

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่เสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต
กราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



นายสฤกษ์ ลิประพันธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/ALPHA CELLULOSE COMPOSITES COMPATIBILIZED WITH
GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE)

Mr. Sarit Liprapan



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิเมอร์ที่ลิ้นชักซีเน็ต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอลิเมอร์ที่เสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิเมอร์ที่ลิ้นชักซีเน็ต
โดย	นายสฤกษ์ ลิประพันธ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ หนูจักร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรินทร์ ชวศิริ)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ หนูจักร)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีภูถกิจ)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

สฤกษ์ ลิประพันธ์ : พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่เสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/ALPHA CELLULOSE COMPOSITES COMPATIBILIZED WITH GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ธรรมบุญ หนูจักร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราช, หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและตรวจสอบสมบัติของคอมพอสิตจากพลาสติกชีวภาพได้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคแอลฟาเซลลูโลสและใช้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยเริ่มจากการตอกกิ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งผลการจากวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนแทบสังเกตไม่เห็น และจากการไทเทรชันพบว่ามีไกลซิดิลเมทาคริเลตประมาณร้อยละ 3 ที่ต่อกิ่งอยู่บนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จากนั้นนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส (0 2 4 6 8 และ 10 ส่วนใน 100 ส่วนของเรซิน) และสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (0 5 และ 10 ส่วนใน 100 ส่วนของเรซิน) มาผสมแบบหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยการฉีดเข้าแบบ แล้วศึกษาผลของปริมาณตัวเติมเสริมแรง และปริมาณของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณของแอลฟาเซลลูโลสในคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ชิ้นงานคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ เสถียรภาพทางความร้อนต่ำลง และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ สมบัติเชิงกลโดยรวมกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไปช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและแอลฟาเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิก่อผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไปจำกัดความสามารถในการเข้าถึงของน้ำภายในคอมพอสิต จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคอมพอสิต คือ การใช้แอลฟาเซลลูโลส 6 ส่วนใน 100 ส่วนของเรซิน และไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 ส่วนใน 100 ส่วนของเรซิน

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5472126023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLY(BUTYLENE SUCCINATE) / ALPHA CELLULOSE / COMPATIBILIZER / COMPOSITE

SARIT LIPRAPAN: POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/ALPHA CELLULOSE COMPOSITES COMPATIBILIZED WITH GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE). ADVISOR: ASSOC. PROF. THUMNOON NHUJAK, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., pp.

The aims of this research are to prepare and investigate properties of composites from bioplastics those are poly(butylene succinate) reinforced with alpha cellulose in the presence of glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate). Initially, the grafting of poly(butylene succinate) with glycidyl methacrylate was carried out in a twin-screw extruder. The obtained glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) was analyzed with Fourier transform infrared spectroscopy and volumetric analysis. Although the FTIR spectogram indicated slightly change, the titration technique confirmed the existence of around 3% of glycidyl methacrylate grafting on poly(butylene succinate). Subsequently, poly(butylene succinate), alpha cellulose (0, 2, 4, 6, 8 and 10 parts per a hundred of resin, phr), and glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) (0, 5 and 10 phr) were melt-mixed in a twin-screw extruder. The obtained compounds were processed into test specimens by the injection molding process. The effects of amounts of the filler and the compatibilizer on mechanical properties, thermal properties and water absorbancy of poly(butylene succinate) composites were studied. It was found that, without the compatibilizer, when the amount of alpha cellulose increased, the mechanical properties and thermal stability decreased comparing with neat poly(butylene succinate). The water absorbent increased. When the compatibilizer was incorporated, the overall mechanical properties increased due to enhanced interaction between poly(butylene succinate) and alpha cellulose. Furthermore, the crystalline melting and crystallization temperatures slightly increased while the compatibilizer limited water accessibility in the composites. The results indicated that the optimum ratio for preparing such bioplastic composites was when the amounts of alpha cellulose and glycidyl methacrylate grated poly(butylene succinate) were 6 and 10 phr, respectively.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer	Student's Signature
Science	Advisor's Signature
Academic Year: 2014	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. รศ.ดร.ธรรมนุญ หนูจักร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนถึงการเอาใจใส่ดูแลและเสียเวลาในการตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์เป็นอย่างดี มาโดยตลอด

2. กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำทางวิชาการในการทำวิจัย

3. บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนการไปนำเสนอผลงานวิจัยในต่างประเทศ

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

5. รุ่นพี่ เพื่อน บุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเอื้อเฟื้อต่างๆเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พอลิบิวทิลีนซึกซิเนต.....	3
2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต.....	3
2.1.2 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต.....	4
2.1.3 การนำพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตไปใช้ประโยชน์.....	4
2.2 วัสดุคอมพอสิต.....	5
2.3 ตัวเติมและตัวเติมเสริมแรง.....	7
2.4 เซลลูโลส.....	7
2.5 สารเสริมสภาพเข้ากันได้.....	9
2.6 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	9
2.6.1 กระบวนการอัดรีด.....	9
2.6.1.1 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว.....	10

2.6.1.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	13
2.6.2 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ.....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย	19
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	20
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	21
3.4.1 การเตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต	21
3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต.....	22
3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของการกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์ลงบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยวิธีการไทเทรต.....	23
3.4.4 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพาวนด์และชิ้นงาน	24
3.4.5 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต	32
4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต.....	33
4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง	33
4.2.1.1 ความทนแรงดึง	33
4.2.1.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด.....	35
4.2.1.3 มอดุลัสของยัง.....	37
4.2.2 ความทนแรงดัดโค้ง	38
4.2.3 ความทนแรงกระแทก	40

4.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิต	42
4.3.1 การสลายตัวทางความร้อน	42
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอมพอสิตด้วยเทคนิคดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์.....	45
4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต	47
4.5 สมบัติการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
.....	53
รายการอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก ความทนแรงดึง.....	59
ภาคผนวก ข ความทนแรงดัดโค้ง.....	68
ภาคผนวก ค ความทนแรงกระแทก	70
ภาคผนวก ง TGA Thermogram ของพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	72
ภาคผนวก จ DSC Thermogram ของพอลิเมอร์คอมพอสิต	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	89

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3. 1 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมโกลซีดีลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	22
ตารางที่ 3. 2 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์	24
ตารางที่ 3. 3 องค์ประกอบของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์.....	26
ตารางที่ 4. 1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต	44
ตารางที่ 4. 2 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	46



สารบัญรูป

รูปที่ 2. 1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	3
รูปที่ 2. 2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	3
รูปที่ 2. 3 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	4
รูปที่ 2. 4 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว	10
รูปที่ 2. 5 โซนการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	12
รูปที่ 2. 6 ลักษณะการหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดสกรูคู่	14
รูปที่ 2. 7 เครื่องอัดรีดสกรูคู่	14
รูปที่ 2. 8 ส่วนประกอบเครื่องฉีดแบบพลาสติก]	16
รูปที่ 2. 9 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	17
รูปที่ 3. 1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28	22
รูปที่ 3. 2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	23
รูปที่ 3. 3 ตู้อบ ของ SHINI [®] plastic technologies รุ่น SHD-100T	25
รูปที่ 3. 4 เครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery รุ่น A25	27
รูปที่ 3. 5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV	27
รูปที่ 3. 6 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR100K	28
รูปที่ 3. 7 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR500	29
รูปที่ 3. 8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD	29
รูปที่ 3. 9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851	30
รูปที่ 3. 10 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo	31

รูปที่ 4. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 32

รูปที่ 4. 2 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 33

รูปที่ 4. 3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต..... 36

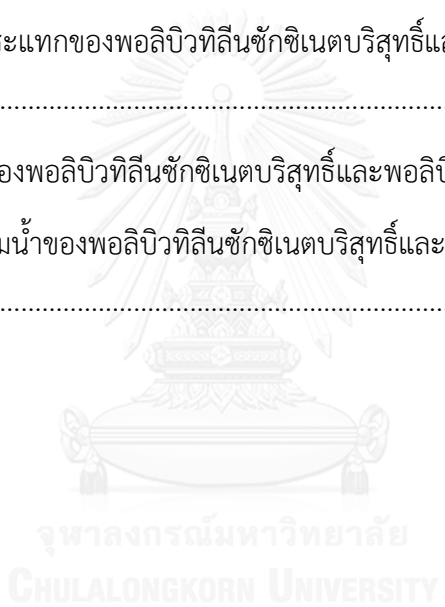
รูปที่ 4. 4 มอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 37

รูปที่ 4. 5 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 39

รูปที่ 4. 6 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 40

รูปที่ 4. 7 สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 49

รูปที่ 4. 8 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต 50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์และการแพทย์ ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณขยะพลาสติกและแก้ไขปัญหาอันเนื่องมาจากขยะพลาสติกที่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกทางการค้าส่วนใหญ่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและแตกสลายได้ยาก ดังนั้น การค้นคว้าและพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน ควรได้รับการสนับสนุนและกระทำอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรม ซึ่งขณะนี้ได้มีการนำพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate)) พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid)) พอลิแคโพรแล็กโตน (polycaprolactone) และเทอร์โมพลาสติกสตาρχ (thermoplastic starch) มาใช้ในทางการค้าบ้างแล้ว ซึ่งได้รับความสนใจและประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากข้อจำกัดด้านคุณภาพและราคาของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้การใช้งานยังไม่แพร่หลายมากนัก โดยงานวิจัยนี้มีแนวความคิดที่จะนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งที่มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิโพรพิลีนมาปรับปรุงสมบัติเพื่อให้สามารถใช้ทดแทนพลาสติกเหล่านี้ในการใช้งานบางอย่าง ด้วยการใส่สารตัวเติมชีวภาพประเภทแอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) ที่ได้จากฝ้าย ร่วมกับสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (compatibilizer) ที่เตรียมได้จากการต่อกิ่ง (grafting) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซิديلเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate) โดยคาดหวังว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้จะมีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับเตรียมเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

งานวิจัยนี้เริ่มจากการเตรียมไกลซิديلเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแล้วนำไปใช้เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-แอลฟาเซลลูโลสด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดแบบ แล้ววิเคราะห์ผลของการใช้ไกลซิديلเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและแอลฟาเซลลูโลส ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดซึมน้ำ และสัญญาณวิทยาของคอมพอสิตที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต โดยใช้ไกลซีดิลเมทาคริเลต กราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

1.2.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิตที่เตรียมได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

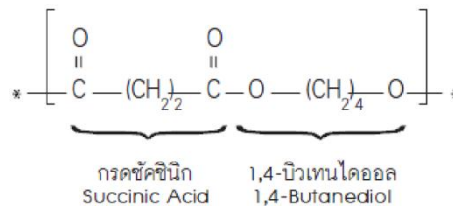
ได้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับเตรียมเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

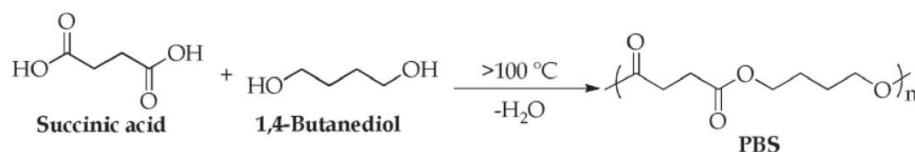
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีโครงสร้างเป็นกึ่งอสังฐาน (semicrystalline) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ มีสมบัติคล้ายกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ด้วยกระบวนการหลอมเหลวที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป มีสีขาวขุ่น มีความหนาแน่นประมาณ 1.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิด มีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง 111-116 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปแล้วพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้ง่าย



รูปที่ 2. 1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [1]

2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

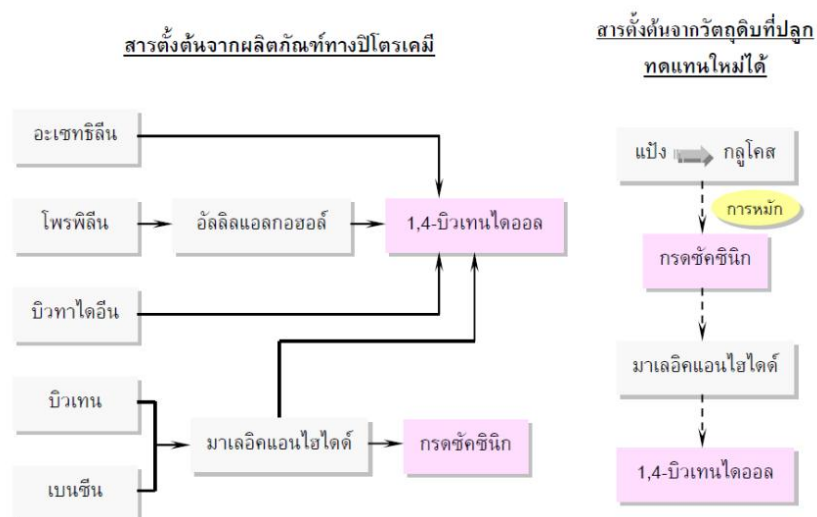
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาควบนั่นของกรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [2]

โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี เริ่มจากก๊าซบิวเทน ถูกเปลี่ยนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออลต่อไป อย่างไรก็ตามกรดซัคซินิกยังผลิตได้จากวัตถุดิบที่สามารถปลูกใหม่ทดแทนได้ เช่น มันสำปะหลัง แป้ง และอ้อย เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียและรา ได้เป็นกรดซัคซินิก

นอกจากนี้กรดซัคซินิกที่ได้สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1,4-บิวเทนไดออล โดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2. 3 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [3]

2.1.2 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการ hydro-biodegradable เริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส เกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) หรือสายโซ่พอลิเมอร์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง และสามารถเกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ต่อไปได้ ซึ่งหากมีการย่อยสลายที่สมบูรณ์ ผลผลิตสุดท้ายจะได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล โดยระยะเวลาในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความชื้นหรือปริมาณน้ำในดิน อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง การถ่ายเทอากาศในดิน ปริมาณแร่ธาตุอาหารในดินที่จะมีช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ลักษณะเนื้อดิน และรวมถึงชนิดของจุลินทรีย์ในดิน นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันก็ใช้เวลาในการย่อยสลายที่แตกต่างกันด้วย [4]

2.1.3 การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้ประโยชน์

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถนำไปใช้แทนที่พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต พอลิโพรพิลีน และพอลิโอเลฟินส์อื่นได้ โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง รวมทั้งพอลิสไตรีน ผลิตภัณฑ์ที่นิยมนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้ เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร หลอด

ฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียว ผลิตภัณฑ์อนามัย ขวดน้ำ फिल्मคลุมดินสำหรับการเกษตร รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในรถยนต์ [3]

2.2 วัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิต (composite materials) หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมกัน แต่จะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีเฟสที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 เฟส (phase) โดยทั่วไปแล้วคอมพอสิตจะประกอบด้วยวัสดุชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) ซึ่งเป็นเฟสที่ต่อเนื่อง (continuous phase) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัว (dispersed phase) อยู่ในเนื้อเมทริกซ์ หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase) [5-7]

เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในวัสดุคอมพอสิต ทำหน้าที่ยึดเกาะหรือเชื่อมประสานกับตัวเติมเสริมแรงที่เป็นเส้นใยหรืออนุภาค ปกป้องตัวเติมเสริมแรงจากรอยขีดข่วน ส่องผ่านแรงหรือหรือความเค้นระหว่างตัวเติมเสริมแรง โดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. วัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ซึ่งมีการพัฒนาเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสามารถสร้างเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน มีขนาดใหญ่ นำไปใช้งานได้สะดวก บำรุงรักษาง่าย ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้อาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมเซตพลาสติกและเทอร์โมพลาสติก
2. วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ มักใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิเมอร์ แต่มีราคาแพงและน้ำหนักมาก จึงมีการใช้งานไม่กว้างขวางนัก วัสดุคอมพอสิตกลุ่มนี้จะประกอบด้วยโลหะอัลลอยด์เสริมแรงด้วยอนุภาคหรือเส้นใย
3. วัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ ที่ถูกเสริมแรงด้วยอนุภาคหรือเส้นใย เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ เซรามิกที่ใช้ ได้แก่ ลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต อะลูมินา ซิลิกอนไนไตรด์ เป็นต้น

ตัวเติมเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงหรือเสริมแรงจากเมทริกซ์ เมื่อวัสดุคอมพอสิตได้รับแรงกระทำ ไม่ว่าจะเป็นแรงอัด แรงดึง หรือแรงเฉือน ทำให้วัสดุดังกล่าวสามารถทนแรงเหล่านั้นได้ดีกว่าวัสดุที่ไม่ใส่ตัวเติมเสริมแรงได้ ซึ่งวัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของตัวเติมเสริมแรงได้ดังนี้

1. วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดเป็นอนุภาค (particulate-filled composite) ประกอบด้วยเฟสต่อเนื่องซึ่งเป็นเฟสส่วนใหญ่ของระบบ และเป็นเฟสของตัวเติมซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง โดยอนุภาคจะมีมิติของรูปร่างที่แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งมีสมบัติต่างๆขึ้นกับสมบัติของอนุภาค ได้แก่

- รูปร่างของอนุภาค โดยรูปร่างมีผลกับสมบัติต่างๆ ตัวอย่างเช่น แผ่นบางๆ (flake) มีแนวโน้มในการจัดเรียงตัวระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีอนุภาคที่มีรูปร่างแปลกๆ เช่น อนุภาคกลม (particle) หรือเม็ดขนาดใหญ่ (filler) เป็นต้น
- ขนาดของอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค โดยอนุภาคที่ละเอียดกว่าในเมทริกซ์ชนิดเดียวกันจะให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง ความแข็ง โมดูลัสสูง ส่วนอนุภาคที่หยาบกลับทำให้สมบัติทางกายภาพลดลง
- ธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิว สำหรับอนุภาคที่มีหมู่มีขั้วบนพื้นผิว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ชอบน้ำส่งผลให้ไม่เกาะติดพอลิเมอร์ การปรับปรุงให้อนุภาคสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จำเป็นต้องดัดแปรหรือปรับแต่งพื้นผิวเสียก่อน

2. วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดเป็นเส้นใย (fiber filled composite) โดยเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความยาวมากกว่าพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก มีทั้งเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ฝ้าย ไหม เป็นต้น และเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงเส้นใยอนินทรีย์ เช่น เส้นใยแก้ว เป็นต้น โดยสามารถใช้ได้กับทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก

วัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์เพื่อใช้ในทางการค้า ส่วนใหญ่เป็นวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากมีตัวเติมเสริมแรงและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้เลือกหลายชนิด จึงทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตได้มากมาย เนื่องจากมีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ เช่น

- เพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรง และคงรูปร่างได้ดีกว่า
- เพิ่มความเหนียว และความทนแรงกระแทก
- ทำให้อุณหภูมิบิดตัวสูงขึ้น
- ลดการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ
- ปรับปรุงสมบัติด้านไฟฟ้า
- ลดต้นทุนการผลิต
- ยืดอายุการใช้งาน
- ลดการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อน

2.3 ตัวเติมและตัวเติมเสริมแรง

ตัวเติมและตัวเติมเสริมแรง (fillers and reinforcing fillers) ที่ใช้ในคอมพอสิต มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือเพื่อลดต้นทุน สารเพิ่มเนื้อเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูก ใช้ในการเพิ่มจำนวนให้กับเนื้อพอลิเมอร์ และลดปริมาณสารอื่นที่มีราคาแพง โดยสารตัวเติมอาจจะช่วยเพิ่มความแข็งตึงและความทนต่อความร้อนให้กับวัสดุคอมพอสิตได้อีกด้วย และตัวเติมเสริมแรงทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก เป็นต้น ตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้กัน ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ไมกา ทัลค์ เคโอลิน เส้นใยแก้ว ออร์แกโนเคลย์ และซิลิกา เป็นต้น สำหรับการเลือกใช้สารตัวเติมในการเสริมแรงในแต่ละชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับราคาและสมบัติของสารตัวเติมเสริมแรงแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอีกด้วย

ตัวเติมเสริมแรงมีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต โดยขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของตัวเติมเสริมแรง ขนาด การกระจายของขนาดอนุภาค การเตรียมพื้นผิวโดยที่พื้นผิวของสารตัวเติมมีผลต่อการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติมเสริมแรง รูปร่างและชนิดของตัวเติมเสริมแรงซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัวระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติมเสริมแรง ขนาดอนุภาค รวมไปถึงความเป็นรูปแบบเดียวกันของสารตัวเติม [8, 9]

โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในการเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

2.4 เซลลูโลส

เซลลูโลส (cellulose) มีสูตรโมเลกุล คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เกิดจากการนำกลูโคสมาต่อกันแล้วดึงโมเลกุลน้ำออก เรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) โดยค่า n ในสูตรโครงสร้างของเซลลูโลส คือ จำนวนโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคส หรือที่เรียกว่า DP (degree of polymerization) ของเซลลูโลส โดยธรรมชาติเส้นใยฝ้ายมี DP 10,000 หน่วย เยื่อไม้มี 600-1,000 หน่วย [10] ดังนั้นในทางเคมีเซลลูโลสจึงมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายตรงของเบต้า-D-กลูโคไพราโนส (β - D - glucopyranose) ที่เชื่อมต่อกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และ 4 ในโมเลกุลถัดไปด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งบีต้า-D-กลูโคส (สูตรโครงสร้างวงแหวนแบบของพิซเซอร์) หรือเบต้า-D-กลูโคไพราโนส (สูตรโครงสร้างวงแหวนแบบของฮาร์เวท) แต่ละหน่วยจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) 3 หมู่ คือ หมู่แอลกอฮอล์ไฮดรอกซิลลำดับที่ 1 (primary alcohol hydroxyl group) อยู่ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 6 และมีหมู่แอลกอฮอล์ไฮดรอกซิลลำดับที่ 2 (secondary alcohol hydroxyl group) อยู่ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 และ 3 โดยเซลลูโลสมี

