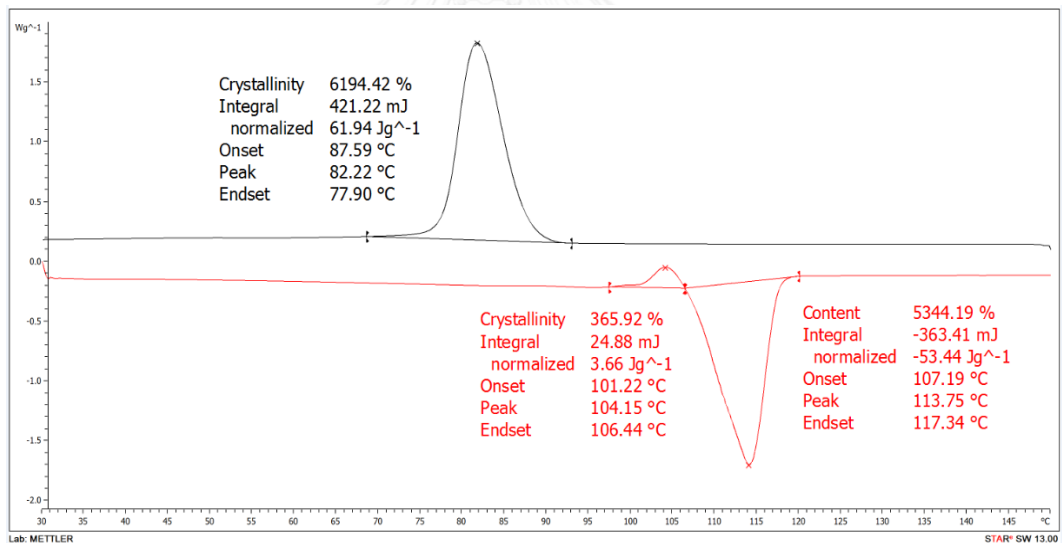
รูปที่ ก-3.1 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM)



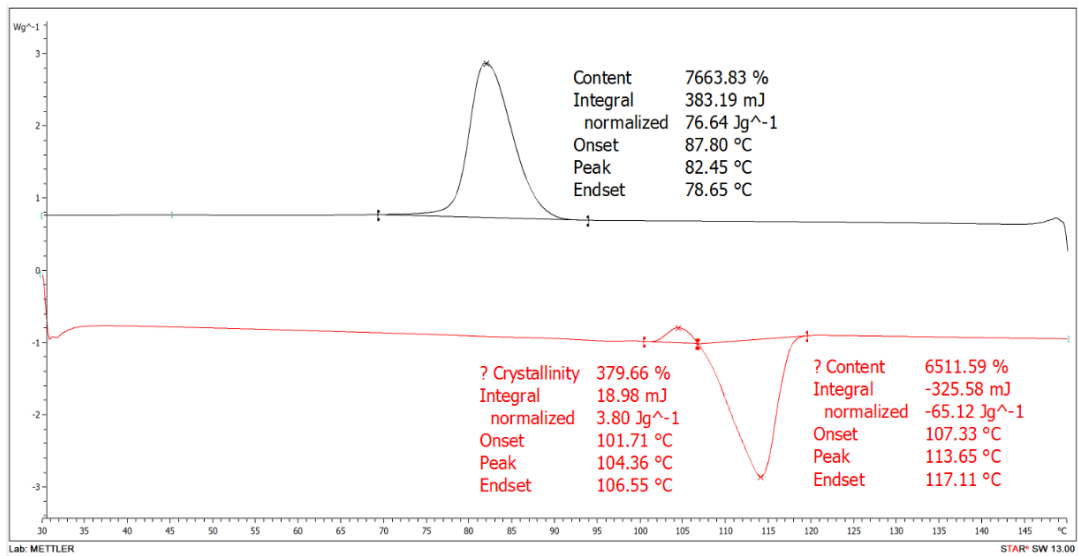
รูปที่ ก-3.2 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก (PGM0.1)



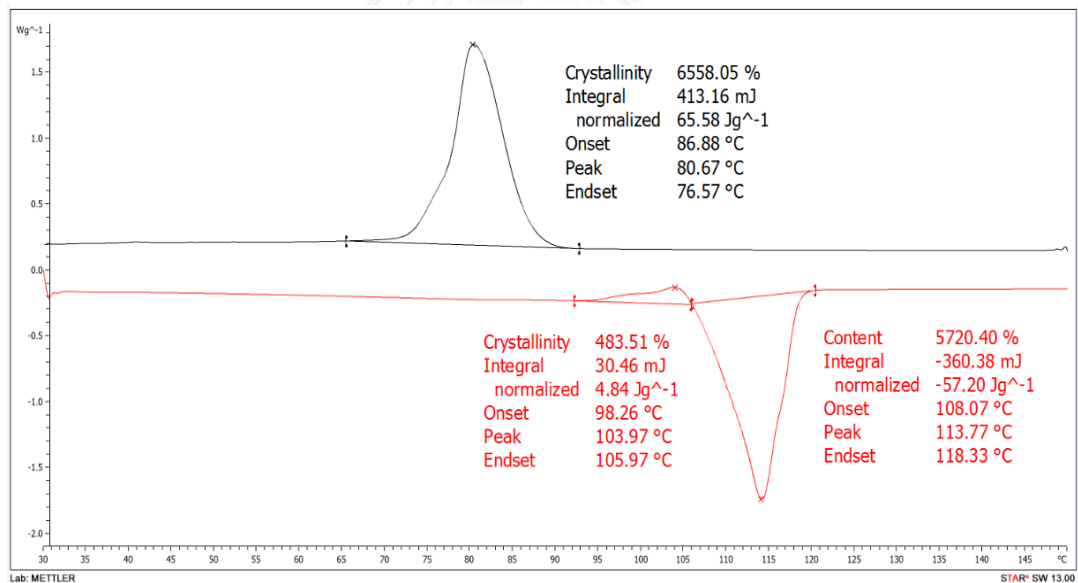
รูปที่ ก-3.3 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/
แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก (PGM0.3)



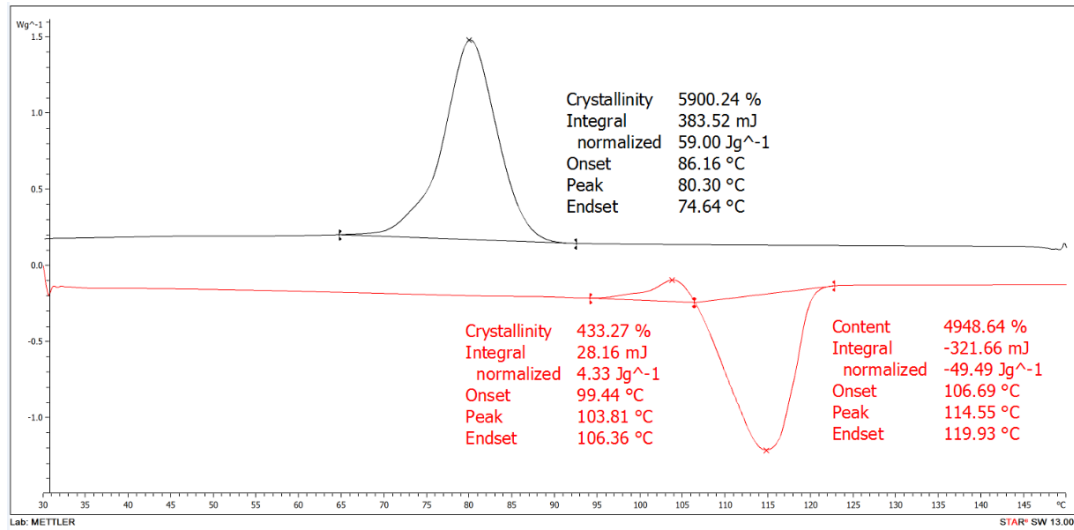
รูปที่ ก-3.4 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/
แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (PGM0.5)



รูปที่ ก-3.5 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/
แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PGM1)



รูปที่ ก-3.6 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/
แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (PGM2)