โครงสร้าง (conformation) ในลักษณะรูปเก้าอี้ (chair form) แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนของโมเลกุลถัดไป และเชื่อมต่อกันระหว่างสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของแอนไฮโดรกลูโคสในอีกสายหนึ่ง ทำให้สายของเซลลูโลสเรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ เป็นกลุ่มไมเซลล์ของผลึก (crystalline micelles) และกลุ่มเหล่านี้มาเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) โดยบริเวณที่มีการจัดเรียงโมเลกุลของเซลลูโลสอย่างมีระเบียบสูง เรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณที่เป็นผลึก (crystalline region) ส่วนบริเวณที่มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า บริเวณที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) [11] ซึ่งแต่ละบริเวณแสดงสมบัติในการยอมรับต่อการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยบริเวณที่เป็นอสัณฐานยอมให้เอ็นไซม์เข้าทำปฏิกิริยาย่อยสลายได้ง่ายกว่าบริเวณที่เป็นผลึก ดังนั้น กลไกการย่อยสลายจะเกิดขึ้นที่บริเวณที่เป็นอสัณฐานได้เร็วกว่า และเกิดขึ้นก่อนบริเวณที่เป็นผลึก [12] เซลลูโลสไม่สามารถละลายได้ในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ และสารละลายต่าง แต่ละลายได้ในสารละลาย cupraammonium hydroxide, cupriethylenediamine hydroxide, cadmium ethylenediamine hydroxide และ alkalinesodium ferrictartrate [13]

เมื่อพิจารณาสมบัติจากการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถแบ่งเซลลูโลสได้เป็น 3 ชนิด [14] คือ

1. แอลฟา-เซลลูโลส (α -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง
2. บีต้า-เซลลูโลส (β -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด
3. แกมมา-เซลลูโลส (γ -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง และสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด

สาเหตุที่เซลลูโลสมีสมบัติการละลายที่แตกต่างกันนี้เป็นเพราะ แอลฟา-เซลลูโลส จัดว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด ในการบ่งชี้คุณภาพของเยื่อเซลลูโลสละเอียดคุณภาพสูง เนื่องจากมีลักษณะเส้นใยยาว มีค่า DP สูง มีการจัดเรียงโมเลกุลของเซลลูโลสแบบผลึก จึงมีความแข็งแรงและเสถียรสูง โดยในธรรมชาติเยื่อไม้มีปริมาณของแอลฟา-เซลลูโลสถึงร้อยละ 90 และในกระดาษที่มีปริมาณของแอลฟา-เซลลูโลสร้อยละ 87 ขึ้นไป ถือว่าเป็นกระดาษที่มีคุณภาพดี [15] ดังนั้นเมื่อ

กล่าวถึงสมบัติของเซลลูโลสมักหมายถึงส่วนที่เป็นแอลฟา-เซลลูโลสเป็นสำคัญ ส่วนบีต้า-เซลลูโลส และแกมมา-เซลลูโลสจะมีค่า DP ต่ำกว่ามาก [16]

2.5 สารเสริมสภาพเข้ากันได้

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โดยการเติมตัวเติมเสริมแรงนั้น สมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตจะดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับความสามารถในการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติมเสริมแรงที่เติมลงไป ดังนั้นเพื่อให้ตัวเติมเสริมแรงที่เติมลงไปในพอลิเมอร์สามารถกระจายตัวดีได้นั้น จึงมีการตกแต่งผิวหรือเคลือบตัวเติมเสริมแรง ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม เช่น นำกรดสเตียริกไปเคลือบบนพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อนำไปเป็นสารตัวเติมให้กับพอลิเมอร์ หมู่กรดจะยึดเกาะกับอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่สายโซ่อะลิฟาติกจะสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ตัวเติมเสริมแรงแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ [17]

การปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างตัวเติมเสริมแรงและพอลิเมอร์ นอกจากจะใช้สารตกแต่งพื้นผิวของตัวเติมเสริมแรงแล้ว ยังสามารถใช้สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ (compatibilizer) ระหว่างตัวเติมเสริมแรงและพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตได้อีกด้วย เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างตัวเติมเสริมแรงและพอลิเมอร์ โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับเฟสทั้งสอง ทำให้มีการยึดเกาะที่ดี

2.6 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน

2.6.1 กระบวนการอัดรีด

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปพื้นฐานที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากการดำเนินการและค่าใช้จ่ายในเรื่องของต้นทุนมีราคาถูกกว่ากระบวนการอื่น นิยามกระบวนการแปรรูปชนิดนี้โดยทั่วไปเป็นการทำให้วัสดุมีรูปร่างตามความต้องการ โดยเป็นการอัดเม็ดพลาสติกหลอมไหลผ่านหัวดายตามรูปร่างที่มีความเหมาะสม กระบวนการอัดรูปเป็นการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่อง (continuous process) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะนั้นได้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finished product) แล้วจึงนำเข้าไปทำกระบวนการอื่นๆต่อไปเพื่อผลิตเป็นชิ้นงานในขั้นตอนสุดท้าย ก่อนที่จำนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน [18-21]

กระบวนการอัดรีดเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อยู่ภายในอุปกรณ์รูปทรงกระบอก หรือ บาร์เรล (barrel) ในกรณีที่วัสดุเป็นเทอร์โมพลาสติกวัสดุจะเกิดการหลอมเหลว หรือในกรณีที่วัสดุเป็นยางวัสดุจะเกิดการอ่อนตัว โดยความร้อนที่ให้แก่วัสดุนั้นเกิดจากความร้อนภายในเนื่องจากแรงเสียดทานของการหมุนสกรู และเกิดจากความร้อนจากอุปกรณ์ทำความร้อนภายนอก ซึ่งวัสดุสามารถ

เคลื่อนผ่านหัวตายภายใต้แรงอัดภายในบาร์เรล โดยที่หัวตายจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของวัสดุที่ไหลออกมาตามลักษณะที่ต้องการ จากนั้นจะมีการหล่อเย็นเพื่อให้วัสดุที่ออกมาจากหัวตายมีการแข็งตัว

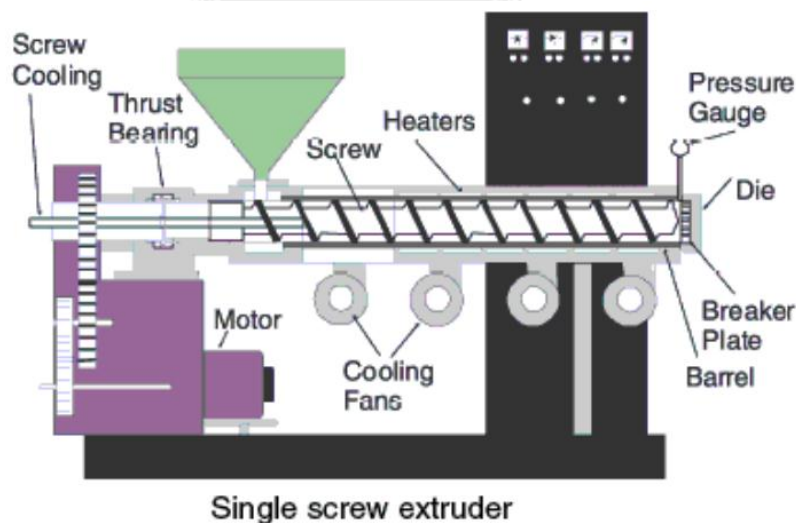
กระบวนการอัดรีดสามารถใช้ในการผลิตวัสดุพลาสติกในรูปแบบต่างๆ ได้มากมาย เช่น ท่อขนาดเล็ก ท่อขนาดกลางและใหญ่ เส้นใย พลาสติก และแผ่นพลาสติก นอกจากนี้ยังใช้กระบวนการอัดรีดแปรรูปพลาสติกโดยตรงแล้ว เครื่องอัดรีดยังเป็นอุปกรณ์หลักในการแปรรูปวัสดุพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น การเป่าอัดรีด (extrusion blow molding) การเป่าฟิล์ม (extrusion blow film process) และการเคลือบพลาสติกลงบนวัสดุชนิดอื่น

กระบวนการอัดรีดมีความสำคัญในการแปรรูปวัสดุพลาสติกแล้ว ยังมีการใช้เครื่องอัดรีดเป็นเครื่องผสมในการเตรียมวัสดุคอมพาวนด์พลาสติกอีกด้วย โดยการเติมพลาสติกผสมกับตัวเติม และสารเติมแต่งเข้าด้วยกัน เพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการแปรรูปในขั้นตอนต่อไป

เครื่องอัดรีดแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และ เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder)

2.6.1.1 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว

เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2. 4 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว [20]

1. ส่วนป้อนพลาสติก (feed hopper)

ส่วนป้อนพลาสติก เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนหัวส่วนต้นของเครื่องอัดรีด โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นกรวยใช้เติมพลาสติกลงไปในบาร์เรล ซึ่งทำหน้าที่ป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่บาร์เรลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้แรงโน้มถ่วงในการส่งเม็ดพลาสติก การป้อนแบบนี้เป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างทั่วไป แต่บางกระบวนการที่ต้องการการส่งเม็ดพลาสติกเข้าสู่บาร์เรลอย่างต่อเนื่องและแม่นยำ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

- ฝาปิด ใช้ในการป้องกันการความชื้นและฝุ่นละอองมาปนเปื้อนกับเม็ดพลาสติก
- พลาสติกใสหรือหน้าต่างแก้ว เพื่อสังเกตระดับของเม็ดพลาสติกภายในกรวยเติม
- ลึ้นที่ส่วนกลางของกรวยเติม เพื่อให้สามารถเปิดและปิดให้พลาสติกไหลและหยุดได้
- เครื่องเป่าอากาศร้อน เพื่อไล่ความชื้นหรือต้องการเพิ่มอุณหภูมิของเม็ดพลาสติกก่อนที่จะป้อนเข้าสู่สกรู ซึ่งจะติดตั้งไว้ในส่วนของกรวยเติม โดยมีในเครื่องอัดรีดบางชนิด
- เครื่องกวน (agitator) เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดพลาสติกติดกันเป็นก้อน

2. บาร์เรล (barrel)

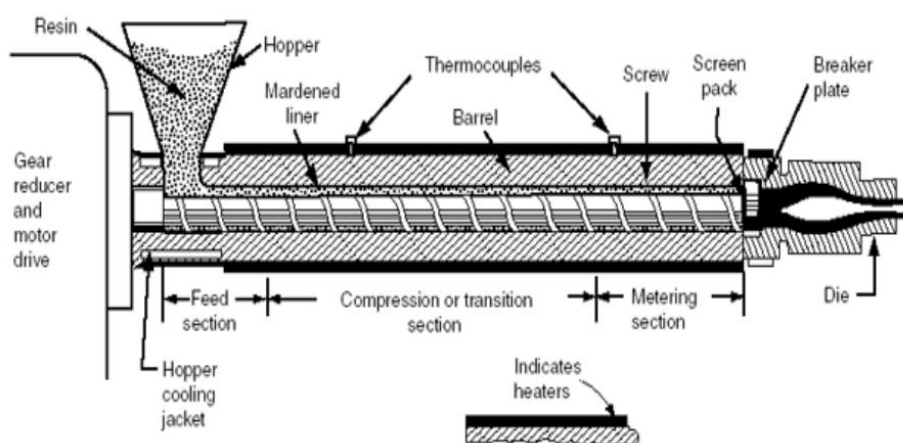
บาร์เรลทำหน้าที่เป็นตัวบรรจุสกรูไว้ในเครื่องอัดรีด โดยเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับพลาสติก ตำแหน่งของบาร์เรลอยู่ในส่วนป้อนของพลาสติก โดยมีการใช้น้ำหล่อเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกติดกันเป็นก้อน ซึ่งจะอยู่ด้านล่างกรวยเติมพลาสติก ช่วยทำให้พลาสติกไหลลงสู่ส่วนป้อนของสกรูได้ง่ายขึ้นกระบอกที่อยู่นอกเหนือจากส่วนนี้ถูกหุ้มด้วยแผ่นให้ความร้อนเป็นช่วงๆ และรอบๆกระบอกจะมีระบบหล่อเย็นหรือระบบพัดลมเป่า ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของพลาสติกให้เป็นไปตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เมื่อมีความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ระบบหล่อเย็นก็จะทำงาน โดยบาร์เรลของเครื่องอัดรีดทำมาจากวัสดุที่เป็นโลหะแข็งรูปทรงกระบอกที่สามารถทนต่อความดันที่จะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตได้สูง นอกจากนี้ยังมีการเคลือบผิวด้านในของบาร์เรลด้วยอัลลอยด์ของโลหะเพื่อให้ทนต่อการสึกกร่อน

3. สกรู (screw)

สกรูถูกติดตั้งอยู่ภายในบาร์เรล ถือเป็นส่วนสำคัญสำหรับกระบวนการอัดรีด ลักษณะโดยทั่วไปของสกรูคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพิ่มขึ้นจากส่วนป้อนพลาสติกถึงหัวตาย ทำให้ระยะลึกของร่อง (channel depth) ลดลง ส่งผลให้มีความดันภายในสกรูเพิ่มขึ้น ผิว

ของสกรูสามารถทำให้มีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้โดยการเคลือบ ระบบไฟฟ้าและเฟืองใช้ในการควบคุมการหมุนของสกรู

สกรูทำหน้าที่ที่สำคัญ คือ ทำการผสมเม็ดพลาสติกและส่วนผสมต่างๆ ทั้งในรูปเม็ดหรือผงในส่วนป้อนพลาสติกให้เข้ากันอย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการหลอมของพลาสติกที่สมบูรณ์ โดยจะสร้างแรงดันที่เพียงพอเพื่อเอาชนะความต้านทานต่อแรงเสียดทานของหัวตาย จากนั้นของเหลวจะถูกดันให้ไหลผ่านหัวตาย ด้วยอุณหภูมิและความดันคงที่ โดยสกรูจะถูกแบ่งได้ตามหน้าที่การทำงานได้เป็น 3 ช่วง (zones) ได้แก่ feed zone, transition หรือ compression zone และ metering หรือ melting pumping zone ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โซนการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว [20]

3.1) โซนรับวัสดุจากส่วนป้อนเม็ดพลาสติก (feed zone)

ช่วงแรกของสกรูเป็นโซนรับวัสดุ อยู่ใต้ส่วนป้อนเม็ดพลาสติก ทำหน้าที่ลำเลียงวัสดุจากส่วนป้อนพลาสติกด้วยอัตราเร็วคงที่เข้าสู่ส่วนอัดรีด ซึ่งสันของสกรูในส่วนนี้จะลึกและคงที่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการลำเลียงเม็ดพลาสติก โดยอากาศที่อยู่ระหว่างเม็ดพลาสติกจะถูกไล่ให้ไหลย้อนกลับไปออกทางส่วนป้อนเม็ดพลาสติกด้วยการให้แรงอัดที่เพียงพอแก่เม็ดพลาสติกภายในโซนรับวัสดุนี้

3.2) โซนทรานซิชัน (transition หรือ compression zone)

โซนทรานซิชันระยะลึกของร่องสกรูจะค่อยๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดความดันสูงขึ้นเนื่องจากช่องว่างของปริมาตรลดลง ทำให้พลาสติกที่อยู่ในโซนนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเม็ดพลาสติกที่ออกมาจากโซนนี้เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์และเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิสูงตามที่หัวตายต้องการ

3.3) โซนหลอมเหลว (metering หรือ melt pumping zone)

โซนสกรูในช่วงสุดท้ายทำหน้าที่ให้พลาสติกเป็นเนื้อเดียวกัน และทำหน้าที่ดันเม็ดพลาสติกที่หลอมเหลวแล้วไหลผ่านหัวตาย พลาสติกหลอมในโซนนี้จะมีความดันสูง เนื่องจากเป็นโซนที่ร่องของสกรูตื้นและคงที่ โดยทั่วไปจะใช้การไหลวนของของไหล เช่น น้ำ หรือน้ำมัน เป็นตัวควบคุมระบบทำความร้อนและความเย็นของสกรู

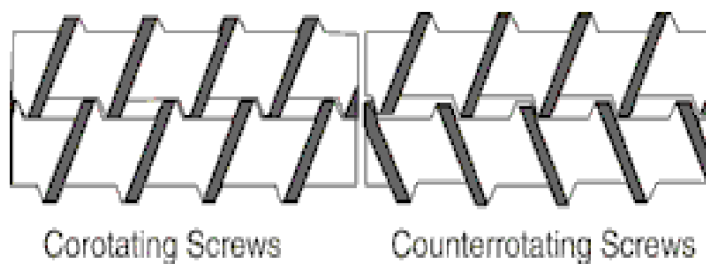
4. หัวตาย (die)

หัวตายของเครื่องอัดรีดจะถูกยึดติดกับส่วนปลายของบาร์เรล โดยหัวตายทำหน้าที่เปลี่ยนพลาสติกหลอมให้มีรูปร่างของชิ้นงานตามลักษณะของหัวตาย โดยทั่วไปรูปร่างของชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการอัดรีดมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นลักษณะหัวตายที่แตกต่างกันของเครื่องอัดรีดขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงานที่นำมาทำการอัดรีด โดยสามารถแบ่งชนิดของหัวตายออกตามประเภทของผลิตภัณฑ์ได้ คือ แผ่นพลาสติก พิล์มพลาสติก เส้นใย ท่อ และผลิตภัณฑ์พลาสติกจากการเคลือบ เป็นต้น

2.6.1.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่

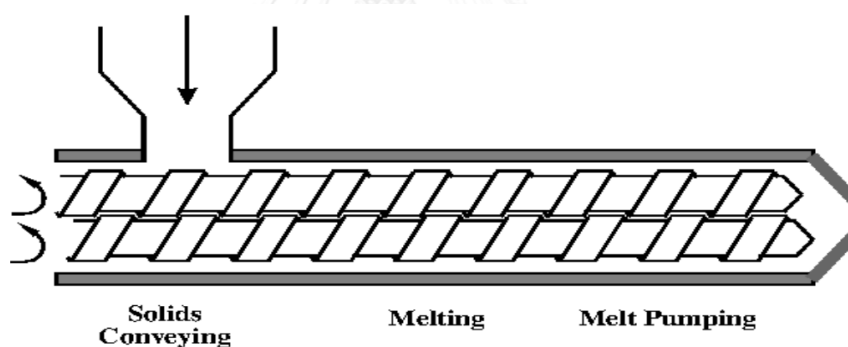
เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) คือ ภายในบาร์เรลเดียวกันจะประกอบไปด้วยสกรูจำนวน 2 อัน โดยสามารถแบ่งประเภทของสกรูได้ตามลักษณะการหมุนได้ 2 แบบ คือ แบบสกรูหมุนไปทางเดียวกัน (co-rotating) และแบบสกรูหมุนสวนทางกัน (counter-rotating) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และยังสามารถแบ่งประเภทได้ตามการขบกันของสกรูได้ 2 แบบ คือ แบบสกรูขบกัน (intermeshing) ซึ่งการหมุนของสกรูอันหนึ่งส่งผลให้สกรูอีกอันหนึ่งหมุนตามไปด้วย และแบบสกรูไม่ขบกัน (non-intermeshing) เป็นสกรูสองอันที่การหมุนของสกรูไม่เกี่ยวข้องกัน นอกจากนี้ลักษณะการขบกันของสกรูแบบสกรูขบกันนั้นยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบขบกันสนิท (conjugated screw หรือ tightly intermeshing) และแบบขบกันไม่สนิท (non-conjugated screw หรือ closely intermeshing) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

โดยประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้สูงนั้นขึ้นอยู่กับระดับการขบกันของสกรู ซึ่งอาจจะทำให้มีแนวโน้มของประสิทธิภาพในการผสมลดลงได้ จึงทำให้โดยทั่วไปแล้วเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่ใช้ในงานผสมและงานคอมพาวด์นิยมใช้สกรูแบบขบกัน ที่มีความเร็วในการหมุนสูง และระดับของการขบกันต่ำ



รูปที่ 2. 6 ลักษณะการหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ [21]

เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีข้อดีกว่าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวอยู่หลายประการ เช่น การขับเคลื่อนของพอลิเมอร์หลอมเกิดขึ้นได้ดีกว่า ส่งผลให้สามารถควบคุมระยะเวลาของพลาสติกหลอมให้อยู่ในเครื่องอัดรีดได้ดีกว่า และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า จึงทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีขึ้น ดังนั้นเครื่องอัดรีดแบบการใช้สกรูคู่เหมาะกับการนำไปใช้กับพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ นอกจากนี้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ก็ยังสามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมได้อย่างสมบูรณ์ และยังสามารถผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้อย่างทั่วถึง แม้ว่าเครื่องอัดรีดสกรูคู่จะมีลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกับกับเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ลักษณะเครื่องอัดรีดรูปแบบสกรูคู่แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ [21]

2.6.2 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดแบบ (injection molding) [22] เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ได้รับความนิยมใช้กันมาก เพราะมีความรวดเร็วในการผลิต สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายลักษณะ และยังมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน โดยผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 60 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำหนักอยู่ในช่วงประมาณ 5 กรัม ถึง 90 กิโลกรัม