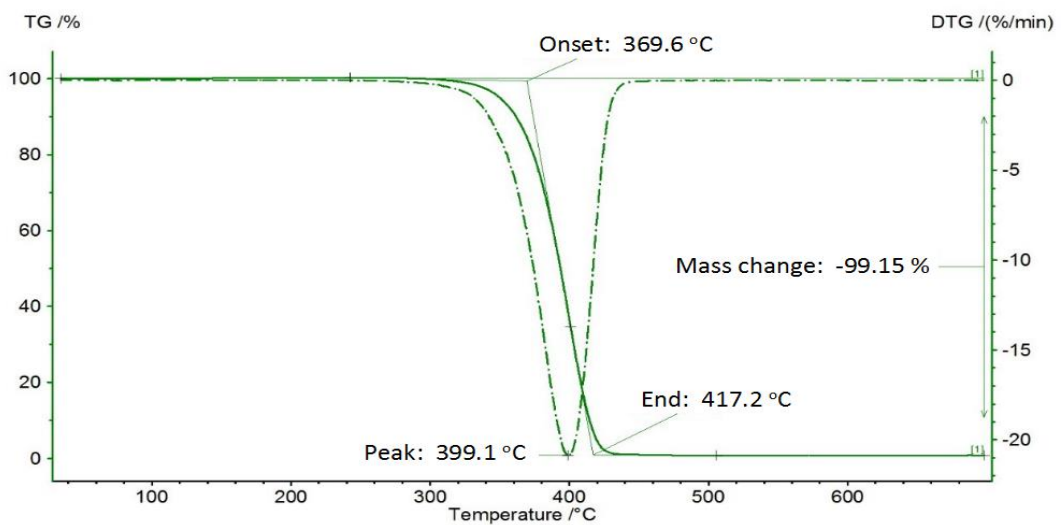


รูปที่ ก-3.7 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทีลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/
แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (PGM3)

ภาคผนวก ข

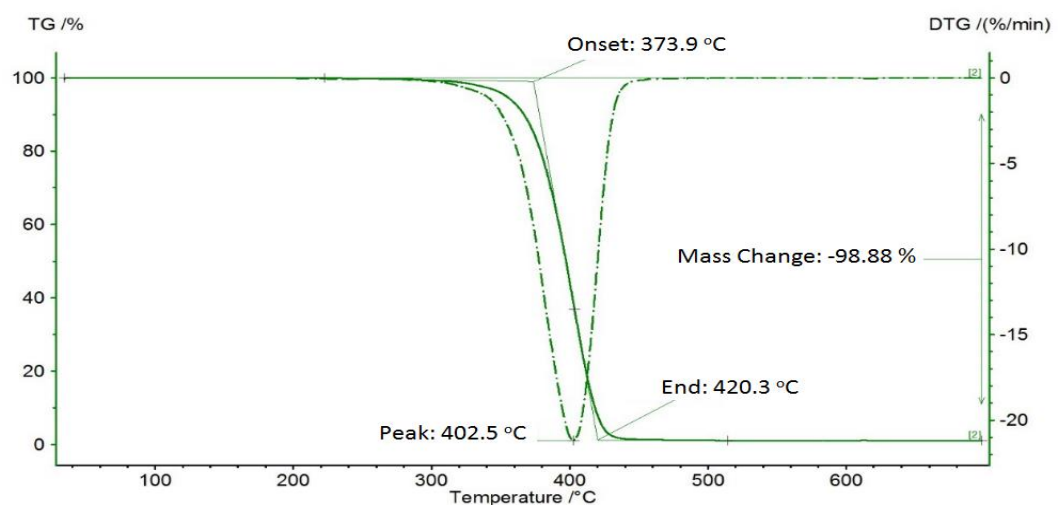
TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

ข-1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

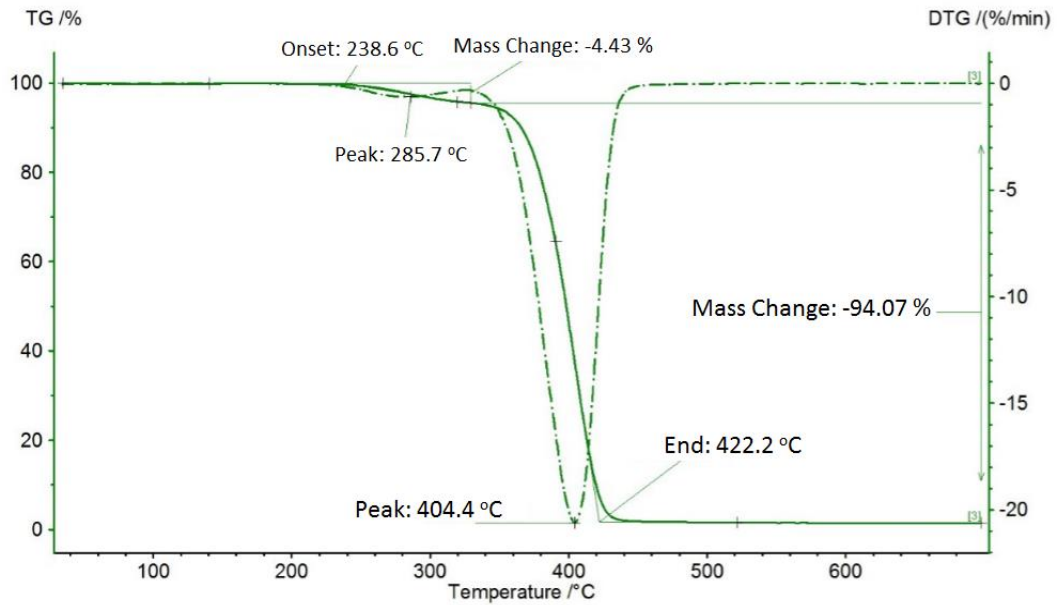


รูปที่ ข-1.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P)

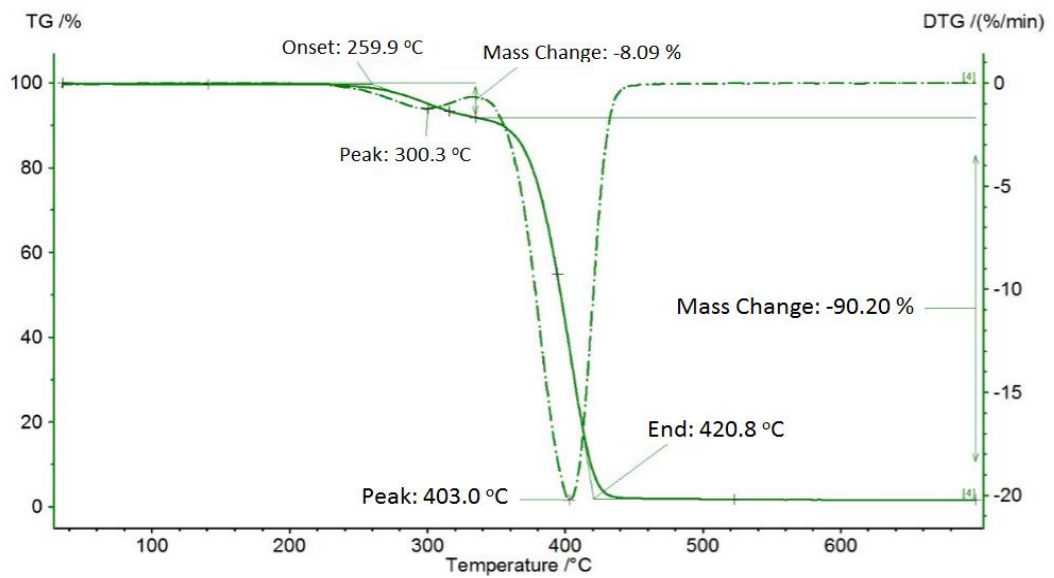
ข-2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ และพอลิ-บิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส เมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์คงที่ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)



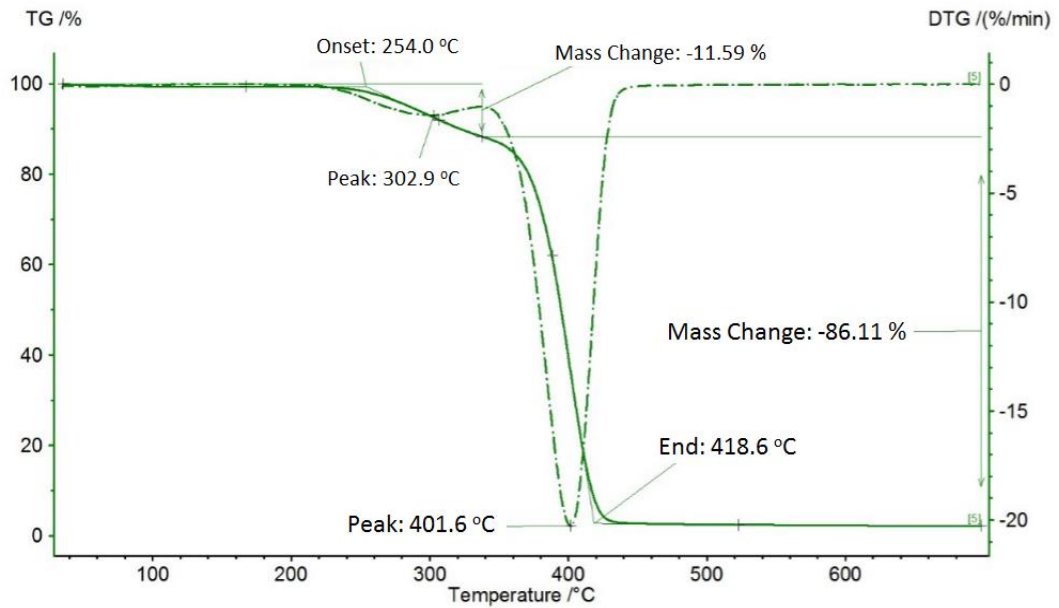
รูปที่ ข-2.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG)



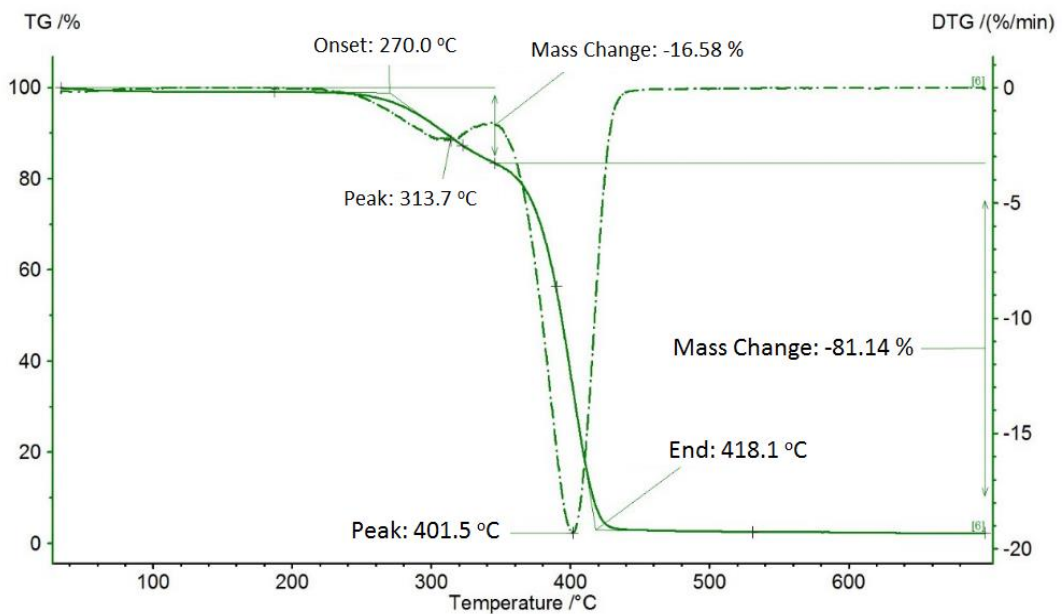
รูปที่ ข-2.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PGM5)



รูปที่ ข-2.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (PGM10)

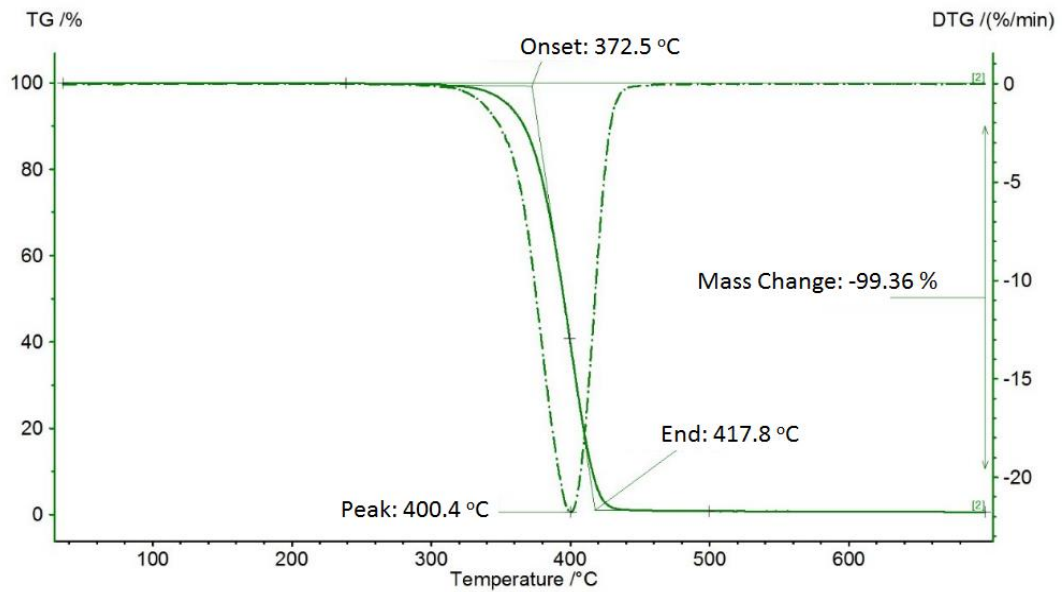


รูปที่ ข-2.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (PGM15)

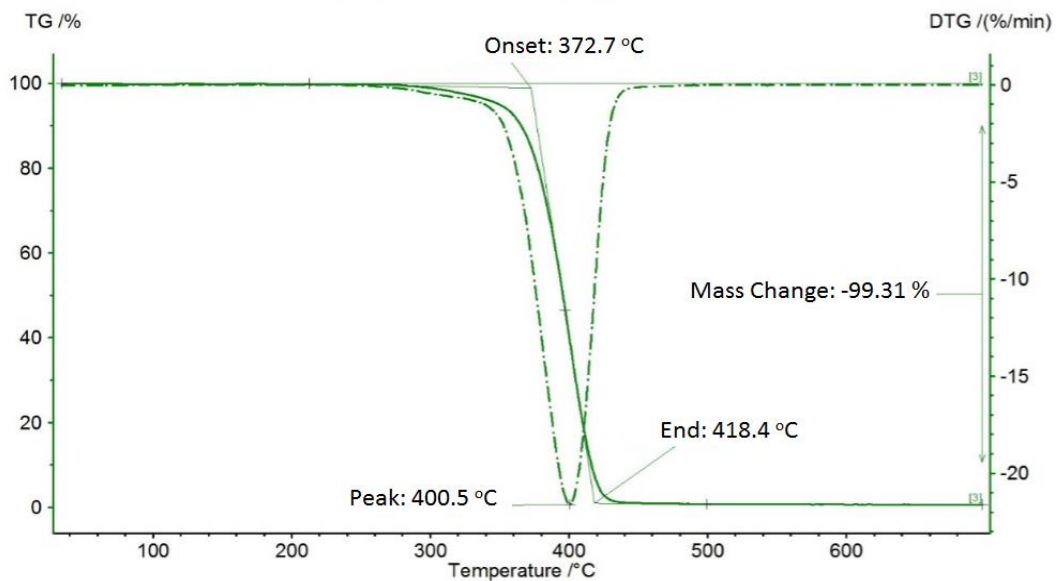


รูปที่ ข-2.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส ที่มีปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (PGM20)

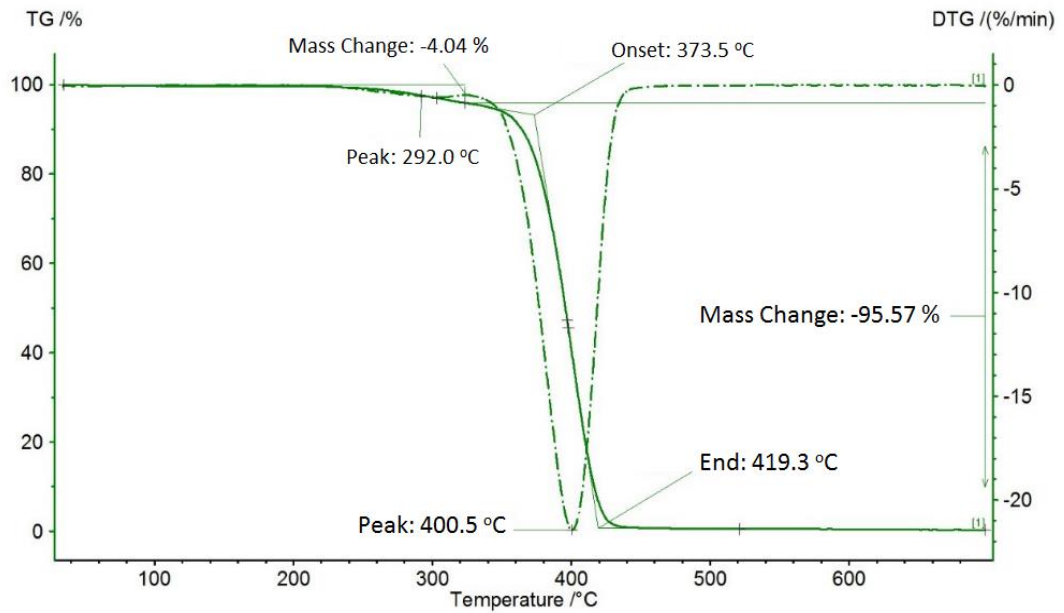
ข-3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคงที่ (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก)