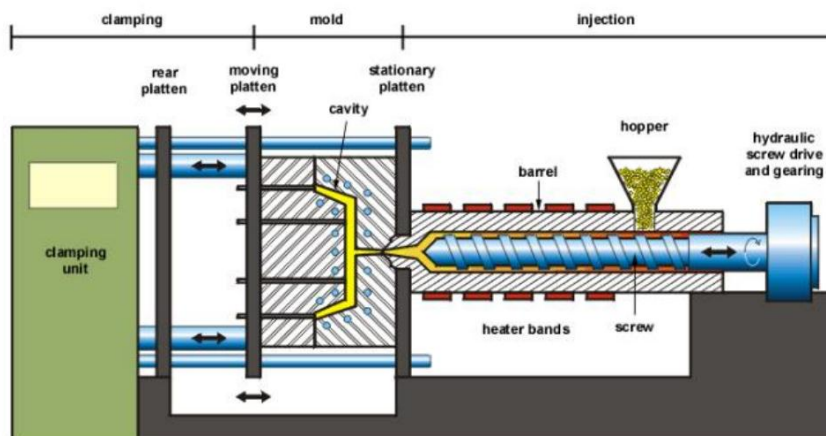
กระบวนการฉีดแบบเริ่มจากการเติมเม็ดพลาสติกที่จะทำการฉีดใส่ในช่อง (hopper) จากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกหลอม และผสมกันด้วยการหมุนของสกรู ต่อมาพลาสติกจะถูกผลักดันไปทางด้านหน้าของสกรู และชุดเปิดปิดแม่แบบเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อปิดแม่แบบด้วยแรงกดแม่แบบ (clamping

force) ที่มากพอ จะกดแม่แบบด้วยแรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิก (hydraulic) ทำให้หัวฉีดเปิดออก จากนั้นจึงฉีดอัดพลาสติกที่หลอมที่สะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของสกรูในชุดหลอม ด้วยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของสกรู ลักษณะเหมือนกับลูกสูบในกระบอกฉีดยา เมื่อสกรูเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อทำการฉีด จะเกิดความดันขึ้นกับพลาสติกหลอมทำให้ผลักวงแหวนกันการไหลกลับ (back flow valve) มาด้านหลังป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมไหลสวนทางกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8

พลาสติกที่ถูกฉีดเข้าไปในแม่แบบจะเริ่มแข็งตัวขึ้น เนื่องจากน้ำหล่อเย็นในแม่แบบ ดังนั้นการฉีดพลาสติกจึงต้องทำอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันไม่ให้ไหลเข้าไปในแม่แบบจนเต็มมากเกินไป และต้องรักษาความดันในการฉีด เพื่อผลักดันพลาสติกหลอมชุดใหม่เข้าไปในแม่แบบ เพราะเมื่อพลาสติกสัมผัสกับแม่แบบ จะเริ่มแข็งตัวจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในของชิ้นงาน ทำให้ด้านในของชิ้นงานยังคงไหลได้ในขณะที่ด้านนอกแข็งตัวแล้ว ซึ่งเมื่อด้านในของชิ้นงานแข็งตัวก็จะหดตัว ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัว (sink mark) โดยที่พลาสติกหลอมชุดใหม่จะเข้าไปชดเชยส่วนที่หดตัว แต่พลาสติกไม่สามารถเข้าไปชดเชยส่วนที่ยุบได้จนกว่าพลาสติกบริเวณกรวยนำฉีด (spore cone) จะแข็งตัว ดังนั้นการออกแบบแม่แบบจึงมักจะออกแบบให้กรวยนำฉีดอยู่ในบริเวณที่หนาที่สุดของแม่แบบ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกแข็งตัวเร็วจนเกินไป

ขั้นตอนการรักษาความดันในการฉีดพลาสติกหลอมเพื่อผลักดันพลาสติกหลอมเข้าไปชดเชยส่วนที่หดตัว เรียกว่า การฉีดแช่อัด (holding pressure phase) ขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดต่อเมื่อไม่สามารถผลักดันพลาสติกหลอมเข้าไปได้อีกแล้ว นั่นคือ เมื่อพลาสติกหลอมในกรวยนำเกิดการแข็งตัว เรียกจุดสิ้นสุดขั้นตอนนี้ว่า จุดตัน (scaling point)

เวลาและความดันที่ใช้ในขั้นตอนการฉีดแช่อัดจะส่งผลต่อความบกพร่องของชิ้นงาน คือ ถ้าใช้เวลาและความดันที่ใช้ในการฉีดแช่อัดพลาสติกน้อยเกินไป ทำให้พลาสติกหลอมเข้าไปชดเชยไม่เพียงพอ ส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นงาน แต่เมื่อใช้เวลาและความดันในการฉีดแช่อัดพลาสติกมากเกินไป อาจทำให้แม่แบบเสียหายได้ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิโพรพิลีน ด้วยการฉีดแบบจะต้องใช้ความดันในการฉีดพลาสติกสูง เพราะพอลิโพรพิลีนเกิดการยุบตัว เนื่องจากโครงสร้างที่มีผลึกค่อนข้างสูง



รูปที่ 2. 8 ส่วนประกอบเครื่องฉีดแบบพลาสติก [22]

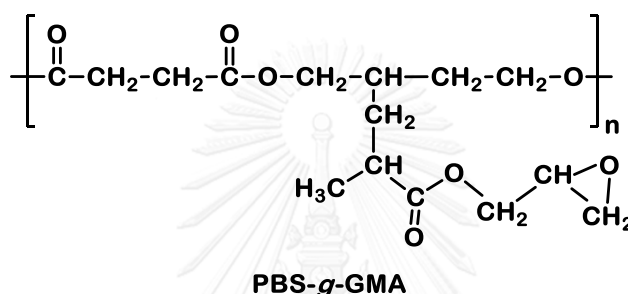
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซลลูโลสถูกนำมาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตอย่างแพร่หลาย เพื่อปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุน เนื่องจากเซลลูโลสเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์

สภาพผิวที่แตกต่างกันระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเซลลูโลส ทำให้ต้องมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสทั้งสอง โดย Liu และคณะ [23] ได้ศึกษาการตัดแปรรูปร่างของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตของคอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยการตัดแปรรูปร่างเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยการแช่ในต่างเปรียบเทียบกับการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) พบว่าการตัดแปรรูปร่างเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถกำจัดลิกนิน (lignin) และเพ็กทิน (pectin) ที่อยู่บนผิวของเส้นใยออกไปได้หมด ทำให้เพิ่มความเข้ากันได้ของตัวเติมเสริมแรงและเมทริกซ์ได้มากขึ้น ซึ่งผลทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงของคอมพอสิตได้มากขึ้น

นอกจากการใช้สารคู่ควบแล้วอีกเทคนิคหนึ่งคือการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ (compatibilizer) ดังเช่นงานวิจัยของ Lee และคณะ [24] ที่มีวัตถุประสงค์เตรียมคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพื่อลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตาม ความเข้ากันได้ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังไม่ดีพอ เนื่องจากวัสดุทั้ง 2 ชนิด มีสภาพผิวที่แตกต่างกัน จึงได้ใช้ไกลซีดีลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่า คอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ปริมาณร้อยละ 5 มีความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.5 เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้

เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันระหว่างพอลิবিวทิลีนซึกซิเนตและตัวเติมเสริมแรง จึงได้มีการใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ เช่น Wu และคณะ [25] ได้ศึกษาการเตรียมไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิবিวทิลีนซึกซิเนต เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มสภาพเข้ากันได้ระหว่างพอลิবিวทิลีนซึกซิเนตและเส้นใยปาล์ม (palm fiber) ซึ่งเมื่อตรวจสอบสัญญาณวิทยาของคอมพอสิตที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่าไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิবিวทิลีนซึกซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ช่วยให้พอลิবিวทิลีนซึกซิเนตผสมเข้ากับเส้นใยปาล์มได้ดีขึ้น โดยสามารถปรับปรุงแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของพอลิবিวทิลีนซึกซิเนตกับเส้นใยปาล์ม ซึ่งส่งผลให้คอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 2. 9 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิবিวทิลีนซึกซิเนต

แอลฟาเซลลูโลสถูกมาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น งานวิจัยของ Tajvidi และคณะ [26] ที่ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแอลฟาเซลลูโลส/พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต โดยหาปริมาณตัวเติมเสริมแรงที่เหมาะสม (ร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก) โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยการผสมด้วยเครื่องผสมแบบภายใน (internal mixer) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบให้เป็นแผ่นที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของคอมพอสิตมีค่าลดลงในช่วงแรกแล้วกลับเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเติมเสริมแรงที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม โมดูลัสของของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ Tajvidi และคณะยังศึกษาการดูดซึมน้ำของคอมพอสิต พบว่า พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแอลฟาเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น

Wu และคณะ [27] ได้เตรียมพอลิแล็กติกแอซิด/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต และตรวจสอบผลของแอลฟาเซลลูโลสที่ใช้ปรับปรุงความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการดัดแปรผิวของแอลฟาเซลลูโลสด้วยกรดสเตียริก (stearic acid) เพื่อให้แอลฟาเซลลูโลสมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จากผลการวิจัย พบว่า พอลิแล็กติกแอซิด/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต มีความ

เหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อใส่แอลฟาเซลลูโลสเพียงร้อยละ 4 และแอลฟาเซลลูโลสที่ผ่านการตัดแปรมีวสามารถกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีกว่าแอลฟาเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีว เนื่องจากความชอบน้ำของแอลฟาเซลลูโลสลดลง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษาค้นคว้าทางทฤษฎี สืบค้นข้อมูลทางวิชาการ ทบทวนและรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนงานของการวิจัย กำหนดขั้นตอนและวิธีการทดลอง
- 3.1.3 จัดเตรียมสารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.1.4 เตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และตรวจสอบปริมาณการกราฟต์
- 3.1.5 เตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอลิเมอร์ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่
- 3.1.6 ขึ้นรูปชิ้นงานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก
- 3.1.7 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน และสมบัติการดูดซึมน้ำของคอมพอลิเมอร์ที่เตรียมได้
- 3.1.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

3.2 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เกรด AZ71TN จากบริษัท Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.2 ไกลซิดิลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.3 ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.4 คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl_3) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย
- 3.2.5 อะซิโตน (acetone) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย
- 3.2.6 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) จากบริษัท Panreac ประเทศไทย
- 3.2.7 ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) จากบริษัท Quality Reagent Chemical ประเทศไทย

3.2.8 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย

3.2.9 ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab scan ประเทศไทย

3.2.10 แอลฟาเซลลูโลส จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ขวดสามคอแก้วกลม (three-neck round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.3.2 คอนเดนเซอร์ (condenser)

3.3.3 กระจกตวง (graduated cylinder) ขนาด 10 และ 200 มิลลิลิตร

3.3.4 ท่อก๊าซไนโตรเจน (nitrogen inlet)

3.3.5 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate and magnetic stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)

3.3.6 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)

3.3.7 หลอดหยดสาร (dropper)

3.3.8 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 600 มิลลิลิตร

3.3.9 ชุดกรองบุชเนอร์แบบสุญญากาศ (Büchner funnel, Büchner flask and vacuum pump)

3.3.10 ตู้อบ (hot air oven)

3.3.11 เดซิเคเตอร์ (desiccator)

3.3.12 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.3.13 ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร และบิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร (pipette and burette)

3.3.14 เครื่องชั่งสารทศนิยมสองตำแหน่ง (analytical balance)

3.3.15 ตู้อบ (hopper dryers) ของ SHINI[®] plastics technologies รุ่น SHD-100T จากเมือง New Taipei ประเทศไต้หวัน

3.3.16 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28 จากเมือง Duisburg ประเทศเยอรมนี

- 3.3.17 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (pelletizer cutting machine) ของ Lab tech engineering company รุ่น LZ-80/VS จากเมืองสมุทรปราการ ประเทศไทย
- 3.3.18 เครื่องฉีดพลาสติก (injection molding) ของ Topfine Precision Machinery Company Ltd. รุ่น A25 จากเมือง New Territories
- 3.3.19 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ของ Thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 จากเมือง Illinois ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.3.20 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K จากเมือง Fareham ประเทศอังกฤษ
- 3.3.21 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR500 จากเมือง Fareham ประเทศอังกฤษ
- 3.3.22 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD จากเมือง Taichung ประเทศไต้หวัน
- 3.3.23 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric Analyser, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 จากเมือง Greifensee ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.3.24 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Mettler Toledo รุ่น DSC 1 STAR^c System จากเมือง Greifensee ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.3.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV จากเมือง Tokyo ประเทศญี่ปุ่น

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิ

เนต

นำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไกลซิดิลเมทาคริเลต และไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่ม (initiator) ที่อัตราส่วน ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไกลซิดิลเมทาคริเลต/ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 100/10/1.5 [25] แล้วนำส่วนผสมทั้งหมดไปอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ด้วยเทคนิครีแอคทีฟเอ็กซ์ทรูชัน (Reactive

extrusion) โดยใช้อุณหภูมิในการเตรียมโกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28

ตารางที่ 3. 1 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมโกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

โซน (zone)	อุณหภูมิ (temperature)
Feed	100
1	120
2	130
3	124
Die	122
ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)	35

3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

วิเคราะห์โกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ฟลูออโรเมตริกอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์
ของ Thermo scientific รุ่น Nicolet 6700

3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของการกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลตที่ถูกรูปถ่ายลงบนพอลิไควทลีนซึกซิเนตด้วยวิธีการไทเทรต

นำไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิไควทลีนซึกซิเนตมาละลายในคลอโรฟอร์ม รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แยกไกลซีดิลเมทาคริเลตที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกด้วยการกรองและล้างด้วยอะซิโตน จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่ออบให้แห้งแล้ว นำไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิไควทลีนซึกซิเนตมาละลายในคลอโรฟอร์ม เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ 1 มิลลิลิตรที่ผสมกับไดเอทิลอีเทอร์ 5 มิลลิลิตร เพื่อเปิดวงอีพอกซี (epoxy) ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ ใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นคำนวณหาปริมาณการกราฟต์ (%Grafting) ดังสูตรต่อไปนี้

$$G_d[\%] = \frac{(0.6 \cdot 10^{-3} - 0.025 \cdot 10^{-3} V_s) \cdot 142.15}{w} \cdot 100\%$$

เมื่อ G_d หมายถึง ร้อยละการกราฟต์ของพอลิไควทลีนซึกซิเนตด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต

V_s หมายถึง ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตพอลิไควทลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (มิลลิลิตร)

w หมายถึง น้ำหนักของพอลิไควทลีนซึกซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต (กรัม)

3.4.4 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์และชิ้นงาน

นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแอลฟาเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ โดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้ อุณหภูมิในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์

โซน (zone)	อุณหภูมิ (temperature)
Feed	100
1	120
2	130
3	122
Die	124
ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)	35

โดยการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

ผลขอปริมาณของตัวเติมเสริมแรงและปริมาณของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ต่อสมบัติคอมพอสิต โดยเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ต่างๆ ดังนี้

- พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่เติมตัวเติมเสริมแรง
- พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เติมตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ในปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 phr
- พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เติมตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 โดยแต่ละสูตรมีการเติมไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนปริมาณ 0 5 และ 10 phr และเติมแอลฟาเซลลูโลสปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 phr

จากนั้นนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ที่ได้บดด้วยตุ๋บ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ดังแสดงใน

รูปที่ 3.4 โดยใช้อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซีเนตคอมพอสิต



รูปที่ 3. 3 ตู้อบ ของ SHINI[®] plastic technologies รุ่น SHD-100T

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์

สูตรที่	ปริมาณ PBS (phr)	ปริมาณ α -cellulose (phr)	ปริมาณ PBS-g-GMA (phr)
1	100	-	-
2	100	-	5
3	100	-	10
4	100	2	-
5	100	2	5
6	100	2	10
7	100	4	-
8	100	4	5
9	100	4	10
10	100	6	-
11	100	6	5
12	100	6	10
13	100	8	-
14	100	8	5
15	100	8	10
16	100	10	-
17	100	10	5
18	100	10	10



รูปที่ 3. 4 เครื่องฉีดพลาสติกของ Topfine Precision Machinery รุ่น A25

3.4.5 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานพอลิเอทิลีนซีกซีเน็ตคอมพอสิต

3.4.5.1 ศึกษาการกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสในพอลิเอทิลีนซีกซีเน็ต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3. 5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV

3.4.5.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่

- สมบัติด้านแรงดึง ได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) และการยืดดึง ณ จุดขาด (elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ภายใต้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และใช้อัตราเร็วในการดึงขึ้นงานที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3. 6 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR100K

- ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ตามมาตรฐาน ASTM D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials ด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ ภายใต้ load cell ขนาด 2.5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราเร็วในการโค้งงอที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3. 7 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LR500

- ความทนแรงกระแทก (impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics ด้วย Impact-Pendulum Tester ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ภายใต้หัวค้อนขนาด 2.75 จูล ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3. 8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD

3.4.5.3 ศึกษาสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่

- ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต โดยหาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ซึ่ง

ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 20 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3. 9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851

- ศึกษาหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงคาลอริมิเตอร์ ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 10 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3. 10 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo รุ่น DSC 1 STAR^e System

3.4.5.4 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิต

ตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 30*12*3 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบนำไปไว้ในเดซิเคเตอร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงานทดสอบ นำชิ้นงานทดสอบแช่ในน้ำกลั่น โดยน้ำกลั่นต้องท่วมชิ้นงาน นำชิ้นงานมาชั่งเพื่อหาน้ำหนัก โดยต้องชั่งน้ำหนักออกให้หมด ทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 30 วัน

ความสามารถในการดูดซึมน้ำ คือ การหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = [(W_2 - W_1) / W_1] * 100$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักชิ้นทดสอบเริ่มต้น

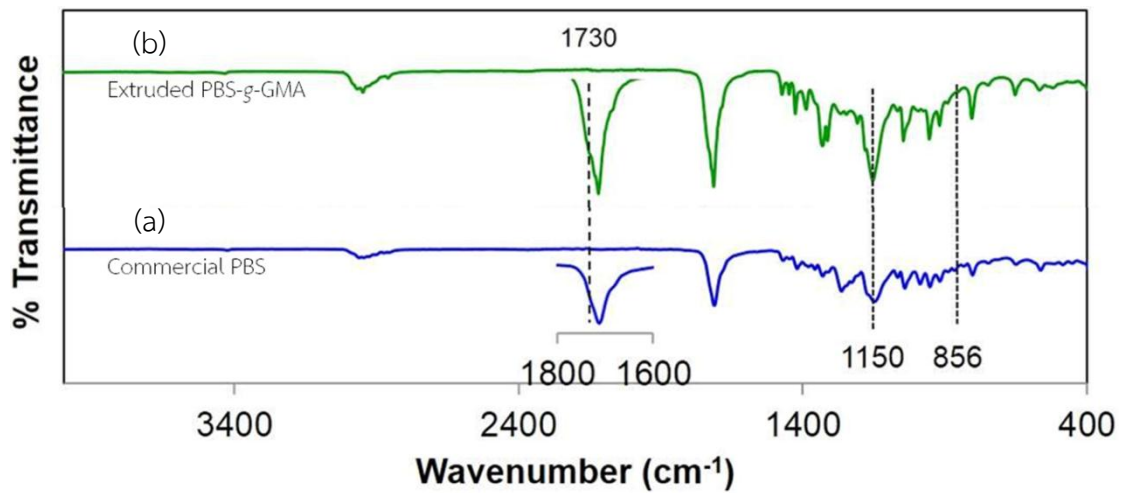
W_2 = น้ำหนักชิ้นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามกำหนด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ผ่านการกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและไกลซิดิลเมทาคริเลต กราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) Neat PBS และ (b) PBS-g-GMA

อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิ บิวทิลีนซักซิเนต ปรากฏพีกที่เลขคลื่น $3000-2850\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีกของ C-H stretching และ ปรากฏพีกที่เลขคลื่น 1711 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของ C=O stretching แต่อย่างไรก็ตาม อินฟราเรด สเปกตรัมของไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตปรากฏพีกที่เลขคลื่น 1730 ซึ่งเป็นพีก ของหมู่เอสเทอร์ที่เพิ่มมาจากส่วนไกลซิดิลเมทาคริเลต นอกจากนี้ยังพบพีกของหมู่ฟังก์ชันอีพอกซีของ ไกลซิดิลเมทาคริเลตปรากฏอยู่บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่กราฟต์แล้วบริเวณ 1150 cm^{-1} (C-O stretching) และ 856 cm^{-1} (C-H bending) จากสเปกตรัมแสดงว่าสามารถเตรียมไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตตามที่ได้คาดไว้ [28-30]

นำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ทำให้บริสุทธิ์มาทำปฏิกิริยากับ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วทำการไทเทรตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เหลือกับสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ นำปริมาตรที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามาคำนวณ จะได้ปริมาณการกราฟต์ของพอลิ

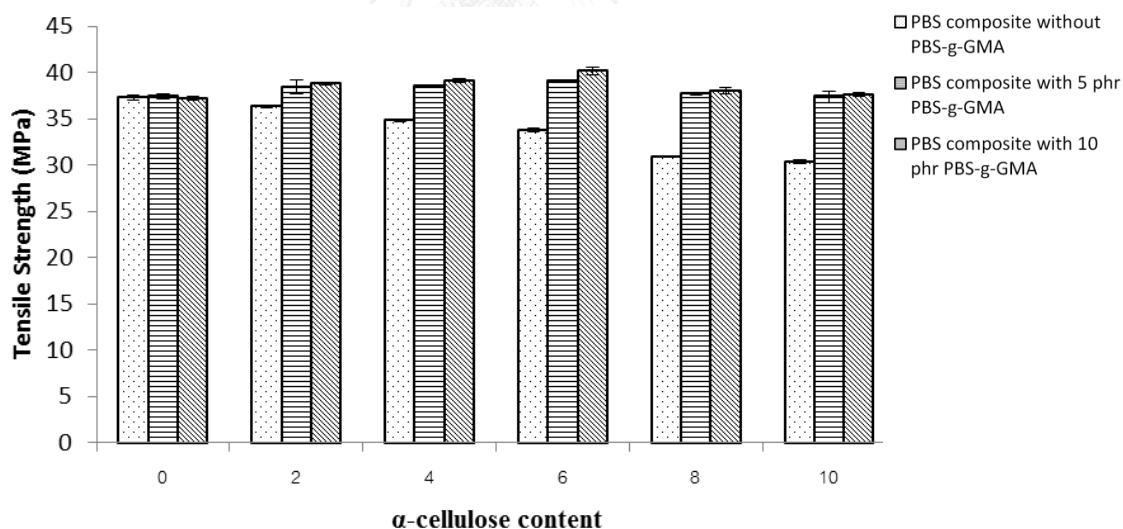
บิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่การพดด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตจากเทคนิคอัดรีตแบบรีแอกทีฟมีปริมาณกราฟต์ร้อยละ 3