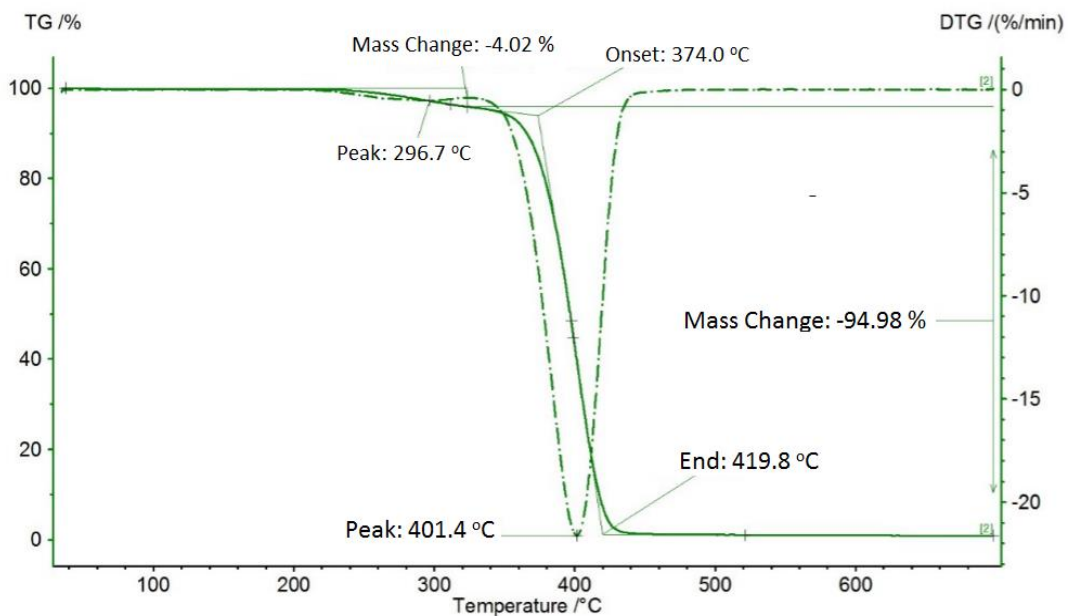
รูปที่ ข-3.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM)



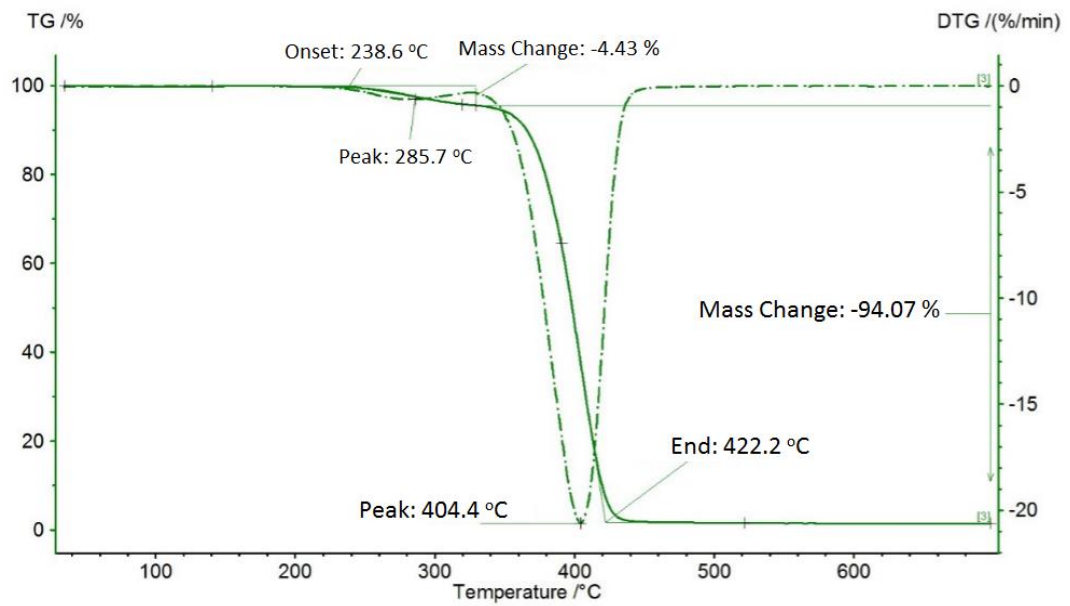
รูปที่ ข-3.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก (PMG0.1)



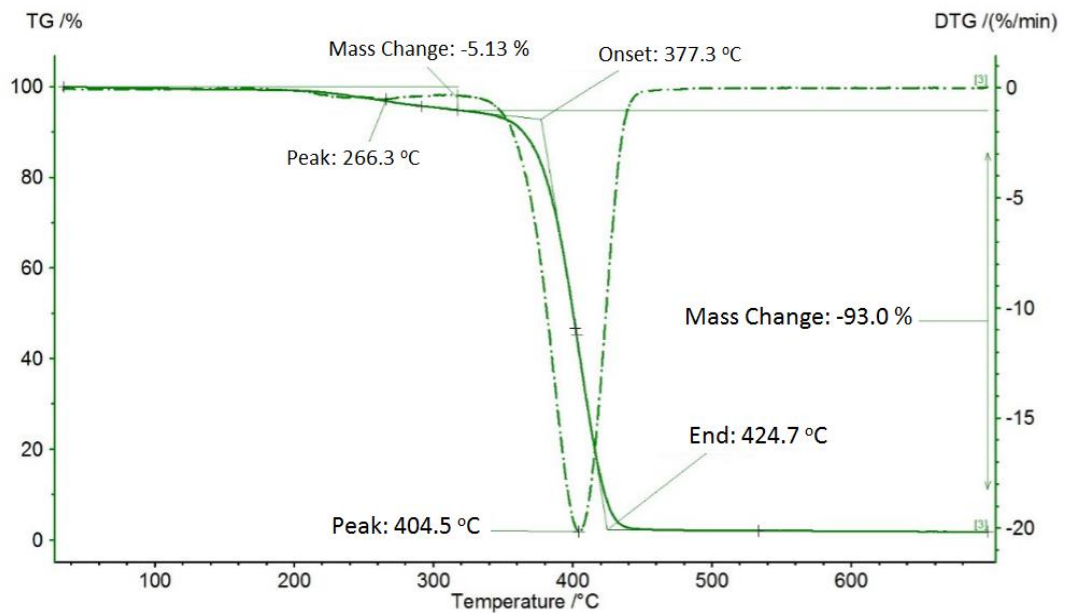
รูปที่ ข-3.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรฟีน-ออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก (PMG0.3)



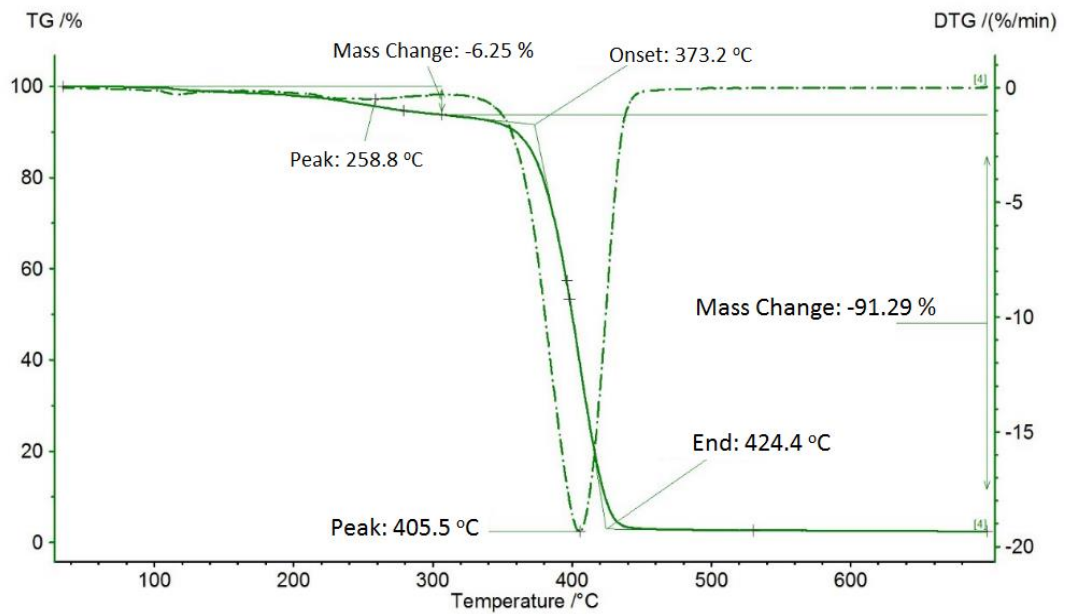
รูปที่ ข-3.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรฟีน-ออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (PMG0.5)



รูปที่ ข-3.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรไฟีน-ออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรไฟีนออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PMG1)



รูปที่ ข-3.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส/แกรไฟีน-ออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรไฟีนออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (PMG2)



รูปที่ ข-3.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตพอลิไบิวทีลีนซึกซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีน-ออกไซด์ ที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (PMG3)

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

ค-1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและฟิล์มคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส เมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์คงที่ (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)

ตาราง ค-1.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอมพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) โดยมีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	41.4	37.1	37.0	37.8	38.7	38.4	1.81
PG	34.1	24.1	26.0	28.1	27.7	28.0	3.80
PGM5	20.2	26.7	23.7	22.4	24.2	23.4	2.40
PGM10	22.2	20.7	20.5	20.7	23.4	21.5	1.30
PGM15	17.9	19.8	17.4	19.6	17.3	18.4	1.24
PGM20	17.7	19.6	17.8	18.9	19.3	18.6	0.90

ตาราง ค-1.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) โดยมีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ยังส์มอดุลัส (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	539.57	532.64	525.49	513.24	551.69	532.53	14.48
PG	610.17	577.70	613.93	555.55	638.03	606.51	32.45
PGM5	607.63	618.15	590.21	588.09	574.20	595.66	17.30
PGM10	676.23	599.87	585.12	778.73	676.52	663.29	77.14
PGM15	747.13	822.73	777.72	777.99	789.91	783.10	27.23
PGM20	821.09	911.63	920.52	855.62	931.83	888.14	47.60

ตาราง ค-1.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) โดยมีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ร้อยละความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	11.1	9.4	9.7	10.3	9.8	10.1	0.7
PG	7.3	4.7	5.0	6.2	5.3	5.7	1.0
PGM5	3.6	5.8	5.0	4.6	5.3	4.8	0.8
PGM10	4.0	4.7	4.4	3.0	4.3	4.1	0.7
PGM15	2.9	2.9	2.5	3.1	2.6	2.8	0.2
PGM20	2.3	2.6	2.2	2.8	2.5	2.5	0.2

ตาราง ค-1.4 ความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอม-พอลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโคร-คริสตัลลีนเซลลูโลส (PGM) โดยมีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ความทนแรงฉีกขาด (N/mm)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	16.2	17.6	16.6	16.8	17.8	17.0	0.7
PG	5.7	4.9	5.2	5.6	5.6	5.4	0.3
PGM5	3.3	4.2	4.3	3.9	3.0	3.8	0.6
PGM10	3.3	3.8	3.6	3.7	4.1	3.7	0.3
PGM15	2.4	2.6	2.7	2.7	2.8	2.6	0.2
PGM20	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.9	0.1

ค-2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและฟิล์มคอมพอลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโคร-คริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส คงที่ (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก)

ตาราง ค-2.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอม-พอลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน-เซลลูโลส /แกรฟีนออกไซด์ (PMG) โดยมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PGM3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	38.5	39.1	38.2	37.4	39.2	38.5	0.7
PM	28.6	26.9	27.4	27.3	27.1	27.5	0.7
PMG0.1	34.7	31.7	33.6	33.4	33.1	33.3	1.1
PMG0.3	27.9	27.2	26.0	25.0	25.6	26.3	1.2
PMG0.5	28.7	30.0	28.1	26.7	28.2	28.3	1.2

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
PMG1	27.7	28.1	28.0	28.0	28.3	28.0	0.2
PMG2	17.7	19.8	17.3	14.9	16.8	17.3	1.8
PMG3	16.3	18.1	16.3	15.5	18.3	16.9	1.2

ตาราง ค-2.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส /แกรฟีนออกไซด์ (PMG) โดยมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PGM3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ยังส์มอดุลัส (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	771.47	765.33	687.91	761.28	678.24	732.85	45.71
PM	860.94	836.11	820.87	860.16	813.87	838.39	21.77
PMG0.1	1003.7	916.55	941.24	988.83	1032.80	976.62	47.17
PMG0.3	924.68	897.61	883.07	798.16	852.71	871.25	48.41
PMG0.5	842.32	919.63	899.72	796.33	839.57	859.51	49.79
PMG1	928.88	966.06	955.09	956.81	997.95	960.96	24.88
PMG2	1000.90	1052.40	955.34	882.39	909.52	960.11	68.56
PMG3	966.92	973.41	833.76	920.55	835.67	906.06	68.25

ตาราง ค-2.3 ความยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) และฟิล์มคอมพอสิตพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส /แกรฟีนออกไซด์ (PMG) โดยมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PGM3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ร้อยละความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	8.6	8.9	9.8	8.1	10.0	9.1	0.8
PM	5.8	5.3	5.8	5.5	5.7	5.6	0.2

ตัวอย่าง	ร้อยละความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
PMG0.1	6.7	6.1	5.9	6.6	6.1	6.3	0.3
PMG0.3	5.0	5.1	4.5	4.9	4.9	4.9	0.2
PMG0.5	7.1	6.5	5.5	6.8	6.9	6.6	0.6
PMG1	5.1	4.9	5.1	4.7	4.5	4.9	0.3
PMG2	2.2	2.4	2.2	1.9	2.3	2.2	0.2
PMG3	2.1	2.5	2.5	2.1	2.8	2.4	0.3

ตาราง ค-2.4 ความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซักซิเนต (P) และฟิล์มคอม-พอลิไบิวทิลีนซักซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (PM) พอลิไบิวทิลีนซักซิเนต/ไมโครคริสตัลลิน-เซลลูโลส /แกรฟีนออกไซด์ (PMG) โดยมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PGM3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ความทนแรงฉีกขาด (N/mm)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
P	16.2	17.6	16.6	16.8	17.8	17.0	0.7
PM	9.5	8.9	8.7	7.5	8.1	8.5	0.8
PMG0.1	7.5	7.4	7.2	6.6	6.2	7.0	0.6
PMG0.3	6.1	5.8	5.0	6.1	5.8	5.8	0.5
PMG0.5	6.5	5.5	5.6	5.9	6.3	6.0	0.4
PMG1	3.3	4.2	4.3	3.9	3.0	3.8	0.6
PMG2	2.0	1.7	1.3	1.3	1.7	1.6	0.3
PMG3	1.3	1.5	1.3	1.5	1.6	1.4	0.1

ภาคผนวก ง

การดูดซึมน้ำของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอลิเมอร์พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

ตาราง ง-1.1 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วันของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) คอมพอลิเมอร์พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส โดยมีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซึมน้ำ				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	0.42	0.31	0.19	0.31	0.11
PG	0.82	0.55	0.69	0.69	0.14
PGM5	1.68	1.79	1.97	1.81	0.15
PGM10	2.35	2.25	2.15	2.25	0.10
PGM15	2.84	2.64	2.61	2.70	0.12
PGM20	3.31	3.37	3.27	3.32	0.05

ตาราง ง-1.2 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วันของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) คอมพอลิเมอร์พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโคร-คริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ โดยมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซึมน้ำ				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
P	0.81	0.74	0.58	0.71	0.12
PM	0.95	0.86	1.01	0.94	0.08
PMG0.1	1.33	1.36	1.54	1.41	0.11
PMG0.3	1.30	1.67	1.45	1.47	0.19
PMG0.5	1.39	1.62	1.61	1.54	0.13
PMG1	2.00	1.65	1.77	1.81	0.17
PMG2	3.21	3.03	2.99	3.08	0.12
PMG3	3.27	3.55	3.17	3.33	0.20

ภาคผนวก จ

การย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตและคอมพอลิเมอร์พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

ตาราง จ-1 การย่อยสลายด้วยเบสในระยะเวลา 4 วันของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) คอมพอลิเมอร์พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส โดยมีปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักคงเหลือ			
	1 วัน	2 วัน	3 วัน	4 วัน
P	100.11	99.79	99.68	99.54
PG	100.3	99.70	99.04	97.18
PGM5	100.11	97.67	93.21	82.46
PGM10	100.31	97.65	91.71	79.51
PGM15	99.14	90.21	74.10	58.45
PGM20	98.77	89.52	65.43	48.89

ตาราง จ-2 การย่อยสลายด้วยเบสในระยะเวลา 4 วันของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (P) คอมพอลิเมอร์พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (PM) และพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ โดยมีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักคงเหลือ			
	1 วัน	2 วัน	3 วัน	4 วัน
P	99.97	99.74	99.64	99.44
PM	99.49	99.27	99.27	98.95
PMG0.1	100.11	99.93	99.86	98.77
PMG0.3	100.24	99.87	99.59	98.74
PMG0.5	100.07	99.93	96.57	95.08
PMG1	99.11	96.01	89.18	83.53
PMG2	99.68	95.71	87.81	75.12
PMG3	99.08	94.26	83.65	69.23

ภาคผนวก ฉ

T-test และ ANOVA ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับสมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ และการย่อยสลายด้วยเบสของฟิล์มพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตและคอมพอลิตพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ พอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์

ฉ-1 ผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต

ฉ-1.1 ความทนแรงดึง

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	38.400	0.809	5.565	8	0.0003	Yes
PG	5	27.998	1.685				