4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง

4.2.1.1 ความทนแรงดึง

เมื่อนำชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เตรียมได้จากการนำคอมพาวนด์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส และสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซีดีลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ในปริมาณต่างๆ มาขึ้นรูปด้วยการฉีด มาทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile strength) โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ภายใต้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าคอมพอสิตที่เตรียมได้มีความทนแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4. 2 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีความทนแรงดึง 37.3 MPa ส่วนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตในปริมาณ 2 4 6 8 และ 10 phr โดยไม่ได้ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 36.3 34.9 33.8 30.9 และ 30.4 MPa ตามลำดับ เห็นได้ว่าความทนแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของแอลฟาเซลลูโลส ซึ่งสมบัติความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟา

เซลลูโลสคอมพอสิตลดลงถึงประมาณร้อยละ 19 เมื่อใส่แอลฟาเซลลูโลส 10 phr เทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพความเป็นขี้ที่มีแตกต่างกันมากระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีความชอบน้ำและแอลฟาเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำ พื้นผิวของแอลฟาเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่จำนวนมาก ทำให้แอลฟาเซลลูโลสเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งกลายเป็นจุดบกพร่อง (defect) ในชิ้นงาน ทำให้ไปขัดขวางการเจริญเติบโตของผลึก และยังทำให้การเคลื่อนผ่านกันของสายโซ่โพลิเมอร์เมื่อได้รับแรงกระตุ้นได้ยากขึ้น ดังนั้นเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกส่งผลให้การส่งผ่านแรงจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปยังส่วนภาคของแอลฟาเซลลูโลสทำได้ไม่ดี ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสริมแรงไม่ดี จึงทำให้ค่าความทนแรงดึงน้อยลงเมื่อปริมาณของแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น [31, 32]

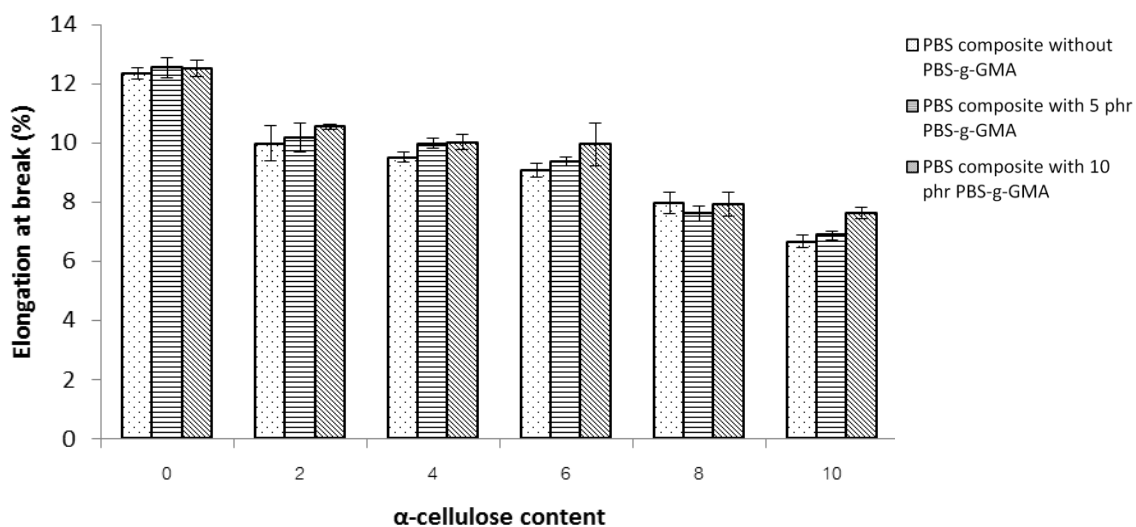
เมื่อพิจารณาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไป 5 และ 10 phr พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือ ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสไปจนถึงปริมาณที่ 6 phr แต่เมื่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสที่ 8 และ 10 phr ค่าความทนแรงดึงของวัสดุกลับลดลง โดยเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ 5 phr ค่าความทนแรงดึงพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต ที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 38.4 38.6 39.1 37.7 และ 37.4 ตามลำดับ โดยค่าความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตที่ใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr มีค่าเพิ่มขึ้นถึงราวร้อยละ 16 เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไป เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพื้นผิวของแอลฟาเซลลูโลส ซึ่งคาดว่าเกิดการกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสดีขึ้น ทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจากภายนอก เฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถที่จะถ่ายโอนแรงจากภายนอกสู่ส่วนภาคของแอลฟาเซลลูโลสได้ดี แต่ที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 8 และ 10 phr มีค่าความทนแรงดึงลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้แอลฟาเซลลูโลสเกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomeration) ส่งผลให้การกระจายแรงจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปที่แอลฟาเซลลูโลสไม่ดีขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงลดลง [33, 34]

ค่าความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr เป็นไปในทางทิศทางเดียวกับกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลต

กราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr ซึ่งมีค่าความทนแรงดึงที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 38.8 39.1 40.1 38.0 และ 37.6 ตามลำดับ โดยค่าความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 19 เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 8 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ 10 phr ให้ค่าความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่สูงกว่าที่ 5 phr เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแอลฟาเซลลูโลสกับเมทริกซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสในเมทริกซ์ดีขึ้น

4.2.1.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

ผลของปริมาณตัวเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ต่อความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3 พบว่าพอลิบิวทิลีนมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงสุด ร้อยละ 12.3 ซึ่งมีค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอมพอสิตสูตรอื่น โดยการใส่ตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสลงไปให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด น้อยลง เนื่องจากการที่อนุภาคแอลฟาเซลลูโลสเกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้การกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสในเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่ดี นอกจากนี้ยังไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่เมื่อเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไป พบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมพอสิตมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส และเฟสของเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้เฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถถ่ายโอนแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังอนุภาคของแอลฟาเซลลูโลสได้ดี [25]



รูปที่ 4. 3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

สำหรับผลของปริมาณตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสต่อสมบัติความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมพอสิต โดยใช้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 0 2 4 6 8 และ 10 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือ ร้อยละ 12.3 10.0 9.5 9.1 8.0 และ 6.7 ตามลำดับ เนื่องมาจากการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคแอลฟาเซลลูโลส นอกจากนี้ยังไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องขึ้น ก่อให้เกิดความเค้นรวมศูนย์ (stress concentration) [35, 36] ดังนั้นเมื่อชิ้นงานพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตได้รับแรงจากภายนอกบริเวณที่อนุภาคของแอลฟาเซลลูโลสรวมตัวกันจะขยายขึ้น นำไปสู่การแตกหักของชิ้นงาน

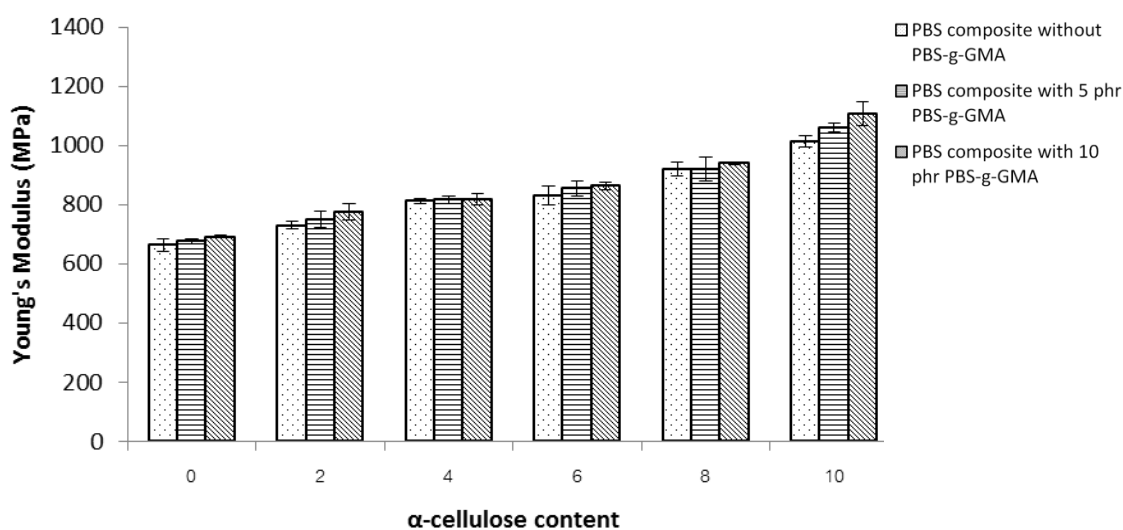
ขณะที่การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เป็นการช่วยเพิ่มค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เนื่องจากการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสกับเฟสเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังนั้นเมื่อชิ้นงานคอมพอสิตได้รับแรงจากภายนอกส่งผลให้เฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถส่งผ่านแรงไปยังอนุภาคแอลฟาเซลลูโลสได้ ทำให้ชิ้นงานคอมพอสิตยืดได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาปริมาณของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตระหว่าง 5 และ 10 phr พบว่าที่ 10 phr มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงกว่าที่ 5 phr เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างเฟสเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับเฟสตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสเกิดขึ้นได้มากกว่า ส่งผลให้มีความสามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า จึงทำให้รับแรงได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม การเติมแอลฟาเซลลูโลสลงไป และทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเม

ทากริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้ชิ้นงานคอมพอสิตมีความแข็งแรงขึ้น แต่มีความยืดหยุ่นลดต่ำลง ดังนั้นค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตจึงน้อยกว่าชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ [37]

4.2.1.3 มอดุลัสของยัง

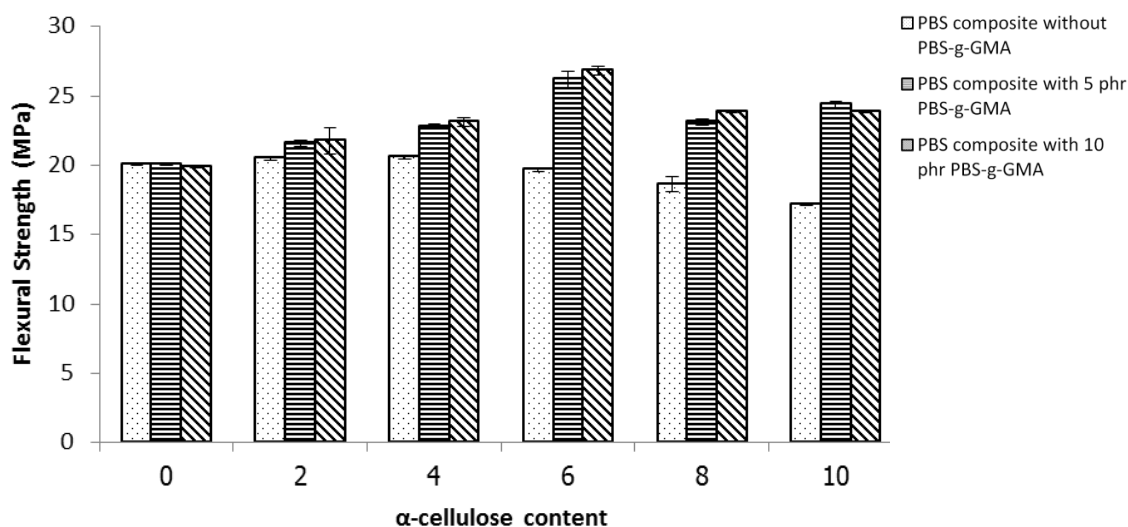
มอดุลัสของยัง (Young's modulus) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการคงรูปและยังบอกถึงระดับความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุ ซึ่งถ้ามอดุลัสของยังมีค่ามากแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือในอีกความหมายว่าในขณะที่วัสดุได้รับความเค้นมากวัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อย เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสพบว่าค่ามอดุลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของแอลฟาเซลลูโลส จากรูปที่ 4.4 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่ามอดุลัสของยังน้อยที่สุด สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เติมแอลฟาเซลลูโลสที่ปริมาณ 10 phr ให้ค่ามอดุลัสของยังที่สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของแอลฟาเซลลูโลสเกิดการรวมกลุ่มกัน ชิ้นงานคอมพอสิตจึงมีความแข็งแรงมาก ทำให้คอมพอสิตมีความคงรูปที่สูง มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ดี และเมื่อพิจารณาที่การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณที่ 5 และ 10 phr พบว่าค่ามอดุลัสของยังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่ส่งผลต่อมอดุลัสของยังของชิ้นงานคอมพอสิต แต่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสส่งผลสำคัญต่อค่ามอดุลัสของยัง เนื่องจากตัวแอลฟาเซลลูโลสเองมีความเป็นผลึกที่สูงมาก ทำให้ไปเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน [38, 39]



รูปที่ 4.4 มอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.2.2 ความทนแรงดัดโค้ง

เมื่อนำชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการอัดรีดผ่านกระบวนการและผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ โดยมีการเติมแอลฟาเซลลูโลสที่ปริมาณต่างๆ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณต่างๆ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine) ใช้อัตราเร็วในการโค้งงอ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ภายใต้ load cell ขนาด 2.5 กิโลนิวตัน โดยการทดสอบความคงทนต่อแรงดัดโค้ง (flexural strength) ชิ้นงานจะรับแรง 2 แบบ คือ แรงดึง (tension) และแรงกด (compression) จากรูปที่ 4.5 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีความทนแรงดัดโค้งที่ 20.1 MPa โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต ที่ไม่ได้ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่ 2 4 6 8 และ 10 phr มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 20.5 20.6 19.7 18.6 และ 17.2 MPa ตามลำดับ เห็นได้ว่าสมบัติความทนแรงดัดโค้งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ซึ่งสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตลดลงถึงราวร้อยละ 16 เมื่อใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 10 phr เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากความเป็นขั้วมีความแตกต่างกันมากของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีความชอบน้ำและแอลฟาเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำ พื้นผิวของแอลฟาเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่จำนวนมาก ทำให้แอลฟาเซลลูโลสเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ไปขัดขวางการเจริญเติบโตของผลึก และยังทำให้การเคลื่อนผ่านกันของสายโซ่โพลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอก ส่งผลให้การส่งผ่านแรงจากเฟสเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปสู่อนุภาคของแอลฟาเซลลูโลสทำได้ไม่ดี เนื่องจากความไม่เข้ากันของเฟสทั้งสอง จึงทำให้ค่าความทนแรงดึงน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณของแอลฟาเซลลูโลสมากขึ้น [40-43]



รูปที่ 4. 5 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และ

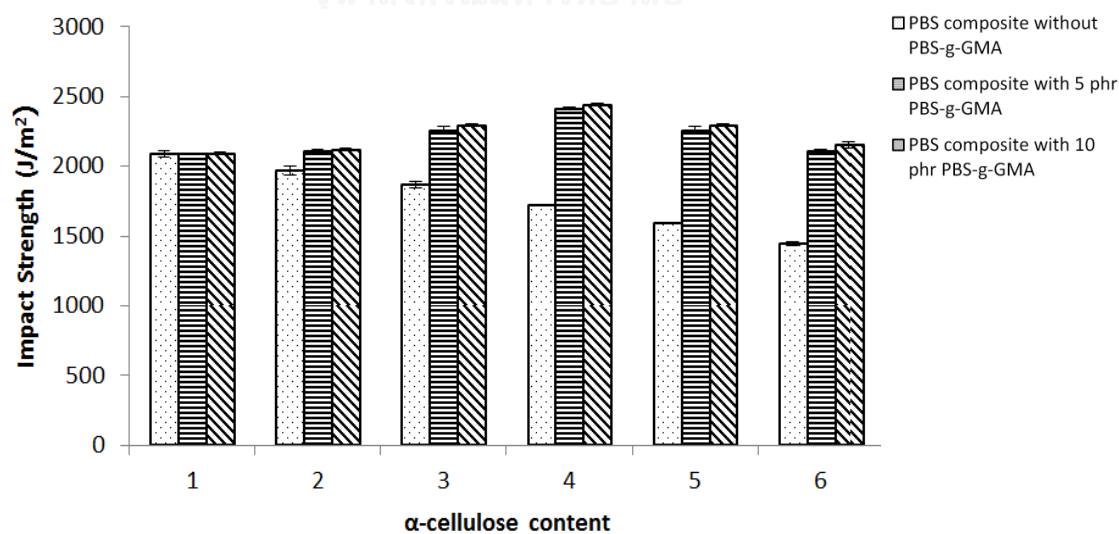
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

เมื่อพิจารณาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปที่ 5 และ 10 phr พบว่ามีแนวโน้มเดียวกัน คือ ค่าความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสไปจนถึงปริมาณที่ 6 phr แต่เมื่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสที่ 8 และ 10 phr ค่าคงทนแรงดึงของวัสดุกลับลดลง โดยเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ 5 phr ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต ที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 21.6 22.8 26.2 21.1 และ 24.4 ตามลำดับ โดยค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr มีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไป เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพื้นผิวของแอลฟาเซลลูโลส ทำให้เกิดการกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสดีขึ้น ทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจากภายนอก เฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถที่จะถ่ายโอนแรงจากภายนอกสู่อนุภาคของแอลฟาเซลลูโลสได้ดี แต่ที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 8 และ 10 phr มีค่าความทนแรงดัดโค้งลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในปริมาณที่ มากจะทำให้แอลฟาเซลลูโลสเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้การกระจายแรงจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปที่แอลฟาเซลลูโลสไม่ดันทัน จึงทำให้ความทนแรงดัดโค้งลดลง

ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr เป็นไปในทางทิศทางเดียวกันกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr ซึ่งมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 21.8 23.1 26.8 23.9 และ 23.9 ตามลำดับ โดยค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตที่ใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr มีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 36 เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ 10 phr ให้ค่าความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตที่สูงกว่าที่ 5 phr เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแอลฟาเซลลูโลสกับเมทริกซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสในเมทริกซ์ดีขึ้น [43, 44]

4.2.3 ความทนแรงกระแทก

เมื่อนำชิ้นงานพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตที่เตรียมได้โดยมีการเติมตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณต่างๆ โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact-pendulum tester) แบบ Izod Impact Testing (Notched Izod) ใช้ค้อนขนาด 2.75 จูล ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4. 6 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และ

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหักเมื่อวัสดุได้รับแรงจากภายนอกอย่างทันทีทันใด โดยเมื่อศึกษาผลของปริมาณตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสและปริมาณของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนต่างๆ จากรูปที่ 4.6 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่าความทนแรงกระแทกที่ 2087.2 J/m^2 โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 phr มีค่าความทนแรงกระแทก 1967.9 1867.0 1720.8 1591.4 และ 1448.7 J/m^2 พบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ซึ่งสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 10 phr ลดลงราวร้อยละ 31 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากเกิดการจับกลุ่มกันเองของเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งทำให้เกิดการรวมศูนย์แรง และความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับเฟสของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ดังที่เคยได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ เป็นสาเหตุที่ทำให้สายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่สามารถส่งผ่านแรงไปยังแอลฟาเซลลูโลสได้

แต่เมื่อพิจารณาการเสริมแรงพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยแอลฟาเซลลูโลสที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้อันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเฟสของแอลฟาเซลลูโลสดีขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านแรงดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากค่าความทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น โดยที่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr ค่าความทนแรงกระแทกของมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลสจนถึง 6 phr แต่ค่าความทนแรงกระแทกกลับลดลงเมื่อมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสที่ 8 และ 10 phr โดยค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 2108.4 2255.0 2410.9 2258.7 และ 2110.1 ตามลำดับ โดยค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตที่ใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr มีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 16 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ สาเหตุที่ทำให้ค่าความทนแรงกระแทกที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสที่ 8 และ 10 phr ลดลง เนื่องมาจากเมื่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ในปริมาณที่มากเกินไปความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง เพราะแอลฟาเซลลูโลสที่เติมลงไปเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดการจับกลุ่มกันเอง ทำให้เกิดการรวมศูนย์แรง ซึ่งนำไปสู่

การแตกหักของชิ้นงานรับแรงอย่างฉับพลัน ทำให้แรงที่สายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้รับไม่สามารถถ่ายโอนไปยังแอลฟาเซลลูโลสได้ทัน

เช่นเดียวกันกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr มีค่าความทนแรงกระแทกในทิศทางเดียวกันกับคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr ซึ่งมีค่าความทนแรงกระแทกที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 2118.7 2291.5 2443.0 2294.2 และ 2151.1 ตามลำดับ โดยค่าความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตที่ใส่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 42 เมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ 10 phr ให้ค่าความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตที่สูงกว่าที่ 5 phr เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวแอลฟาเซลลูโลสได้อย่างทั่วถึง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับเฟสของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสดีขึ้น ซึ่งเมื่อวัสดุได้รับแรงอย่างฉับพลันสามารถที่จะส่งผ่านแรงจากเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ดี จึงทำให้มีค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [45]