ฉ-1.2 ยั่งสัมมอดูลัส

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	532.5	6.474	4.188	8	0.0015	Yes
PG	5	599.1	14.51				

ฉ-1.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	10.06	0.300	7.811	8	< 0.0001	Yes
PG	5	5.70	0.472				

ฉ-1.4 ความทนแรงฉีกขาด

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	17.0	0.30	34.21	8	< 0.0001	Yes
PG	5	5.4	0.15				

ฉ-1.5 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วัน

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	0.31	0.07	3.71	4	0.0103	Yes
PG	5	0.69	0.08				

ฉ-1.6 การย่อยสลายในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	99.54	0.04	2.067	4	0.0538	No
PG	5	97.18	1.14				

ฉ-2 ผลของการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิ-บิวทิลีนซัคซิเนต/แกรฟีนออกไซด์ (PG) ตามลำดับ (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ฉ-2.1 ความทนแรงดึง

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	312.1	4	78.02	16.45	Yes
Within groups	94.88	20	4.744		
Total	407	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM5	4.558	4.679	Yes	0.0258
PG vs. PGM10	6.498	6.671	Yes	0.0011
PG vs. PGM15	9.598	9.853	Yes	<0.0001
PG vs. PGM20	9.338	9.586	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	1.94	1.992	No	0.6297
PGM5 vs. PGM15	5.04	5.174	Yes	0.0120
PGM5 vs. PGM20	4.78	4.907	Yes	0.0182

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PGM10 vs. PGM15	3.1	3.182	No	0.2023
PGM10 vs. PGM20	2.84	2.916	No	0.2745
PGM15 vs. PGM20	-0.26	0.2669	No	0.9997

ฉ-2.2 ยั่งส์มอดุ์ส

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	297321	4	74330	34.29	Yes
Within groups	43358	20	2168		
Total	340678	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM5	-22	1.057	No	0.9425
PG vs. PGM10	-64.22	3.084	No	0.2271
PG vs. PGM15	-184	8.838	Yes	<0.0001
PG vs. PGM20	-289.1	13.88	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	-42.21	2.027	No	0.6144
PGM5 vs. PGM15	-162	7.781	Yes	0.0002
PGM5 vs. PGM20	-267.1	12.83	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	-119.8	5.753	Yes	0.0048
PGM10 vs. PGM20	-224.8	10.8	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	-105	5.045	Yes	0.0147

ฉ-2.3 ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	36.93	4	9.231	19.67	Yes
Within groups	9.388	20	0.4694		
Total	46.31	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM5	0.84	2.742	No	0.3303
PG vs. PGM10	1.62	5.287	Yes	0.0101
PG vs. PGM15	2.9	9.465	Yes	<0.0001
PG vs. PGM20	3.22	10.51	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	0.78	2.546	No	0.4008
PGM5 vs. PGM15	2.06	6.723	Yes	0.0010
PGM5 vs. PGM20	2.38	7.768	Yes	0.0002
PGM10 vs. PGM15	1.28	4.178	No	0.0541
PGM10 vs. PGM20	1.6	5.222	Yes	0.0112
PGM15 vs. PGM20	0.32	1.044	No	0.9448

ฉ-2.4 ความทนแรงฉีกขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	35.34	4	8.835	80.61	Yes
Within groups	2.192	20	0.1096		
Total	37.53	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM5	1.66	11.21	Yes	<0.0001
PG vs. PGM10	1.7	11.48	Yes	<0.0001

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM15	2.76	18.64	Yes	<0.0001
PG vs. PGM20	3.52	23.78	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	0.04	0.2702	No	0.9997
PGM5 vs. PGM15	1.1	7.43	Yes	0.0003
PGM5 vs. PGM20	1.86	12.56	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	1.06	7.16	Yes	0.0005
PGM10 vs. PGM20	1.82	12.29	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	0.76	5.133	Yes	0.0128

ฉ-2.5 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	11.77	4	2.943	217	Yes
Within groups	0.1357	10	0.01357		
Total	11.91	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM5	-1.127	16.75	Yes	<0.0001
PG vs. PGM10	-1.563	23.25	Yes	<0.0001
PG vs. PGM15	-2.01	29.89	Yes	<0.0001
PG vs. PGM20	-2.63	39.11	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	-0.4367	6.493	Yes	0.0069
PGM5 vs. PGM15	-0.8833	13.14	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM20	-1.503	22.36	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	-0.4467	6.642	Yes	0.0059
PGM10 vs. PGM20	-1.067	15.86	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	-0.62	9.22	Yes	0.0005

ฉ-2.6 การย่อยสลายในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	4065	4	1016	127.9	Yes
Within groups	79.44	10	7.944		
Total	4144	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PG vs. PGM5	14.72	9.046	Yes	0.0006
PG vs. PGM10	17.04	10.47	Yes	0.0002
PG vs. PGM15	38.73	23.8	Yes	<0.0001
PG vs. PGM20	44.78	27.52	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	2.323	1.428	No	0.8454
PGM5 vs. PGM15	24.01	14.76	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM20	30.06	18.47	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	21.69	13.33	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM20	27.74	17.05	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	6.047	3.716	No	0.1379

ฉ-3 ผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์คงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตตามลำดับ (PGM5, PGM10, PGM15 และ PGM20 ตามลำดับ)

ฉ-3.1 ความทนแรงดึง

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	1369	4	342.2	133.7	Yes
Within groups	51.2	20	2.56		
Total	1420	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM5	14.96	20.91	Yes	<0.0001
P vs. PGM10	16.9	23.62	Yes	<0.0001
P vs. PGM15	20	27.95	Yes	<0.0001
P vs. PGM20	19.74	27.59	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	1.94	2.711	No	0.3407
PGM5 vs. PGM15	5.04	7.043	Yes	0.0006
PGM5 vs. PGM20	4.78	6.68	Yes	0.0011
PGM10 vs. PGM15	3.1	4.332	Yes	0.0432
PGM10 vs. PGM20	2.84	3.969	No	0.0727
PGM15 vs. PGM20	-0.26	0.3633	No	0.9990

ฉ-3.2 ยั่งส์มอดลัส

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	389480	4	97370	48.71	Yes
Within groups	39983	20	1999		
Total	429463	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM5	-88.55	4.429	Yes	0.0375
P vs. PGM10	-130.8	6.54	Yes	0.0014
P vs. PGM15	-250.6	12.53	Yes	<0.0001
P vs. PGM20	-355.6	17.78	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	-42.21	2.111	No	0.5785
PGM5 vs. PGM15	-162	8.102	Yes	0.0001
PGM5 vs. PGM20	-267.1	13.36	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	-119.8	5.991	Yes	0.0033
PGM10 vs. PGM20	-224.8	11.24	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	-105	5.253	Yes	0.0106

ฉ-3.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	187.8	4	46.95	140.1	Yes
Within groups	6.7	20	0.335		
Total	194.5	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM5	5.2	20.09	Yes	<0.0001
P vs. PGM10	5.98	23.1	Yes	<0.0001
P vs. PGM15	7.26	28.05	Yes	<0.0001
P vs. PGM20	7.58	29.28	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	0.78	3.013	No	0.2462
PGM5 vs. PGM15	2.06	7.958	Yes	0.0001
PGM5 vs. PGM20	2.38	9.195	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	1.28	4.945	Yes	0.0172
PGM10 vs. PGM20	1.6	6.181	Yes	0.0024
PGM15 vs. PGM20	0.32	1.236	No	0.9030

ฉ-3.4 ความทนแรงฉีกขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	797.2	4	199.3	1116	Yes
Within groups	3.572	20	0.1786		
Total	800.8	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM5	13.26	70.16	Yes	<0.0001
P vs. PGM10	13.3	70.37	Yes	<0.0001

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM15	14.36	75.98	Yes	<0.0001
P vs. PGM20	15.12	80	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	0.04	0.2116	No	0.9999
PGM5 vs. PGM15	1.1	5.82	Yes	0.0043
PGM5 vs. PGM20	1.86	9.841	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	1.06	5.609	Yes	0.0061
PGM10 vs. PGM20	1.82	9.63	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	0.76	4.021	No	0.0675

ฉ-3.5 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	15.46	4	3.866	307.6	Yes
Within groups	0.1257	10	0.01257		
Total	15.59	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM5	-1.507	23.28	Yes	<0.0001
P vs. PGM10	-1.943	30.03	Yes	<0.0001
P vs. PGM15	-2.39	36.93	Yes	<0.0001
P vs. PGM20	-3.01	46.51	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	-0.4367	6.747	Yes	0.0053
PGM5 vs. PGM15	-0.8833	13.65	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM20	-1.503	23.23	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	-0.4467	6.901	Yes	0.0045
PGM10 vs. PGM20	-1.067	16.48	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	-0.62	9.579	Yes	0.0004

ฉ-3.6 การย่อยสลายในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	4404	4	1101	153.7	Yes
Within groups	71.66	10	7.166		
Total	4476	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PGM5	17.08	11.05	Yes	0.0001
P vs. PGM10	19.4	12.55	Yes	<0.0001
P vs. PGM15	41.09	26.59	Yes	<0.0001
P vs. PGM20	47.14	30.5	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM10	2.323	1.503	No	0.8208
PGM5 vs. PGM15	24.01	15.54	Yes	<0.0001
PGM5 vs. PGM20	30.06	19.45	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM15	21.69	14.03	Yes	<0.0001
PGM10 vs. PGM20	27.74	17.95	Yes	<0.0001
PGM15 vs. PGM20	6.047	3.912	No	0.1120

ฉ-4 ผลของการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ฉ-4.1 ความทนแรงดึง

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	38.48	0.3277	24.89	8	< 0.0001	Yes
PM	5	27.46	0.2977				

ฉ-4.2 ยั่งส์มอดุ์ลั้ส

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	732.8	20.44	4.662	8	0.0008	Yes
PM	5	838.4	9.736				

ฉ-4.3 ความยี้ดตัวสูงสุ์ด ณ จุ์ดขาด

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	9.08	0.3597	9.287	8	< 0.0001	Yes
PM	5	5.62	0.09695				

ฉ-4.4 ความทนแรงฉีกขาด

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	17.0	0.3033	18.48	8	< 0.0001	Yes
PM	5	8.54	0.3429				

ฉ-4.5 การดูดซึ่มน้ำในระยะเวลา 7 วัน

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	17.0	0.3033	18.48	8	< 0.0001	Yes
PM	5	8.54	0.3429				

ฉ-4.6 การย้อยสลายในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

Samples	N	Mean	Std. Deviation	T	df	P value (One-tailed)	Significant?
P	5	17.0	0.3033	18.48	8	< 0.0001	Yes
PM	5	8.54	0.3429				

ฉ-5 ผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิวิ-
ทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (PM) ตามลำดับ (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1,
PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ฉ-5.1 ความทนแรงดึง

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	1105	6	184.1	141.6	Yes
Within groups	36.4	28	1.3		
Total	1141	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG0.1	-5.84	11.45	Yes	<0.0001
PM vs. PMG0.3	1.12	2.196	No	0.7115
PM vs. PMG0.5	-0.88	1.726	No	0.8803
PM vs. PMG1	-0.56	1.098	No	0.9854
PM vs. PMG2	10.16	19.92	Yes	<0.0001
PM vs. PMG3	10.56	20.71	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	6.96	13.65	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.5	4.96	9.727	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG1	5.28	10.35	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG2	16	31.38	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	16.4	32.16	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-2	3.922	No	0.1171
PMG0.3 vs. PMG1	-1.68	3.295	No	0.2657
PMG0.3 vs. PMG2	9.04	17.73	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	9.44	18.51	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	0.32	0.6275	No	0.9993
PMG0.5 vs. PMG2	11.04	21.65	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	11.44	22.43	Yes	<0.0001

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PMG1 vs. PMG2	10.72	21.02	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	11.12	21.81	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	0.4	0.7844	No	0.9976

ฉ-5.2 ยั่งส์มอดุ์ส

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	93697	6	15616	6.247	Yes
Within groups	69997	28	2500		
Total	163694	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG0.1	-138.2	6.182	Yes	0.0026
PM vs. PMG0.3	-32.86	1.469	No	0.9401
PM vs. PMG0.5	-21.12	0.9447	No	0.9934
PM vs. PMG1	-122.6	5.482	Yes	0.0093
PM vs. PMG2	-121.7	5.444	Yes	0.0100
PM vs. PMG3	-67.67	3.026	No	0.3583
PMG0.1 vs. PMG0.3	105.4	4.713	Yes	0.0347
PMG0.1 vs. PMG0.5	117.1	5.237	Yes	0.0143
PMG0.1 vs. PMG1	15.67	0.7006	No	0.9987
PMG0.1 vs. PMG2	16.51	0.7385	No	0.9983
PMG0.1 vs. PMG3	70.56	3.156	No	0.3115
PMG0.3 vs. PMG0.5	11.73	0.5247	No	0.9998
PMG0.3 vs. PMG1	-89.71	4.012	No	0.1029
PMG0.3 vs. PMG2	-88.86	3.974	No	0.1087
PMG0.3 vs. PMG3	-34.82	1.557	No	0.9225

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PMG0.5 vs. PMG1	-101.4	4.537	Yes	0.0461
PMG0.5 vs. PMG2	-100.6	4.499	Yes	0.0490
PMG0.5 vs. PMG3	-46.55	2.082	No	0.7583
PMG1 vs. PMG2	0.848	0.03792	No	>0.9999
PMG1 vs. PMG3	54.9	2.455	No	0.5990
PMG2 vs. PMG3	54.05	2.417	No	0.6159

ฉ-5.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	91.99	6	15.33	132.2	Yes
Within groups	3.248	28	0.116		
Total	95.24	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG0.1	-0.66	4.333	No	0.0635
PM vs. PMG0.3	0.74	4.858	Yes	0.0273
PM vs. PMG0.5	-0.94	6.171	Yes	0.0027
PM vs. PMG1	0.76	4.99	Yes	0.0219
PM vs. PMG2	3.42	22.45	Yes	<0.0001
PM vs. PMG3	3.22	21.14	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	1.4	9.191	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.5	-0.28	1.838	No	0.8463
PMG0.1 vs. PMG1	1.42	9.323	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG2	4.08	26.79	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	3.88	25.47	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-1.68	11.03	Yes	<0.0001

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PMG0.3 vs. PMG1	0.02	0.1313	No	>0.9999
PMG0.3 vs. PMG2	2.68	17.6	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	2.48	16.28	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	1.7	11.16	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG2	4.36	28.62	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	4.16	27.31	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	2.66	17.46	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	2.46	16.15	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	-0.2	1.313	No	0.9646

ฉ-5.4 ความทนแรงฉีกขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	218.2	6	36.36	147.8	Yes
Within groups	6.888	28	0.246		
Total	225.1	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG0.1	1.56	7.033	Yes	0.0005
PM vs. PMG0.3	2.78	12.53	Yes	<0.0001
PM vs. PMG0.5	2.58	11.63	Yes	<0.0001
PM vs. PMG1	4.8	21.64	Yes	<0.0001
PM vs. PMG2	6.94	31.29	Yes	<0.0001
PM vs. PMG3	7.1	32.01	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	1.22	5.5	Yes	0.0090
PMG0.1 vs. PMG0.5	1.02	4.599	Yes	0.0418
PMG0.1 vs. PMG1	3.24	14.61	Yes	<0.0001

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PMG0.1 vs. PMG2	5.38	24.25	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	5.54	24.98	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-0.2	0.9017	No	0.9948
PMG0.3 vs. PMG1	2.02	9.107	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG2	4.16	18.75	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	4.32	19.48	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	2.22	10.01	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG2	4.36	19.66	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	4.52	20.38	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	2.14	9.648	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	2.3	10.37	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	0.16	0.7213	No	0.9985

ฉ-5.5 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	14.7	6	2.45	111.2	Yes
Within groups	0.3086	14	0.02204		
Total	15.01	20			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG0.1	-0.47	5.483	Yes	0.0217
PM vs. PMG0.3	-0.5333	6.222	Yes	0.0084
PM vs. PMG0.5	-0.6	7	Yes	0.0031
PM vs. PMG1	-0.8667	10.11	Yes	<0.0001
PM vs. PMG2	-2.137	24.93	Yes	<0.0001
PM vs. PMG3	-2.39	27.88	Yes	<0.0001

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PMG0.1 vs. PMG0.3	-0.06333	0.7389	No	0.9980
PMG0.1 vs. PMG0.5	-0.13	1.517	No	0.9263
PMG0.1 vs. PMG1	-0.3967	4.628	No	0.0643
PMG0.1 vs. PMG2	-1.667	19.44	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	-1.92	22.4	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-0.06667	0.7777	No	0.9974
PMG0.3 vs. PMG1	-0.3333	3.889	No	0.1560
PMG0.3 vs. PMG2	-1.603	18.7	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	-1.857	21.66	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	-0.2667	3.111	No	0.3536
PMG0.5 vs. PMG2	-1.537	17.93	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	-1.79	20.88	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	-1.27	14.82	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	-1.523	17.77	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	-0.2533	2.955	No	0.4078

ฉ-5.6 การย่อยสลายในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	2814	6	469	214.7	Yes
Within groups	30.58	14	2.184		
Total	2845	20			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG0.1	0.1767	0.207	No	>0.9999
PM vs. PMG0.3	0.2133	0.25	No	>0.9999
PM vs. PMG0.5	3.873	4.539	No	0.0717