4.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิต

4.3.1 การสลายตัวทางความร้อน

การสลายตัวทางความร้อนทดสอบโดยการนำชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน โดยให้ความร้อนตั้งแต่ 25-1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และพอลิบิวทิลีนคอมพอสิต พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลสมีแนวโน้มของอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (onset) ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลสทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวมีค่าลดลงเล็กน้อยเพียงแค่ 3 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตที่ใส่แอลฟาเซลลูโลส 10 phr ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแอลฟาเซลลูโลสน้อยกว่าพอลิบิวทิลีนอยู่มาก จึงส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของคอมพอสิตลดลงเมื่อใส่แอลฟา

เซลล์โลสลงไปในคอมพอสิต แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมแอลฟาเซลล์โลสและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทีลีนซึกซิเนตไม่ส่งผลทำให้อุณหภูมิสุดท้ายที่คอมพอสิตสลายตัว (endset) เปลี่ยนแปลงไป โดยดูได้จากตารางพบว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่คอมพอสิตสลายตัวมีค่าไม่แตกต่างกัน [46]



ตารางที่ 4. 1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิวิวิทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิวิวิทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิิต

Formula	Td (onset)(°C)	Td (endset)(°C)
α -cellulose	332.7	382.1
Neat PBS	386.8	431.6
PBS/ α -cellulose 2 phr	386.8	431.2
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 2 phr	386.7	431.2
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 2 phr	387.0	431.8
PBS/ α -cellulose 4 phr	386.7	431.6
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 4 phr	386.1	431.2
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 4 phr	386.4	431.4
PBS/ α -cellulose 6 phr	384.9	431.2
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 6 phr	385.7	431.6
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 6 phr	385.9	431.7
PBS/ α -cellulose 8 phr	384.6	431.5
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 8 phr	384.3	431.3
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 8 phr	384.1	431.2
PBS/ α -cellulose 10 phr	383.8	431.5
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 10 phr	383.7	431.2
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 10 phr	383.8	431.4

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอมพอสิตด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

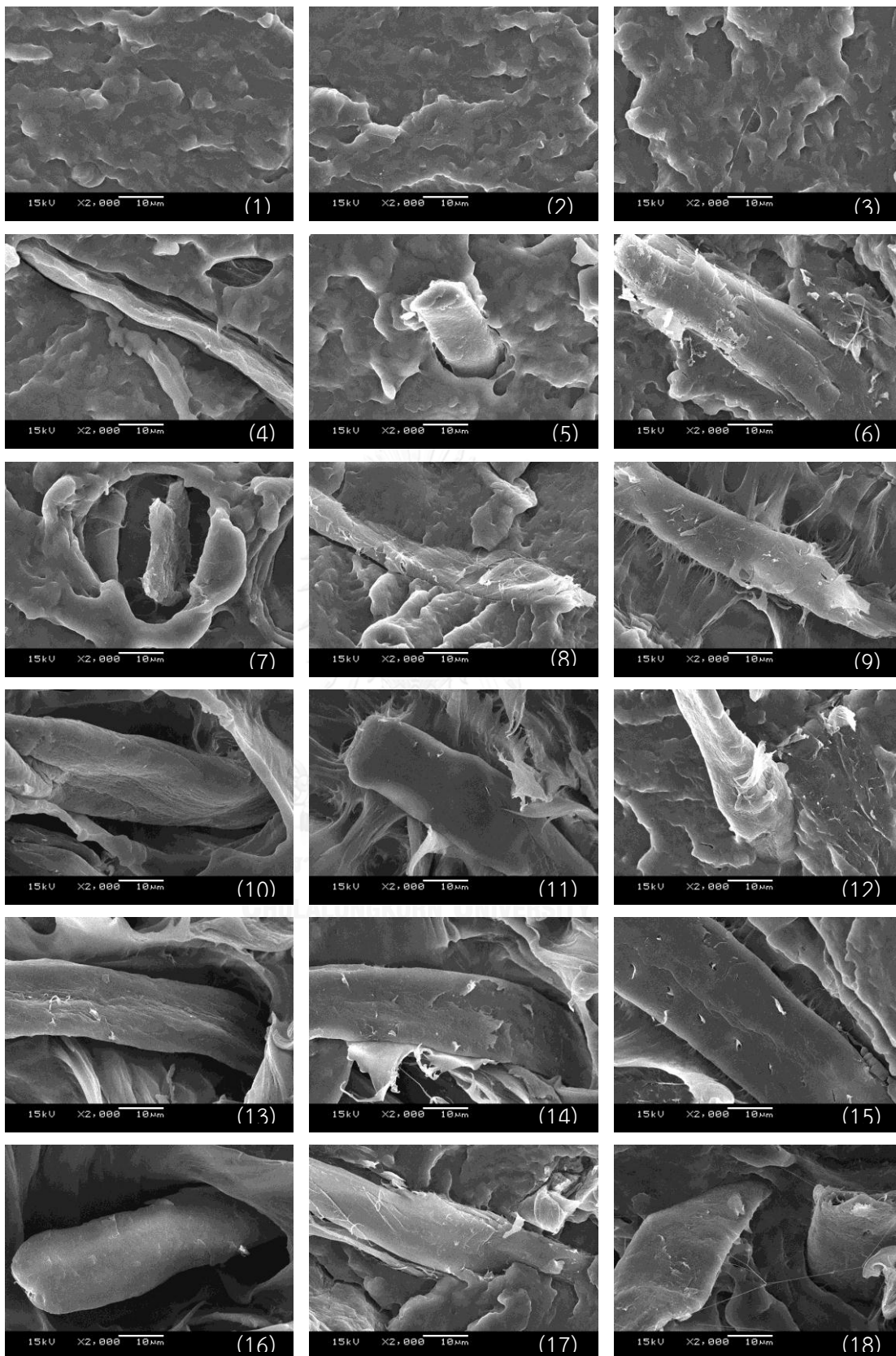
จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าอุณหภูมิลอมเหลวและอุณหภูมิก่อผลึกของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยไปเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับเฟสของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ทำให้แรงยึดรอยต่อระหว่างเฟส (interfacial adhesion) สูงขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมผลึกที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีค่าสูง (T_{m2}) อาจเป็นเพราะอุณหภูมิช่วงนี้เป็นช่วงที่เกิดการหลอมผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ที่มีความเป็นผลึกค่อนข้างสมบูรณ์อยู่แล้ว ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นไปได้ยาก [47]

ตารางที่ 4. 2 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนคอมพอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

Formula	T _g (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	T _c (°C)
Neat PBS	-23.9	106.7	111.6	76.4
PBS/PBS-g-GMA 5 phr	-23.4	106.5	110.9	78.8
PBS/PBS-g-GMA 10 phr	-23.8	107.2	110.9	81.5
PBS/ α -cellulose 2 phr	-23.5	105.9	111.1	77.6
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 2 phr	-23.9	106.3	110.9	77.3
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 2 phr	-23.4	106.9	111.7	77.9
PBS/ α -cellulose 4 phr	-23.2	105.5	111.1	75.3
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 4 phr	-23.2	106.5	111.1	78.3
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 4 phr	-23.2	107.1	111.6	78.2
PBS/ α -cellulose 6 phr	-23.4	105.8	111.1	75.9
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 6 phr	-23.2	106.9	111.2	79.7
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 6 phr	-23.9	106.6	111.1	78.1
PBS/ α -cellulose 8 phr	-23.7	105.9	111.2	76.1
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 8 phr	-23.4	107.2	111.3	79.6
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 8 phr	-23.5	106.9	110.9	79.8
PBS/ α -cellulose 10 phr	-23.9	105.8	111.2	76.5
PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 10 phr	-23.9	107.6	111.1	78.9
PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 10 phr	-23.7	107.6	111.2	80.4

4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผ่านการเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลสทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลต กราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2000 เท่า โดยใช้ชิ้นงานจากการทดสอบความทนแรงดึงมาส่อง รูปที่ 4.7 (1) แสดงสัณฐานวิทยาภาพตัดตามขวาง (cross section) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ ซึ่งมีพื้นผิวราบเรียบ [48] และเมื่อมีการเติมตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสลงไปในพื้นที่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังรูปที่ 4.7 (4) (7) (10) (13) และ (16) พบว่าพื้นที่การแตกหักของชิ้นงานมีการแยกเฟสระหว่างเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเฟสตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสทำให้เกิดช่องว่าง (void) ขนาดใหญ่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน และยังเกิดหลุมที่เกิดจากการหลุดออกมาของเส้นใยแอลฟาเซลลูโลสจากเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกันมากของทั้งสองเฟส โดยแอลฟาเซลลูโลสชอบที่จะเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวอยู่ในเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาระหว่างเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยแอลฟาเซลลูโลสไม่ดี ปัญหานี้แก้ไขได้ในอีกทางหนึ่งคือการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไป ดังรูปที่ 4.7 (5) (8) (11) (14) และ (17) ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr และรูปที่ 4.7 (6) (9) (12) (15) และ (18) ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr โดยเห็นได้ว่ารอยแตกของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่มีการเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลสและใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เส้นใยแอลฟาเซลลูโลสจะฝังตัวอยู่ในเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต รอยแตกหักมีการยึดออกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ช่องว่างระหว่างเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเฟสตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเฟสตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส ทำให้เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) ของเฟสทั้งสอง และยังทำให้แรงยึดรอยต่อระหว่างเฟส (interfacial adhesion) สูงขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากขึ้น เฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะสามารถเข้ากับเส้นใยแอลฟาเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น เห็นได้จากช่องว่างระหว่างเฟสที่แคบลง เนื่องจากการเพิ่มอันตรกิริยาของทั้งสองเฟส [47, 49]



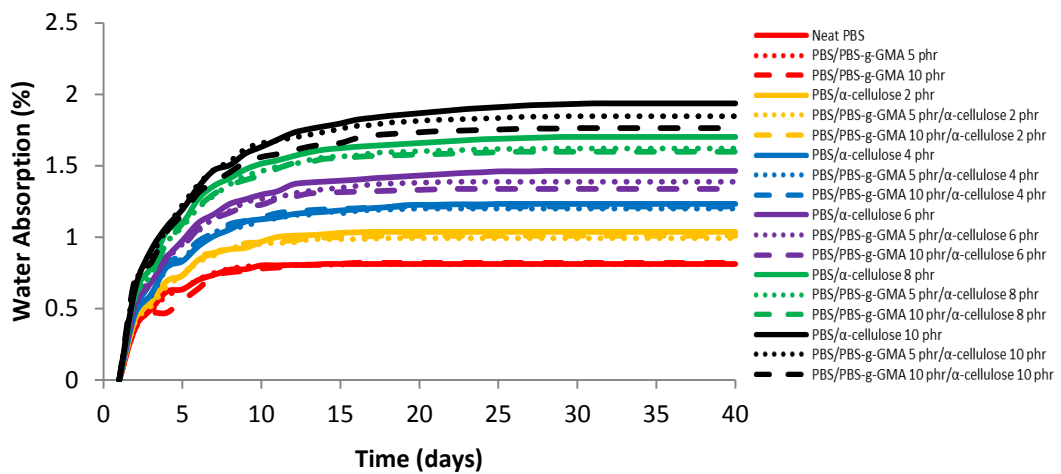
รูปที่ 4. 7 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์(1) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 10 phr คอมพอสิต(4)(7)(10)(13)(16) ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr (2)(5)(8)(11)(14)(17) และที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr (3)(6)(9)(12)(15)(18)

4.5 สมบัติการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพต้องเริ่มจากการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อน จะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังนั้นสมบัติการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตจึงเป็นตัวชี้วัดการสลายตัวของคอมพอสิต [49] เมื่อนำชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมาแช่น้ำ เพื่อวิเคราะห์สมบัติการดูดซึมน้ำของชิ้นงานได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 ผลศึกษาปริมาณของตัวเติมเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลสและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความต้านทานต่อการดูดซึมน้ำ (resistance to water absorption) โดยมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเพียง 0.81 ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเอง เมื่อพิจารณาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 2 4 6 8 และ 10 phr พบว่าสมบัติการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลส เนื่องจากแอลฟาเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ชอบน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้วัสดุคอมพอสิตมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น และที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 10 phr มีสมบัติการดูดซึมน้ำที่มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแอลฟาเซลลูโลสที่มากขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม นำไปสู่การเกิดช่องว่าง (void) ขนาดใหญ่ น้ำจึงสามารถเข้าไปได้ง่ายยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไป 5 และ 10 phr พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือ พฤติกรรมการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลส โดยเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ 5 phr สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอมพอสิตที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ลงไป เป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพื้นผิวของแอลฟาเซลลูโลส ซึ่งเป็นการไปลดช่องว่างที่มีอยู่ระหว่างเฟสทั้งสอง จึงเป็นการจำกัดความสามารถในการเข้าถึงของน้ำภายในคอมพอสิต สำหรับพฤติกรรมการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีน/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิ

เนต 10 phr เป็นไปในทางทิศทางเดียวกับกับพอลิบิวทิลีน/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต 5 phr จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ 10 phr มีสมบัติการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตที่ต่ำกว่าที่ 5 phr เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแอลฟาเซลลูโลสกับเมทริกซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ไปลดช่องว่างระหว่างเฟสของแอลฟาเซลลูโลสในเมทริกซ์มากขึ้น จึงเป็นข้อสังเกตว่าสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์กับตัวเติมเสริมแรงได้ดี [50, 51]



รูปที่ 4. 8 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณของสารเสริมแรงแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สันฐานวิทยา และสมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิบิวทิลีนคอมพอสิต โดยเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลสทำให้สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วที่มีความแตกต่างกันมากของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและแอลฟาเซลลูโลส ทำให้แอลฟาเซลลูโลสเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2) สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีน/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิตถูกปรับปรุงโดยการใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เพื่อเป็นการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพื้นผิวของแอลฟาเซลลูโลส ทำให้เกิดการกระจายตัวของแอลฟาเซลลูโลสดีขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลสไปจนถึงปริมาณ 6 phr แต่เมื่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ที่ 8 และ 10 phr สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตกลับลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของแอลฟาเซลลูโลส

3) การเติมแอลฟาเซลลูโลสเพื่อเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทำให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแอลฟาเซลลูโลสมีค่าน้อยกว่าพอลิบิวทิลีนอยู่มาก นอกจากนี้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ไปเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและแอลฟาเซลลูโลส ทำให้แรงยึดต่อระหว่างเฟสสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิก่อผลึกของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น

4) การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นการไปลดช่องว่างระหว่างเฟส ทำให้เป็นการจำกัดความสามารถในการเข้าถึงของน้ำภายในคอมพอสิต

5) อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคอมพอสิต คือ การใช้แอลฟาเซลลูโลส 6 phr และไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต 10 phr เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่สูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.) ศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และทางกายภาพของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตกับตัวเติมเสริมแรงชนิดอื่นนอกจากแอลฟาเซลลูโลส โดยใช้ไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

2.) ศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และทางกายภาพของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/แอลฟาเซลลูโลสคอมพอสิต โดยใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ชนิดอื่น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเพิ่มปริมาณของแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] PTT Marketing. พลาสติกและความปลอดภัย. in *polymers' place*. 2010. 1-20.
- [2] Paoprasert, P. Polymers from biological sources: A literature review. KKU Research Journal 18(3) (2013): 536-547.
- [3] เบลูจมาศ ปั่นหยัด. การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการลามไฟของพอลิไบิวทิลีนซ็อกซินเนตสำหรับทำกรอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาการวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2013.
- [4] Belgacem, M.N. and Gandini, A. Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources. Elsevier, 2011.
- [5] หฤทศักดิ์ กิรติเสวี. ภาพรวมของวัสดุเชิงวิศวกรรม. วิศวกรรมสาร มก. 70 (2010): 19-32.
- [6] Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. Materials Science and Engineering: An Introduction. Vol. 7: Wiley New York, 2007.
- [7] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ. วัสดุศาสตร์ขั้นแนะนำ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2011.
- [8] วุฒิ สีสลายทรเลิศ. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและเกาลีนิ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2002.
- [9] พิไลลักษณ์ พิทยอภิมล. การเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์ฟิลเฟต. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2009.
- [10] มนตรี รัตนวิจิตร. ปรากฏการณ์ซีเอ็มซี (Sodium Carboxy Methyl Cellulose). in *TTIS textile digest*. 1994. 24-25.
- [11] Griffin, D.H. Fungal Physiology. John Wiley & Sons, 1996.
- [12] Lee, J., Pagan, R., and Rogers, P. Continuous simultaneous saccharification and fermentation of starch using *Zymomonas mobilis*. Biotechnology and Bioengineering 25(3) (1983): 659-669.
- [13] Britt, K.W. Handbook of pulp and paper technology. in Handbook of Pulp and Paper Technology: Reinhold Publishing Corp., 1964.
- [14] Bray, M. and Andrews, T. An improved method for the determination of alpha-, beta-, and gamma-cellulose. Industrial & Engineering Chemistry 15(4) (1923): 377-378.

- [15] Coffey, D.G., Bell, D.A., and Henderson, A. Cellulose and cellulose derivatives. Food Science and technology -New York-Marcel Dekker- (1995): 123-123.
- [16] ไสภณ เรืองสำราญ, ปราณีย์ รัตนวลิตโรจน์, and ศรีไฉล ชุนทน. โครงการการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากชานอ้อย: รายงานฉบับสมบูรณ์. 1998, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Chan, C.-M., Wu, J., Li, J.-X., and Cheung, Y.-K. Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites. polymer 43(10) (2002): 2981-2992.
- [18] รังนา สิริสุข. เอกสารประกอบการสอนวิชาการกระบวนการผลิตทางพอลิเมอร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2007.
- [19] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์1. กทม., 2005.
- [20] บรรเลง ศรีนิล. เทคโนโลยีพลาสติก. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2003.
- [21] เจริญ นาคะสรรค์. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์นิติธรรม, 1999.
- [22] ดรรชนี พันธวารกร. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2012.
- [23] Liu, L., Yu, J., Cheng, L., and Qu, W. Mechanical properties of poly (butylene succinate)(PBS) biocomposites reinforced with surface modified jute fibre. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40(5) (2009): 669-674.
- [24] Lee, J., Ishak, Z.M., Taib, R.M., Law, T., and Thirmizir, M.A. Mechanical, thermal and water absorption properties of kenaf-fiber-based polypropylene and poly (butylene succinate) composites. Journal of Polymers and the Environment 21(1) (2013): 293-302.
- [25] Wu, C.-S., Liao, H.-T., and Jhang, J.-J. Palm fibre-reinforced hybrid composites of poly (butylene succinate): characterisation and assessment of mechanical and thermal properties. Polymer Bulletin 70(12) (2013): 3443-3462.
- [26] Tajvidi, M. and Ebrahimi, G. Water uptake and mechanical characteristics of natural filler-polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science 88(4) (2003): 941-946.
- [27] Wu, J.-H., et al. Preparation and properties of α -cellulose short fiber-reinforced poly (lactic acid) composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering 52(9) (2013): 877-884.

- [28] Moon, S. and Iji, M. Fabrication and characterization of poly (butylene succinate)-grafted carbon fiber/poly (L-lactide) nanocomposites. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry 46(13) (2008): 4433-4441.
- [29] Bao, L., Chen, Y., Zhou, W., Wu, Y., and Huang, Y. Bamboo fibers@ poly (ethylene glycol)-reinforced poly (butylene succinate) biocomposites. Journal of Applied Polymer Science 122(4) (2011): 2456-2466.
- [30] Burton, E.L., Woodhead, M., Coates, P., and Gough, T. Reactive grafting of glycidyl methacrylate onto polypropylene. Journal of Applied Polymer Science 117(5) (2010): 2707-2714.
- [31] Lacasse, C. and Favis, B.D. Interface/morphology/property relationships in polyamide-6/ABS blends. Advances in Polymer Technology 18(3) (1999): 255-265.
- [32] Sain, M., Kokta, B., and Maldas, D. Effect of reactive additives on the performance of cellulose fiber-filled polypropylene composites. Journal of Adhesion Science and Technology 7(1) (1993): 49-61.
- [33] Ohkita, T. and Lee, S.-H. Effect of aliphatic isocyanates (HDI and LDI) as coupling agents on the properties of eco-composites from biodegradable polymers and corn starch. Journal of Adhesion Science and Technology 18(8) (2004): 905-924.
- [34] Liu, W., Wang, Y.J., and Sun, Z. Effects of polyethylene-grafted maleic anhydride (PE-g-MA) on thermal properties, morphology, and tensile properties of low-density polyethylene (LDPE) and corn starch blends. Journal of Applied Polymer Science 88(13) (2003): 2904-2911.
- [35] Zhang, F., Endo, T., Qiu, W., Yang, L., and Hirotsu, T. Preparation and mechanical properties of composite of fibrous cellulose and maleated polyethylene. Journal of Applied Polymer Science 84(11) (2002): 1971-1980.
- [36] Battistella, M., Cascione, M., Fiedler, B., Wichmann, M., Quaresimin, M., and Schulte, K. Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39(12) (2008): 1851-1858.