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
PM vs. PMG1	15.42	18.08	Yes	<0.0001
PM vs. PMG2	23.83	27.93	Yes	<0.0001
PM vs. PMG3	29.72	34.83	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	0.03667	0.04297	No	>0.9999
PMG0.1 vs. PMG0.5	3.697	4.332	No	0.0924
PMG0.1 vs. PMG1	15.25	17.87	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG2	23.65	27.72	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	29.55	34.63	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	3.66	4.289	No	0.0973
PMG0.3 vs. PMG1	15.21	17.83	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG2	23.62	27.68	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	29.51	34.58	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	11.55	13.54	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG2	19.96	23.39	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	25.85	30.3	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	8.407	9.852	Yes	0.0001
PMG1 vs. PMG3	14.3	16.76	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	5.893	6.907	Yes	0.0035

ฉ-6 ผลของการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคงที่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตตามลำดับ (PMG0.1, PMG0.3, PMG0.5, PMG1, PMG2 และ PMG3 ตามลำดับ)

ฉ-6.1 ความทนแรงดึง

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	1854	6	309	235.3	Yes
Within groups	36.78	28	1.314		
Total	1891	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PMG0.1	5.18	10.11	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.3	12.14	23.69	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.5	10.14	19.78	Yes	<0.0001
P vs. PMG1	10.46	20.41	Yes	<0.0001
P vs. PMG2	21.18	41.32	Yes	<0.0001
P vs. PMG3	21.58	42.1	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	6.96	13.58	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.5	4.96	9.677	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG1	5.28	10.3	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG2	16	31.22	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	16.4	32	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-2	3.902	No	0.1205
PMG0.3 vs. PMG1	-1.68	3.278	No	0.2710
PMG0.3 vs. PMG2	9.04	17.64	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	9.44	18.42	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	0.32	0.6243	No	0.9993
PMG0.5 vs. PMG2	11.04	21.54	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	11.44	22.32	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	10.72	20.91	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	11.12	21.7	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	0.4	0.7804	No	0.9977

ฉ-6.2 ยั่งส์มอดุ์ลัส

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	217456	6	36243	13.27	Yes
Within groups	76457	28	2731		
Total	293914	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PMG0.1	-243.8	10.43	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.3	-138.4	5.922	Yes	0.0042
P vs. PMG0.5	-126.7	5.42	Yes	0.0104
P vs. PMG1	-228.1	9.761	Yes	<0.0001
P vs. PMG2	-227.3	9.725	Yes	<0.0001
P vs. PMG3	-173.2	7.412	Yes	0.0003
PMG0.1 vs. PMG0.3	105.4	4.509	Yes	0.0482
PMG0.1 vs. PMG0.5	117.1	5.011	Yes	0.0211
PMG0.1 vs. PMG1	15.67	0.6704	No	0.9990
PMG0.1 vs. PMG2	16.51	0.7067	No	0.9987
PMG0.1 vs. PMG3	70.56	3.019	No	0.3609
PMG0.3 vs. PMG0.5	11.73	0.502	No	0.9998
PMG0.3 vs. PMG1	-89.71	3.839	No	0.1316
PMG0.3 vs. PMG2	-88.86	3.803	No	0.1384
PMG0.3 vs. PMG3	-34.82	1.49	No	0.9363
PMG0.5 vs. PMG1	-101.4	4.341	No	0.0628
PMG0.5 vs. PMG2	-100.6	4.305	No	0.0664
PMG0.5 vs. PMG3	-46.55	1.992	No	0.7928
PMG1 vs. PMG2	0.848	0.03629	No	>0.9999
PMG1 vs. PMG3	54.9	2.349	No	0.6459
PMG2 vs. PMG3	54.05	2.313	No	0.6617

ฉ-6.3 ความยึดสูงสุด ณ จุดขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	175.6	6	29.27	145.1	Yes
Within groups	5.648	28	0.2017		
Total	181.3	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PMG0.1	2.8	13.94	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.3	4.2	20.91	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.5	2.52	12.55	Yes	<0.0001
P vs. PMG1	4.22	21.01	Yes	<0.0001
P vs. PMG2	6.88	34.25	Yes	<0.0001
P vs. PMG3	6.68	33.26	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	1.4	6.97	Yes	0.0006
PMG0.1 vs. PMG0.5	-0.28	1.394	No	0.9530
PMG0.1 vs. PMG1	1.42	7.07	Yes	0.0005
PMG0.1 vs. PMG2	4.08	20.31	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	3.88	19.32	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-1.68	8.364	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG1	0.02	0.09957	No	>0.9999
PMG0.3 vs. PMG2	2.68	13.34	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	2.48	12.35	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	1.7	8.464	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG2	4.36	21.71	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	4.16	20.71	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	2.66	13.24	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	2.46	12.25	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	-0.2	0.9957	No	0.9912

ฉ-6.4 ความทนแรงฉีกขาด

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	836.2	6	139.4	612.1	Yes
Within groups	6.376	28	0.2277		
Total	842.6	34			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PMG0.1	10.02	46.95	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.3	11.24	52.67	Yes	<0.0001
P vs. PMG0.5	11.04	51.73	Yes	<0.0001
P vs. PMG1	13.26	62.13	Yes	<0.0001
P vs. PMG2	15.4	72.16	Yes	<0.0001
P vs. PMG3	15.56	72.91	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	1.22	5.717	Yes	0.0061
PMG0.1 vs. PMG0.5	1.02	4.78	Yes	0.0311
PMG0.1 vs. PMG1	3.24	15.18	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG2	5.38	25.21	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	5.54	25.96	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-0.2	0.9372	No	0.9937
PMG0.3 vs. PMG1	2.02	9.465	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG2	4.16	19.49	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	4.32	20.24	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	2.22	10.4	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG2	4.36	20.43	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	4.52	21.18	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	2.14	10.03	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	2.3	10.78	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	0.16	0.7497	No	0.9981

ฉ-6.5 การดูดซึมน้ำในระยะเวลา 7 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	16.22	6	2.703	116.4	Yes
Within groups	0.325	14	0.02321		
Total	16.54	20			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PMG0.1	-0.7	7.958	Yes	0.0009
P vs. PMG0.3	-0.7633	8.678	Yes	0.0004
P vs. PMG0.5	-0.83	9.435	Yes	0.0002
P vs. PMG1	-1.097	12.47	Yes	<0.0001
P vs. PMG2	-2.367	26.9	Yes	<0.0001
P vs. PMG3	-2.62	29.78	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	-0.06333	0.72	No	0.9983
PMG0.1 vs. PMG0.5	-0.13	1.478	No	0.9341
PMG0.1 vs. PMG1	-0.3967	4.509	No	0.0745
PMG0.1 vs. PMG2	-1.667	18.95	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	-1.92	21.83	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	-0.06667	0.7579	No	0.9977
PMG0.3 vs. PMG1	-0.3333	3.789	No	0.1745
PMG0.3 vs. PMG2	-1.603	18.23	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	-1.857	21.11	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	-0.2667	3.031	No	0.3808
PMG0.5 vs. PMG2	-1.537	17.47	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	-1.79	20.35	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	-1.27	14.44	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	-1.523	17.32	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	-0.2533	2.88	No	0.4357

ฉ-6.6 การย่อยสลายในสารละลายเบสเป็นเวลา 4 วัน

ANOVA Table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Significant?
Between groups	2846	6	474.3	226.3	Yes
Within groups	29.34	14	2.096		
Total	2875	20			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
P vs. PMG0.1	0.67	0.8016	No	0.9969
P vs. PMG0.3	0.7067	0.8454	No	0.9958
P vs. PMG0.5	4.367	5.224	Yes	0.0303
P vs. PMG1	15.92	19.04	Yes	<0.0001
P vs. PMG2	24.32	29.1	Yes	<0.0001
P vs. PMG3	30.22	36.15	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG0.3	0.03667	0.04387	No	>0.9999
PMG0.1 vs. PMG0.5	3.697	4.423	No	0.0828
PMG0.1 vs. PMG1	15.25	18.24	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG2	23.65	28.3	Yes	<0.0001
PMG0.1 vs. PMG3	29.55	35.35	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG0.5	3.66	4.379	No	0.0874
PMG0.3 vs. PMG1	15.21	18.2	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG2	23.62	28.25	Yes	<0.0001
PMG0.3 vs. PMG3	29.51	35.31	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG1	11.55	13.82	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG2	19.96	23.88	Yes	<0.0001
PMG0.5 vs. PMG3	25.85	30.93	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG2	8.407	10.06	Yes	<0.0001
PMG1 vs. PMG3	14.3	17.11	Yes	<0.0001
PMG2 vs. PMG3	5.893	7.051	Yes	0.0029



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุนิสา หวังปัญญา เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤษภาคม พ. ศ. 2535 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี การศึกษา 2557 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตร เคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2559

การเสนอผลงานวิจัย จากงานวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

Wangpunya, S., Soatthiyanon, N. and Potiyaraj, P. ‘Properties of poly(butylene succinate/graphene oxide/microcrystalline cellulose composites’, in Proceeding of the International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, 2017, Bangkok, Thailand.