- [37] Canché-Escamilla, G., Rodríguez-Trujillo, G., Herrera-Franco, P., Mendizabal, E., and Puig, J. Preparation and characterization of henequen cellulose grafted with methyl methacrylate and its application in composites. Journal of Applied Polymer Science 66(2) (1997): 339-346.
- [38] Someya, Y., Nakazato, T., Teramoto, N., and Shibata, M. Thermal and mechanical properties of poly (butylene succinate) nanocomposites with various organo-modified montmorillonites. Journal of Applied Polymer Science 91(3) (2004): 1463-1475.
- [39] Chen, C.-H. Effect of attapulgite on the crystallization behavior and mechanical properties of poly (butylene succinate) nanocomposites. Journal of Physics and Chemistry of Solids 69(5) (2008): 1411-1414.
- [40] Zhang, H.h., Cui, Y., and Zhang, Z. Chemical treatment of wood fiber and its reinforced unsaturated polyester composites. Journal of Vinyl and Additive Technology 19(1) (2013): 18-24.
- [41] Nosbi, N., Akil, H.M., Ishak, Z.A.M., and Bakar, A.A. Behavior of kenaf fibers after immersion in several water conditions. BioResources 6(2) (2011): 950-960.
- [42] Oksman, K., Skrifvars, M., and Selin, J.-F. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. Composites Science and Technology 63(9) (2003): 1317-1324.
- [43] Lee, S.M., Cho, D., Park, W.H., Lee, S.G., Han, S.O., and Drzal, L.T. Novel silk/poly (butylene succinate) biocomposites: the effect of short fibre content on their mechanical and thermal properties. Composites Science and Technology 65(3) (2005): 647-657.
- [44] Kim, H.-S., Lee, B.-H., Choi, S.-W., Kim, S., and Kim, H.-J. The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 38(6) (2007): 1473-1482.

- [45] Sahoo, S., Misra, M., and Mohanty, A.K. Enhanced properties of lignin-based biodegradable polymer composites using injection moulding process. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42(11) (2011): 1710-1718.
- [46] Kim, H.-S., Lee, B.-H., Lee, S., Kim, H.-J., and Dorgan, J.R. Enhanced interfacial adhesion, mechanical, and thermal properties of natural flour-filled biodegradable polymer bio-composites. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 104(1) (2010): 331-338.
- [47] Lee, S.-H. and Wang, S. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37(1) (2006): 80-91.
- [48] Xu, T., Tang, Z., and Zhu, J. Synthesis of polylactide-graft-glycidyl methacrylate graft copolymer and its application as a coupling agent in polylactide/bamboo flour biocomposites. Journal of Applied Polymer Science 125(S2) (2012): E622-E627.
- [49] Bledzki, A., Mamun, A., and Faruk, O. Abaca fibre reinforced PP composites and comparison with jute and flax fibre PP composites. Express Polymer Letter 1(11) (2007): 755-762.
- [50] Thirmizir, M.A., Ishak, Z.M., Taib, R.M., Sudin, R., and Leong, Y. Mechanical, water absorption and dimensional stability studies of kenaf bast fibre-filled poly (butylene succinate) composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering 50(4) (2011): 339-348.
- [51] Athijayamani, A., Thiruchitrabalam, M., Natarajan, U., and Pazhanivel, B. Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite. Materials Science and Engineering: A 517(1) (2009): 344-353.



ภาคผนวก ก
ความทนแรงดึง

ตาราง ก-1 ค่าความทนแรงดึงของ NEAT PBS

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.3	12.2	690.5
2	37.5	12.5	655
3	37.1	12.1	667.9
4	37.7	12.4	672.8
5	36.9	12.5	630.3
AVG	37.3	12.3	663.3
SD	0.31	0.18	22.41

ตาราง ก-2 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 5 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.7	12.0	663.1
2	37.5	12.5	670.5
3	37.1	12.8	683.7
4	37.4	12.6	679.7
5	37.4	12.8	685.2
AVG	37.42	12.54	676.44
SD	0.21	0.32	9.39

ตาราง ก- 3 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 10 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.5	12.2	693.7
2	37.2	12.3	694.3
3	37.2	12.4	693.5
4	37.0	12.8	686.1
5	37.2	12.8	690.9
AVG	37.2	12.5	691.7
SD	0.17	0.28	3.39

ตาราง ก-4 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/ α -cellulose 2 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	36.2	9.4	730.9
2	36.4	10.2	748.5
3	36.4	9.8	713.8
4	36.2	9.6	729.2
5	36.4	10.9	724.4
AVG	36.32	9.98	729.36
SD	0.10	0.59	12.60

ตาราง ก-5 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 2 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.2	9.9	702.1
2	38.9	10.6	771.1
3	38.7	10.8	769.3
4	38.5	9.6	761.4
5	38.9	10	752.1
AVG	38.44	10.18	751.2
SD	0.71	0.50	28.45

ตาราง ก- 6 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 2 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.5	10.4	793.2
2	38.8	10.5	752
3	39	10.6	738.7
4	38.9	10.6	804.2
5	38.8	10.6	783
AVG	38.8	10.54	774.22
SD	0.18	0.08	27.80

ตาราง ก-7 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/ α -cellulose 4 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	34.9	9.5	803.2
2	34.7	9.4	820.5
3	34.7	9.4	801.8
4	35	9.8	822.1
5	35	9.4	810.3
AVG	34.86	9.5	811.58
SD	0.15	0.17	9.45

ตาราง ก-8 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 4 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.6	10.1	805.6
2	38.5	9.8	824.3
3	38.6	10.2	812.5
4	38.6	9.9	830.5
5	38.6	9.9	806.6
AVG	38.58	9.98	815.9
SD	0.04	0.16	11.04

ตาราง ก-9 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 4 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39	9.6	830.3
2	39.4	10.3	842
3	38.9	10	803.2
4	39	10.1	793.6
5	39.3	10.1	823.5
AVG	39.12	10.02	818.52
SD	0.21	0.25	19.81

ตาราง ก-10 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/ α -cellulose 6 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	33.9	9	804.6
2	33.5	9.1	796.8
3	33.9	9.1	818.8
4	33.8	8.8	863.7
5	33.9	9.4	861.9
AVG	33.8	9.08	829.16
SD	0.17	0.21	31.71

ตาราง ก-11 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 6 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.3	9.6	878
2	39.1	9.5	849
3	39.1	9.3	887.2
4	39	9.3	833.1
5	39	9.2	828.1
AVG	39.1	9.38	855.08
SD	0.12	0.16	26.48

ตาราง ก-12 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 6 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.2	10.1	853.8
2	39.9	8.9	862.2
3	40.2	10.1	851.6
4	39.7	9.7	870.8
5	40.7	10.9	879.9
AVG	40.14	9.94	863.66
SD	0.37	0.72	11.82

ตาราง ก-13 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/ α -cellulose 8 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	30.9	8	919.5
2	31.1	7.7	931.1
3	30.9	7.5	939.9
4	30.8	8.3	931.5
5	30.8	8.3	881
AVG	30.9	7.96	920.6
SD	0.12	0.35	23.29

ตาราง ก-14 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 8 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.8	7.3	919.4
2	37.7	8	858.6
3	37.8	7.7	914.6
4	37.7	7.6	964.6
5	37.4	7.5	948.8
AVG	37.68	7.62	921.2
SD	0.16	0.26	40.65

ตาราง ก-15 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 8 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.5	8.3	933.2
2	38.3	8.3	942.2
3	38.3	8	940.3
4	37.9	7.6	938.8
5	37.9	7.4	943.1
AVG	37.98	7.92	939.52
SD	0.33	0.41	3.91

ตาราง ก-16 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/ α -cellulose 10

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	30.1	6.5	1006.3
2	30.6	6.7	992.4
3	30.2	6.8	1006.3
4	30.5	6.9	1024.1
5	30.4	6.4	1038.9
AVG	30.36	6.66	1013.6
SD	0.21	0.21	18.07

ตาราง ก-17 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 5 phr/ α -cellulose 10 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	36.4	6.9	1079.7
2	37.5	6.7	1067.7
3	38	6.8	1059.9
4	37.4	6.9	1049.1
5	37.7	7.1	1043.1
AVG	37.4	6.88	1059.9
SD	0.60	0.15	14.59

ตาราง ก-18 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/PBS-g-GMA 10 phr/ α -cellulose 10 phr

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.5	7.6	1129.5
2	37.4	7.6	1099.5
3	37.4	7.4	1077.1
4	37.8	7.9	1168.1
5	37.9	7.6	1064.8
AVG	37.6	7.62	1107.8
SD	0.23	0.18	41.74

ภาคผนวก ข
ความทนแรงดัดโค้ง

ตาราง ข-1 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ

No.	Flexural strength (MPa)					
	Neat PBS	PBS/2% α -cellulose	PBS/4% α -cellulose	PBS/6% α -cellulose	PBS/8% α -cellulose	PBS/10% α -cellulose
1	20.03	20.7	20.7	19.7	19.1	17.2
2	20.03	20.5	20.7	19.8	19.0	17.3
3	20.28	20.4	20.7	19.6	18.0	17.2
4	20.03	20.4	20.4	19.7	18.0	17.0
5	20.03	20.5	20.5	19.5	18.9	17.1
AVG	20.08	20.5	20.6	19.66	18.6	17.16
SD	0.1118	0.12	0.14	0.11	0.55	0.11

ตาราง ข-2 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 phr

No.	Flexural strength (MPa)					
	PBS	PBS/2% α -cellulose	PBS/4% α -cellulose	PBS/6% α -cellulose	PBS/8% α -cellulose	PBS/10% α -cellulose
1	20.03	20.4	20.7	24.1	23	24
2	20.03	20.5	20.7	25.5	22.9	24.3
3	20.03	21	20.7	25.4	23	24.4
4	20.03	20.5	20.9	25.4	23.3	24.6
5	20.16	20.4	21	25.4	23.4	24.5
AVG	20.06	20.56	20.8	25.16	23.12	24.36
SD	0.05	0.25	0.14	0.59	0.22	0.23

ตาราง ข-3 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 phr

No.	Flexural strength (MPa)					
	PBS	PBS/2% α -cellulose	PBS/4% α -cellulose	PBS/6% α -cellulose	PBS/8% α -cellulose	PBS/10% α -cellulose
1	19.91	22.5	21.0	26.8	23.9	23.9
2	19.91	20.4	21.0	26.9	23.8	23.9
3	19.78	20.3	20.9	27.1	23.8	23.9
4	19.91	20.3	21.7	26.9	23.9	23.8
5	20.03	20.3	20.9	26.3	23.9	23.8
AVG	19.91	20.76	21.1	26.8	23.86	23.86
SD	0.09	0.97	0.34	0.30	0.05	0.05

ภาคผนวก ค

ความทนแรงกระแทก

ตาราง ค-1 แสดงค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตคอมพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ

No.	Impact strength (J/m ²)					
	Neat PBS	PBS/2% α -cellulose	PBS/4% α -cellulose	PBS/6% α -cellulose	PBS/8% α -cellulose	PBS/10% α -cellulose
1	2093.1	2012.5	1888.8	1722.3	1594.2	1455.5
2	2078.2	1934.2	1879.2	1717.7	1593.5	1455.5
3	2110.3	1934.2	1866.3	1722.3	1594.2	1463.2
4	2045.3	1982.5	1866.2	1723.8	1587.6	1434.7
5	2109.2	1976.3	1834.5	1717.7	1587.4	1434.7
AVG	2087.22	1967.94	1867	1720.76	1591.38	1448.72
SD	26.87	33.71	20.50	2.86	3.55	13.18

ตาราง ค-2 แสดงค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตคอมพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนต 5 phr

No.	Impact strength (J/m ²)					
	PBS	PBS/2% α -cellulose	PBS/4% α -cellulose	PBS/6% α -cellulose	PBS/8% α -cellulose	PBS/10% α -cellulose
1	2090.1	2110.5	2234.5	2401.3	2248.5	2109.5
2	2090.1	2112.3	2301.2	2412.5	2301.2	2111.8
3	2085.3	2110.5	2234.5	2401.3	2248.4	2109.2
4	2080.1	2115.6	2258.3	2423.5	2256.2	2098.8
5	2099.8	2093.1	2246.3	2415.9	2239.1	2121.3
AVG	2089.08	2108.4	2254.96	2410.9	2258.68	2110.12
SD	7.28	8.80	27.67	9.63	24.53	8.02

ตาราง ค-3 แสดงค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ไกลซิดิลเมทาคริเลต 10 phr

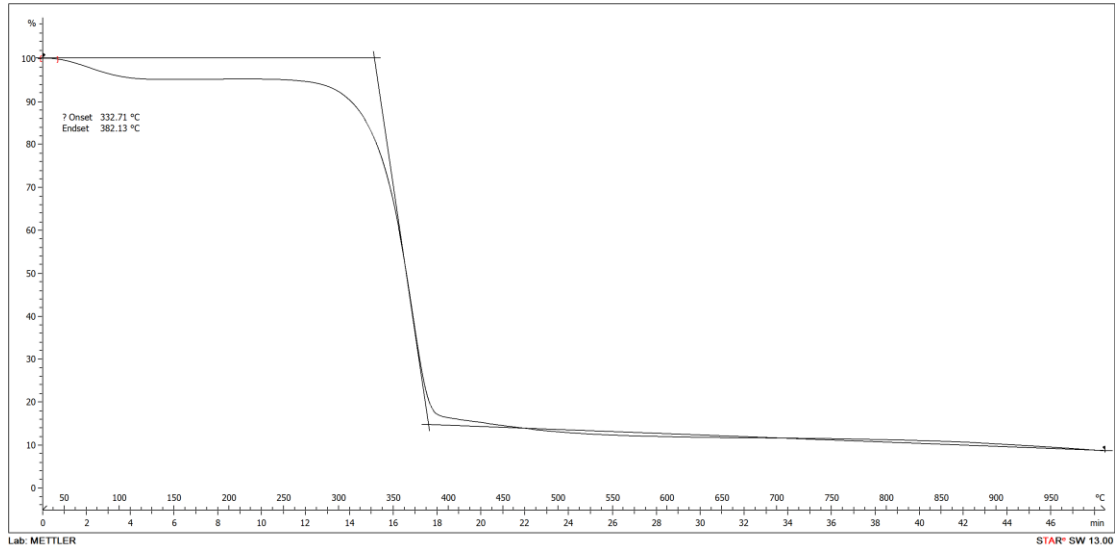
No.	Impact strength (J/m ²)					
	PBS	PBS/2% α -cellulose	PBS/4% α -cellulose	PBS/6% α -cellulose	PBS/8% α -cellulose	PBS/10% α -cellulose
1	2083.1	2112.2	2300.5	2440.5	2301.2	2150.2
2	2093.5	2134.3	2301.7	2431.2	2298.6	2148.9
3	2110.4	2101.9	2289.4	2440.5	2271.5	2187.6
4	2076.4	2122.5	2276.3	2459.8	2298.6	2134.5
5	2097.4	2122.5	2289.4	2442.8	2301.2	2134.5
AVG	2092.16	2118.68	2291.46	2442.96	2294.22	2151.14
SD	13.16	12.21	10.31	10.42	12.77	21.73



ภาคผนวก ง

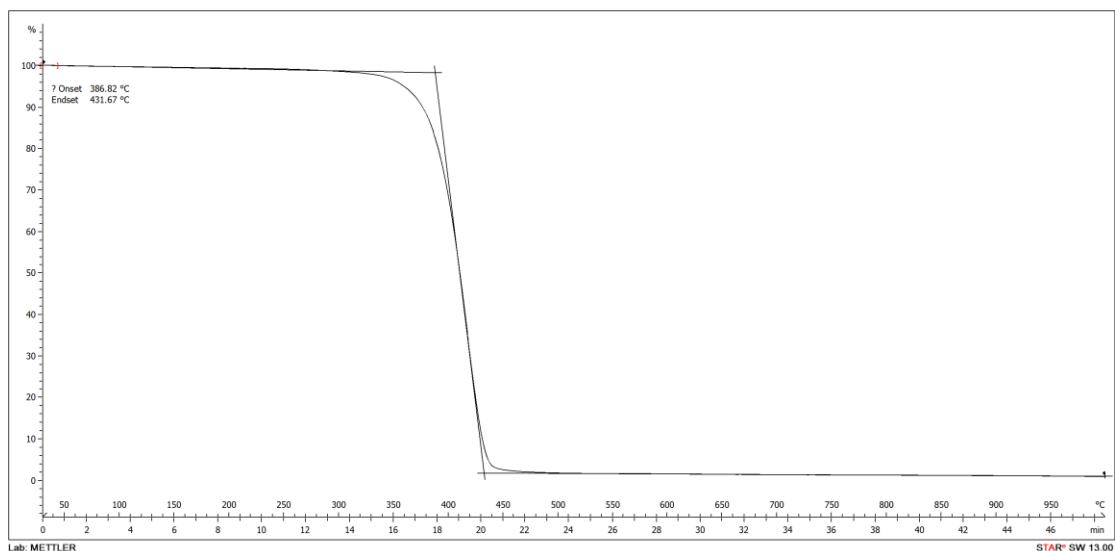
TGA Thermogram ของพอลิเมอร์คอมพอสิต

1. แอลฟาเซลลูโลส



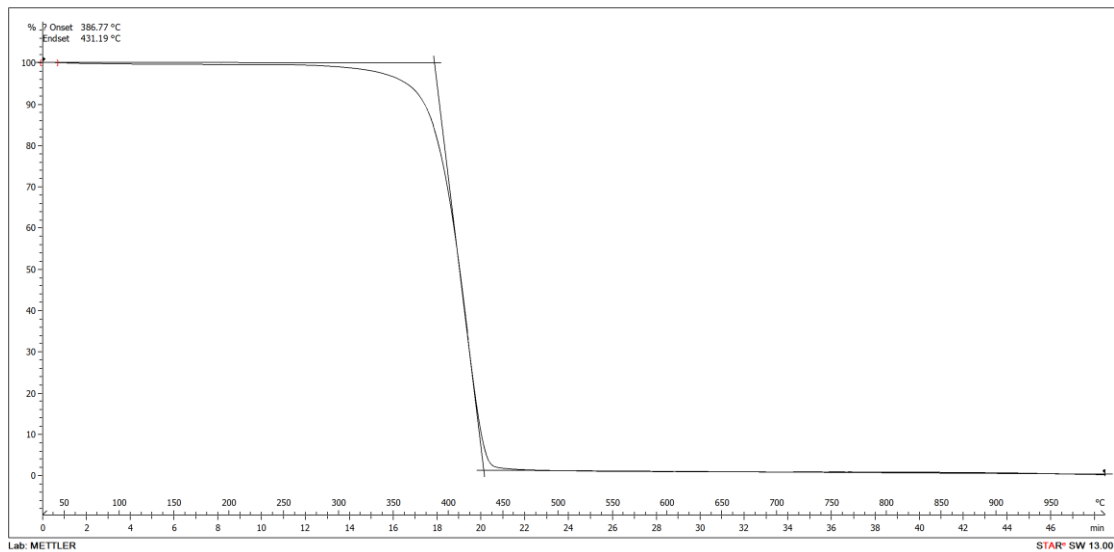
รูปที่ ง-1 เทอร์โมแกรมของแอลฟาเซลลูโลส

2. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



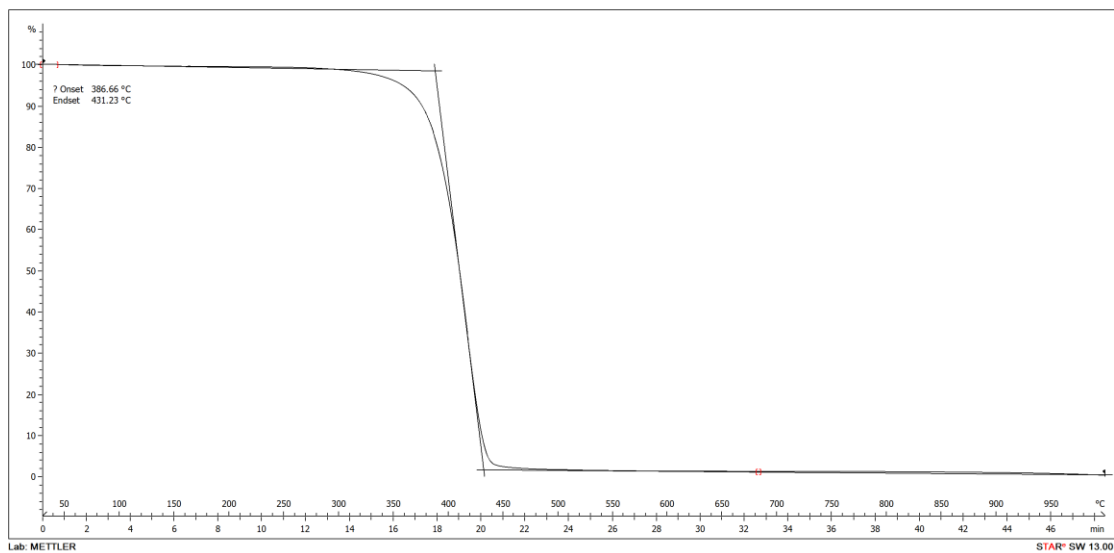
รูปที่ ง-2 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์

3. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr



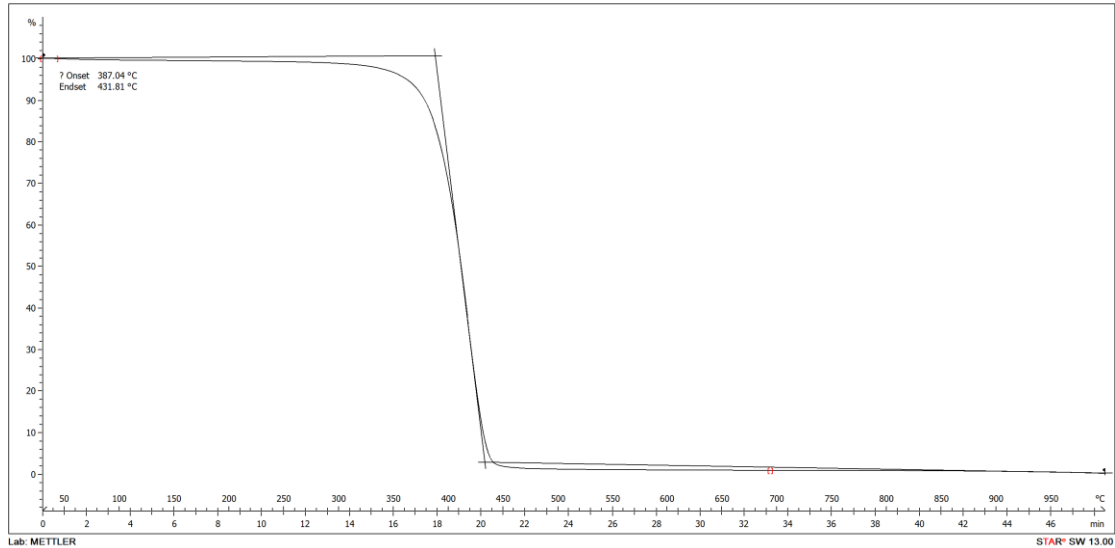
รูปที่ ง-3 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr

4. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



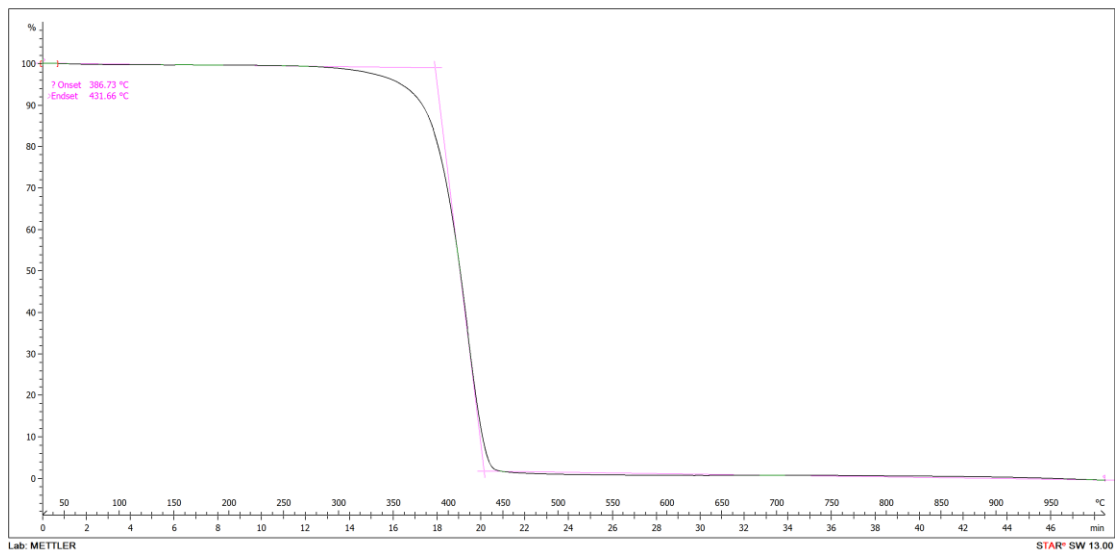
รูปที่ ง-4 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

5. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วย แอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



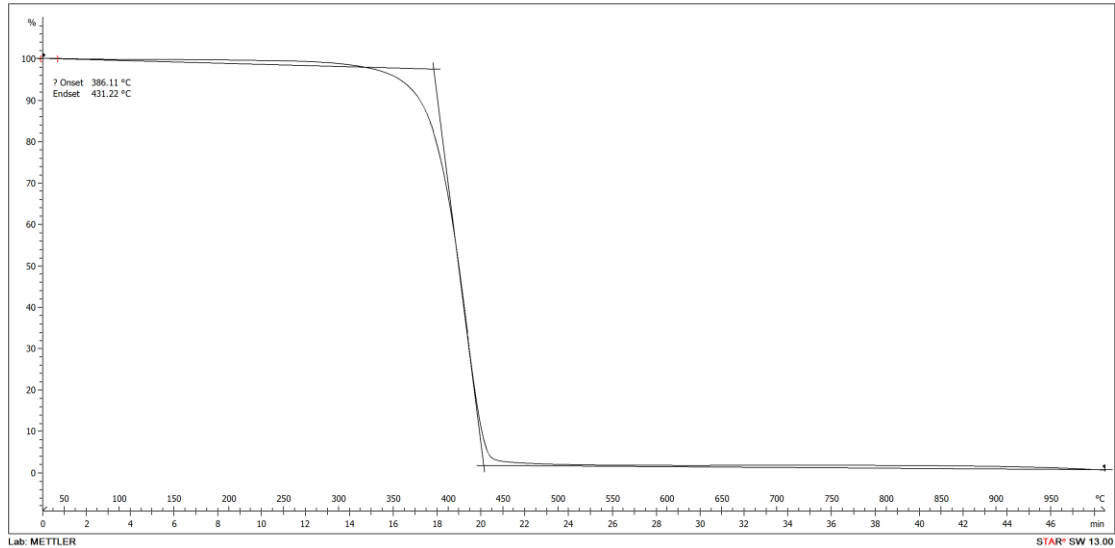
รูปที่ ง-5 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

6. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วย แอลฟาเซลลูโลส 4 phr



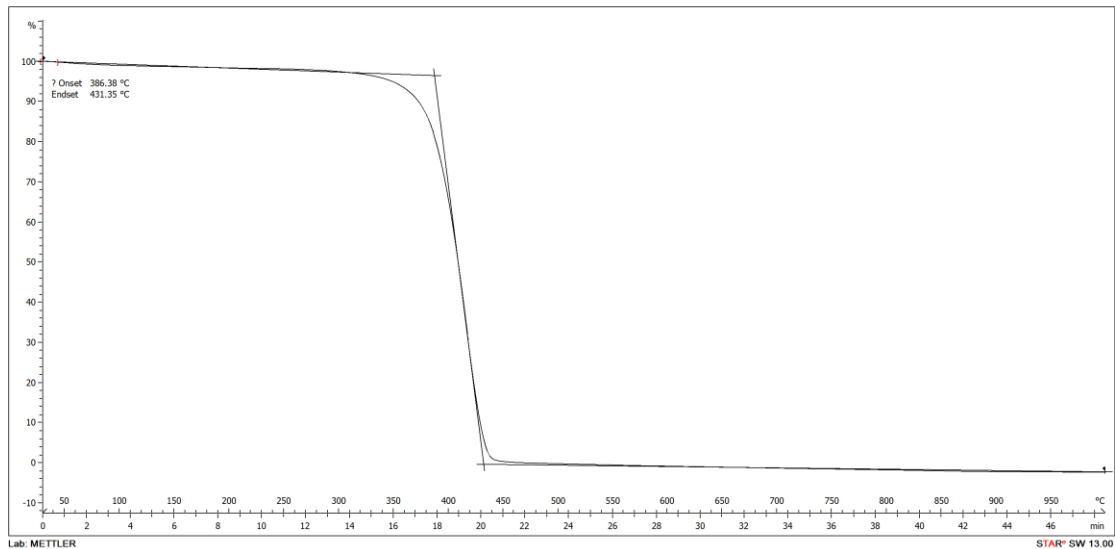
รูปที่ ง-6 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr

7. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



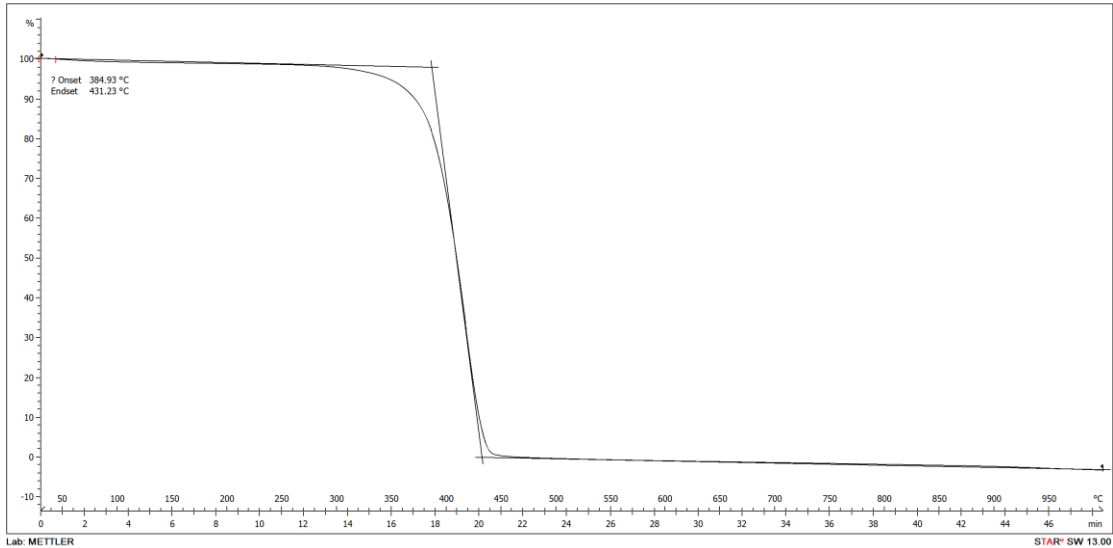
รูปที่ ง-7 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

8. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



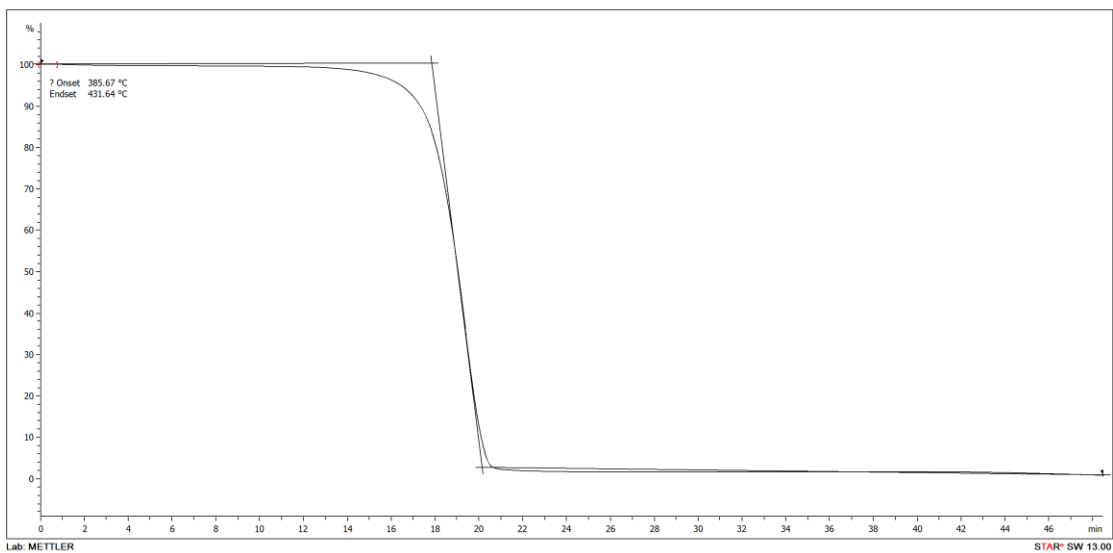
รูปที่ ง-8 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

9. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr



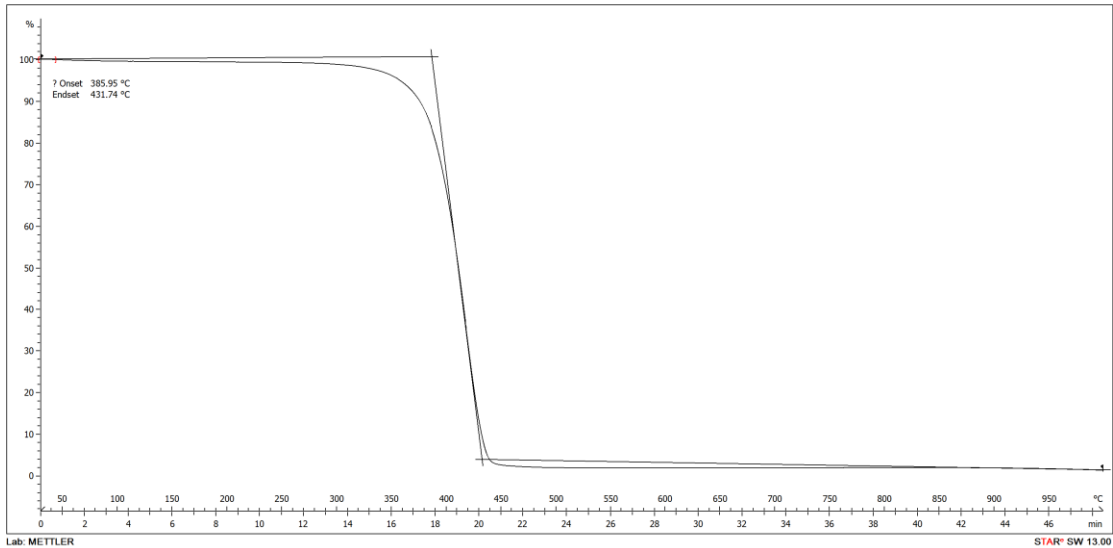
รูปที่ ง-9 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr

10. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



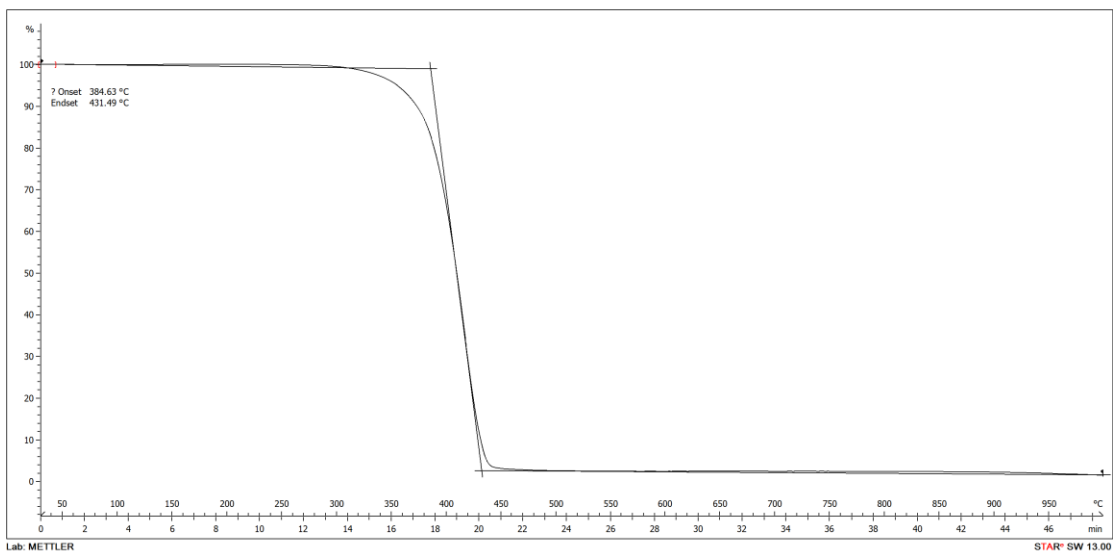
รูปที่ ง-10 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

11. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



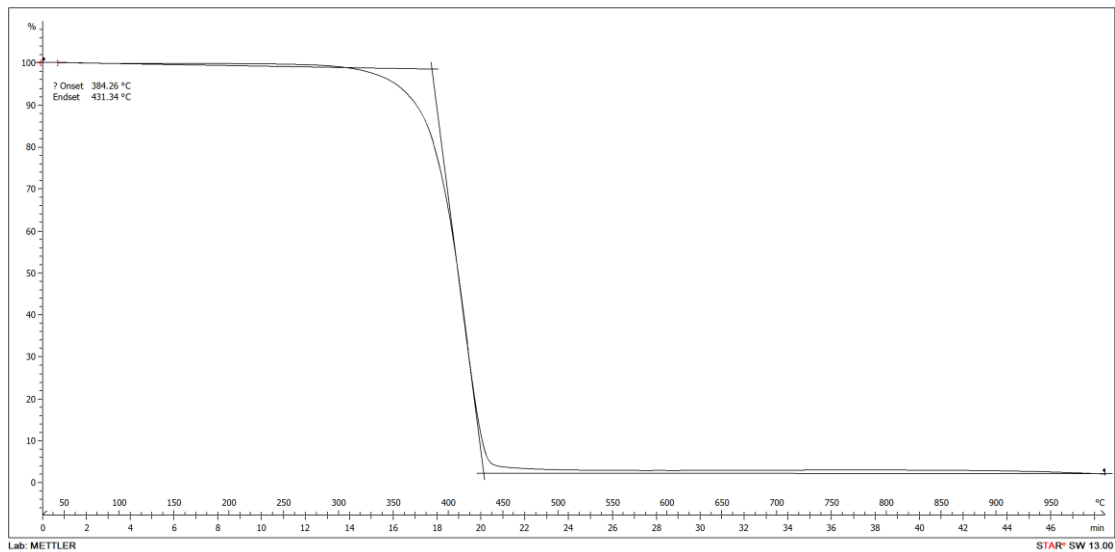
รูปที่ ง-11 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

12. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr



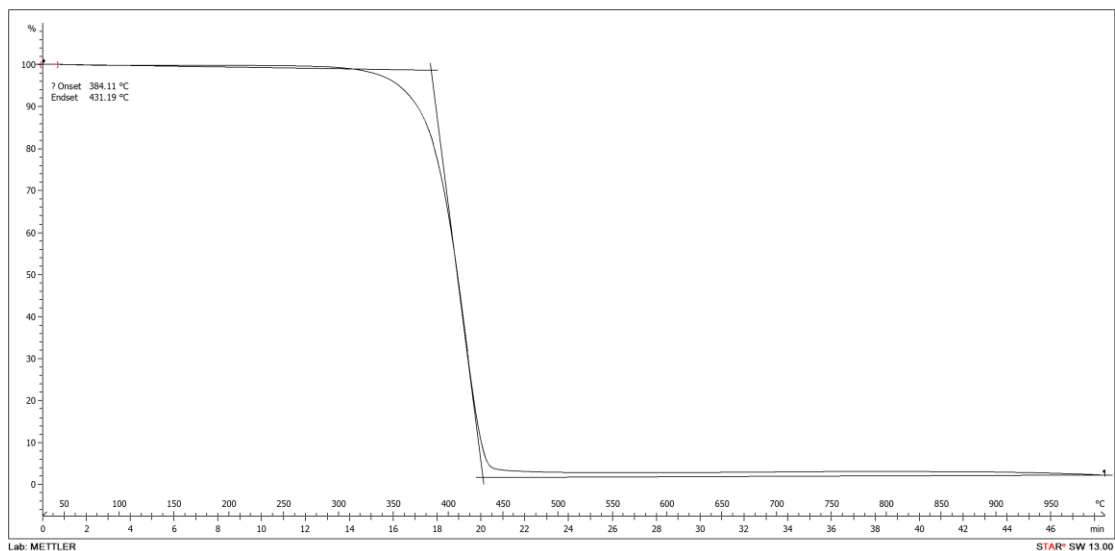
รูปที่ ง-12 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr

13. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



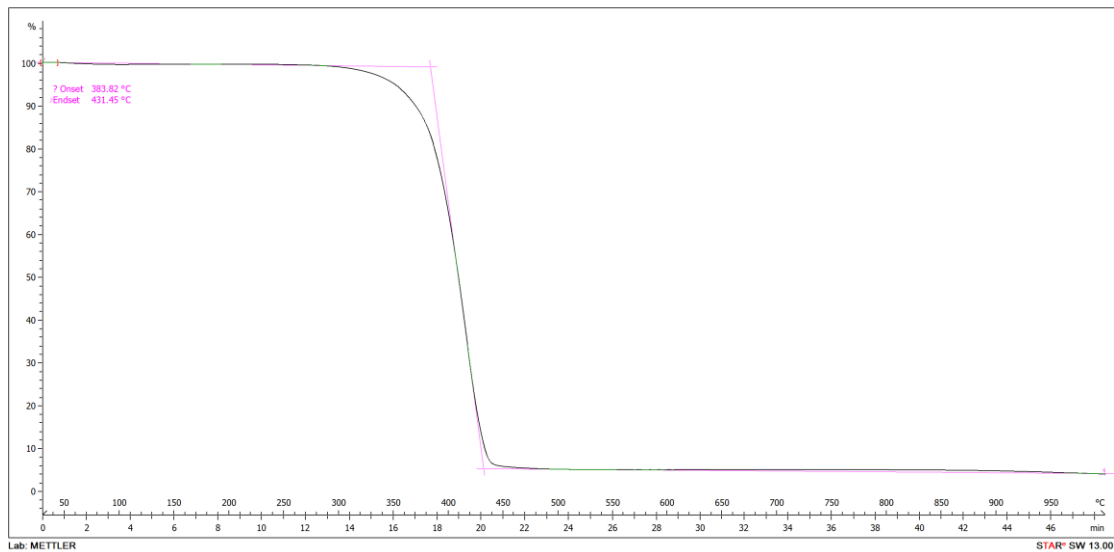
รูปที่ ง-13 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

14. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



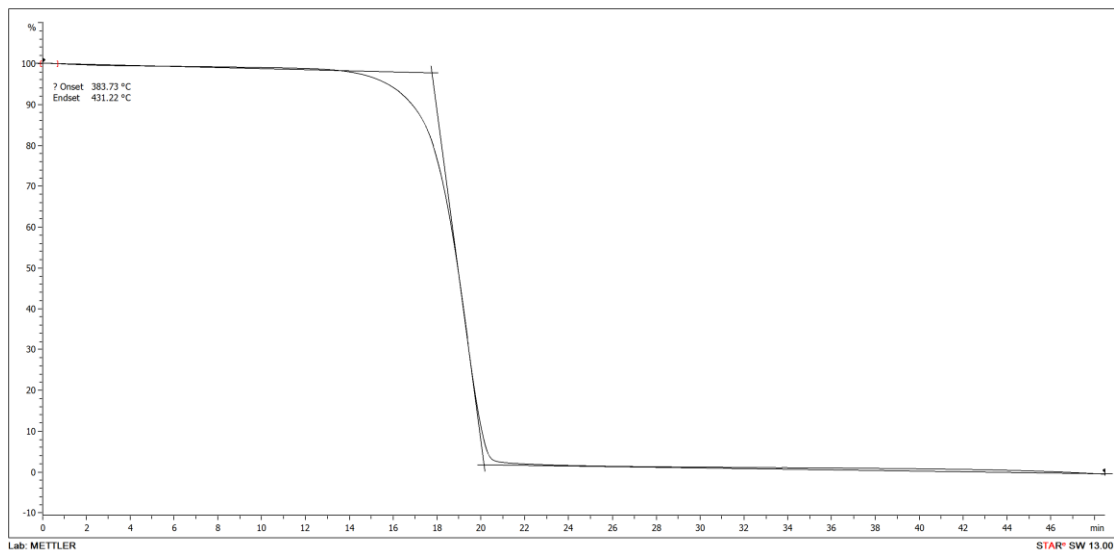
รูปที่ ง-14 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

15. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr



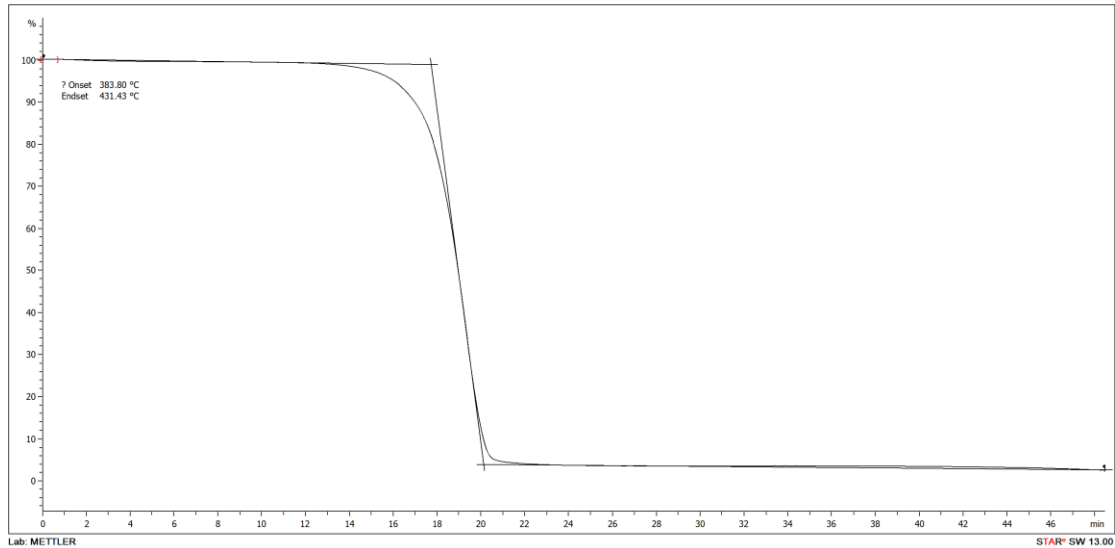
รูปที่ ง-15 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr

16. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



รูปที่ ง-16 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

17. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

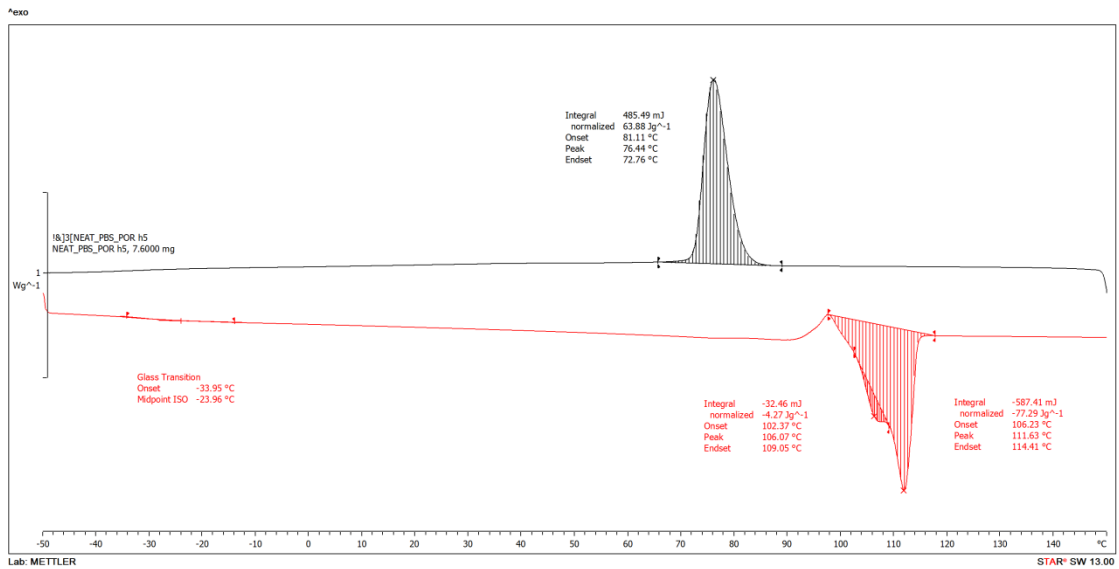


รูปที่ ง-17 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

ภาคผนวก จ

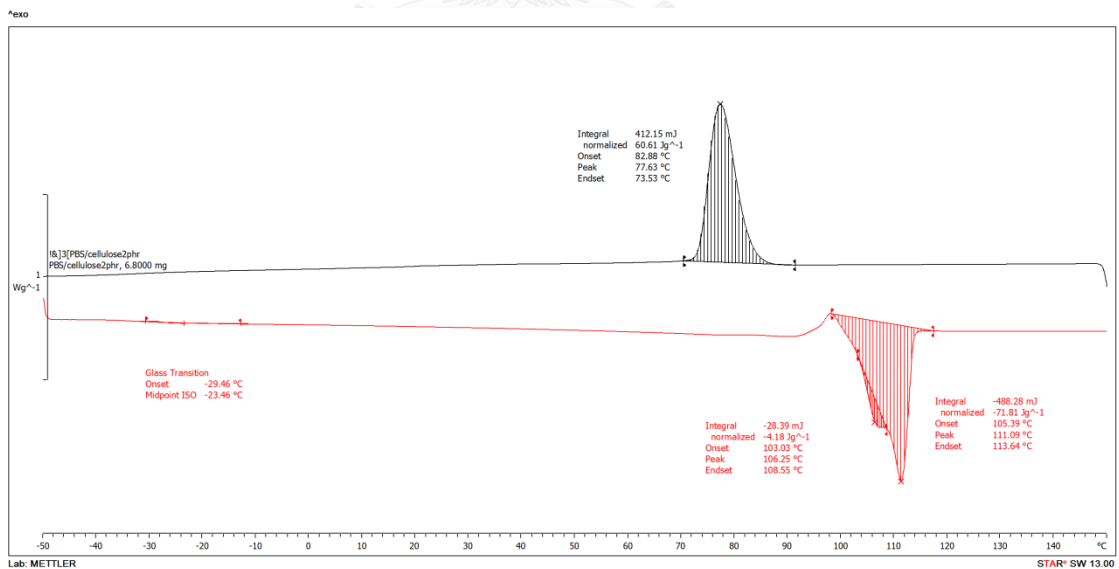
DSC Thermogram ของพอลิเมอร์คอมพอลิิต

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



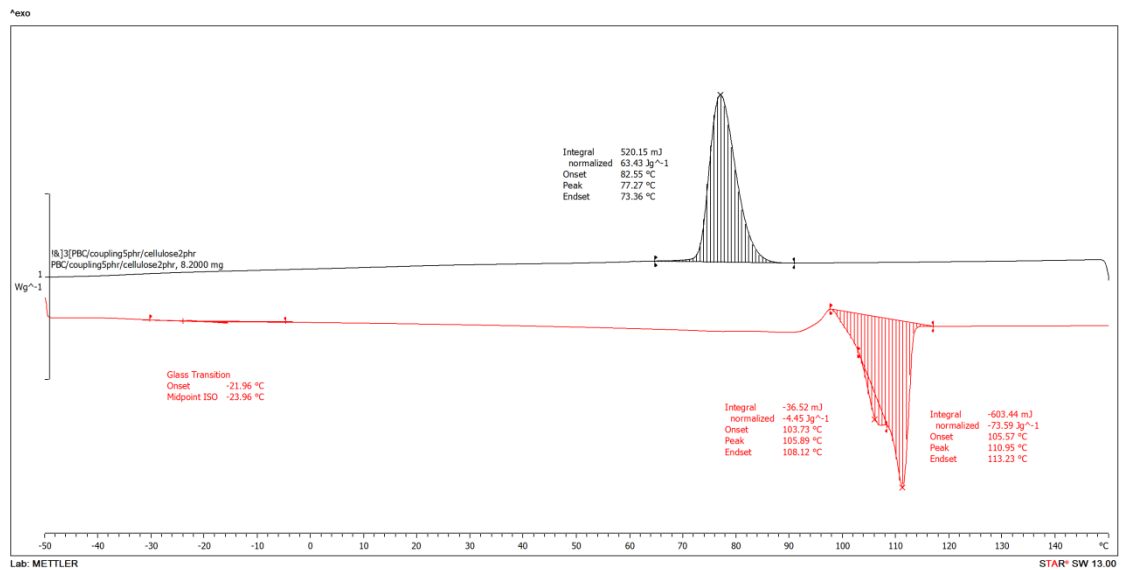
รูปที่ ง-1 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์

2. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr



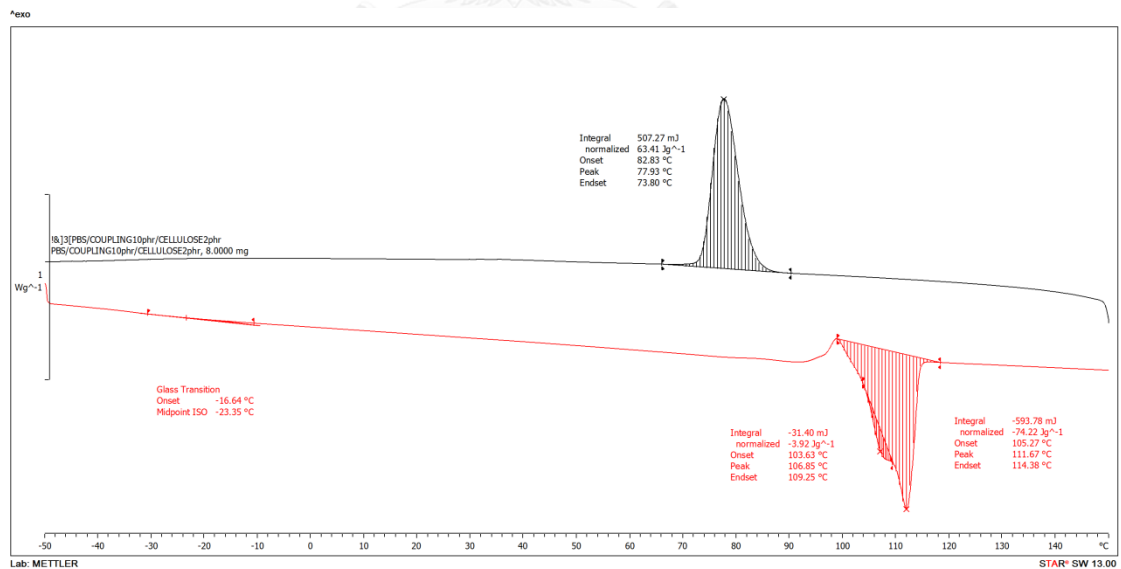
รูปที่ ง-2 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr

3. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



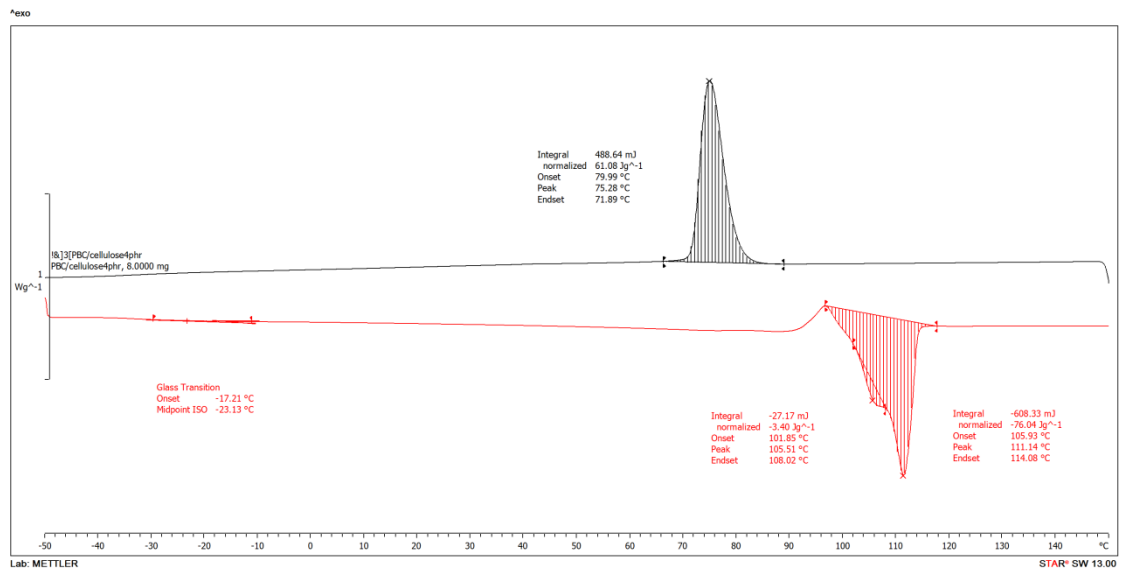
รูปที่ ง-3 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

4. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วย แอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



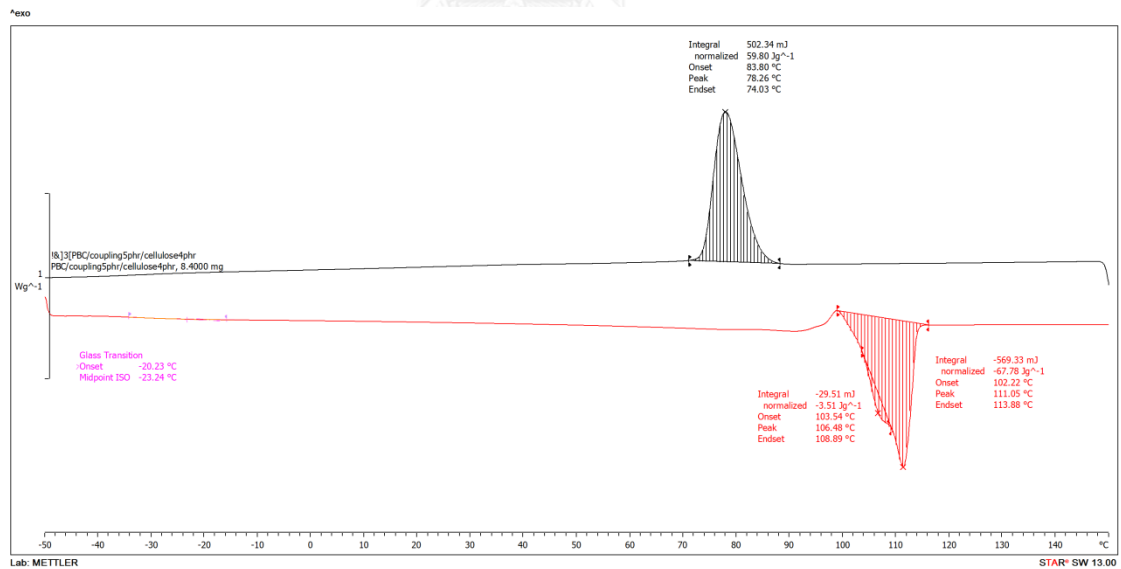
รูปที่ ง-4 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 2 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

5. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วย แอลฟาเซลลูโลส 4 phr



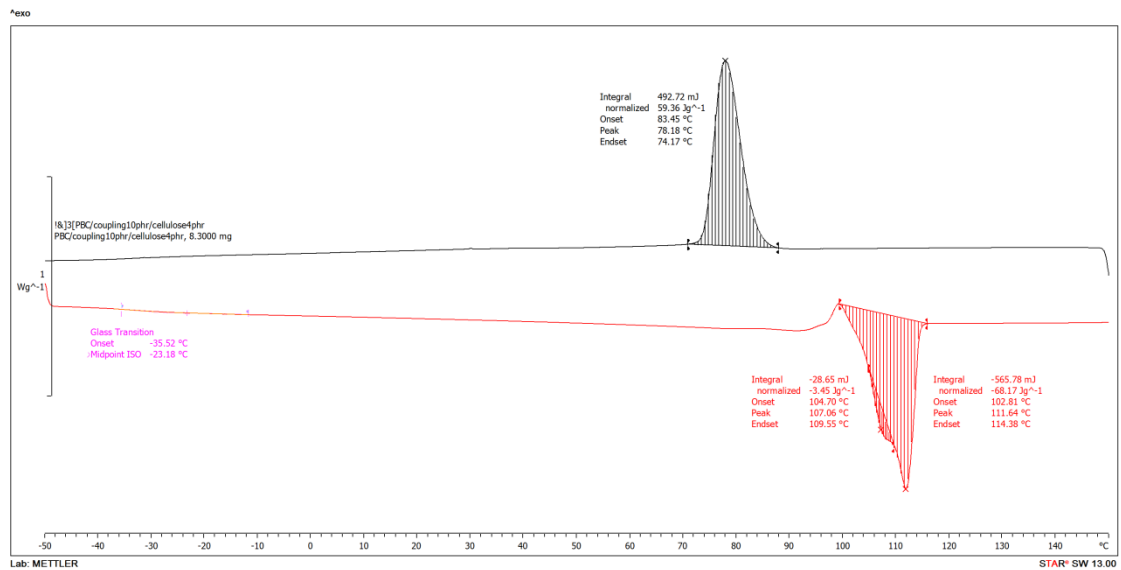
รูปที่ ง-5 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr

6. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



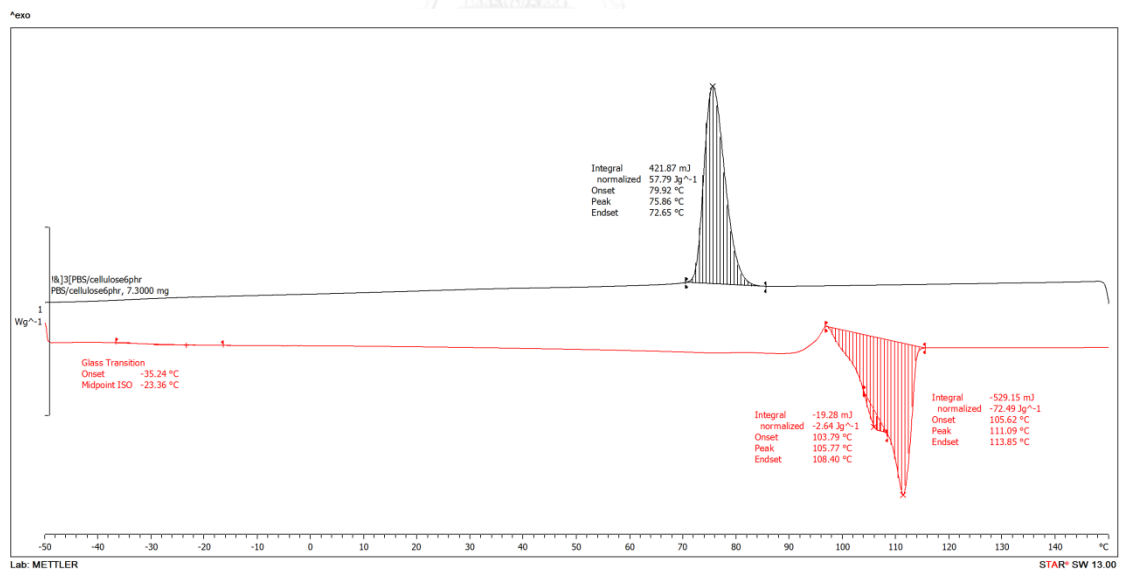
รูปที่ ง-6 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

7. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



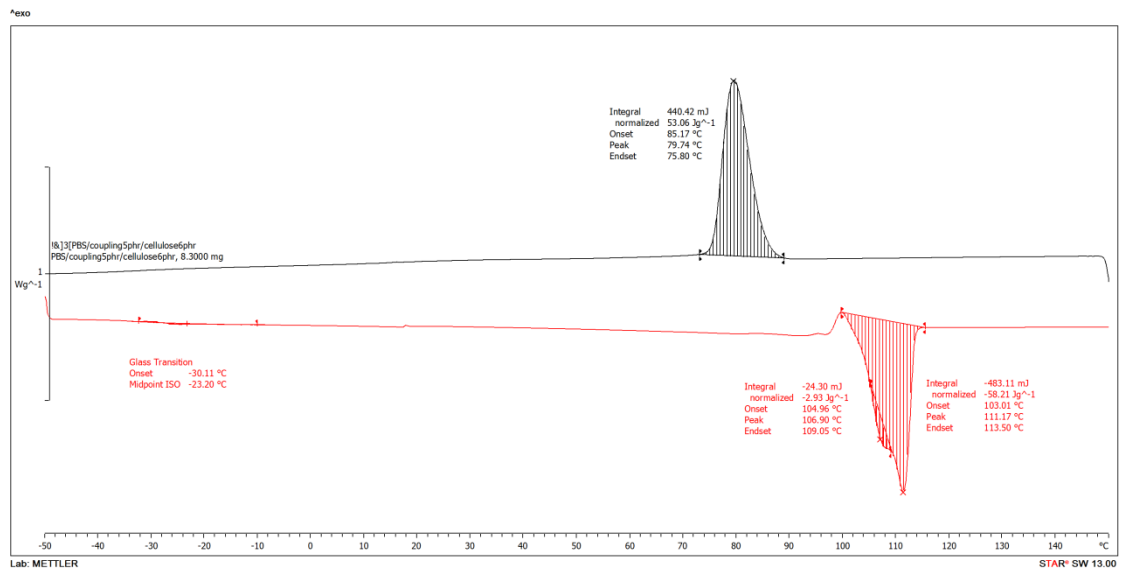
รูปที่ ง-7 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 4 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

8. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr



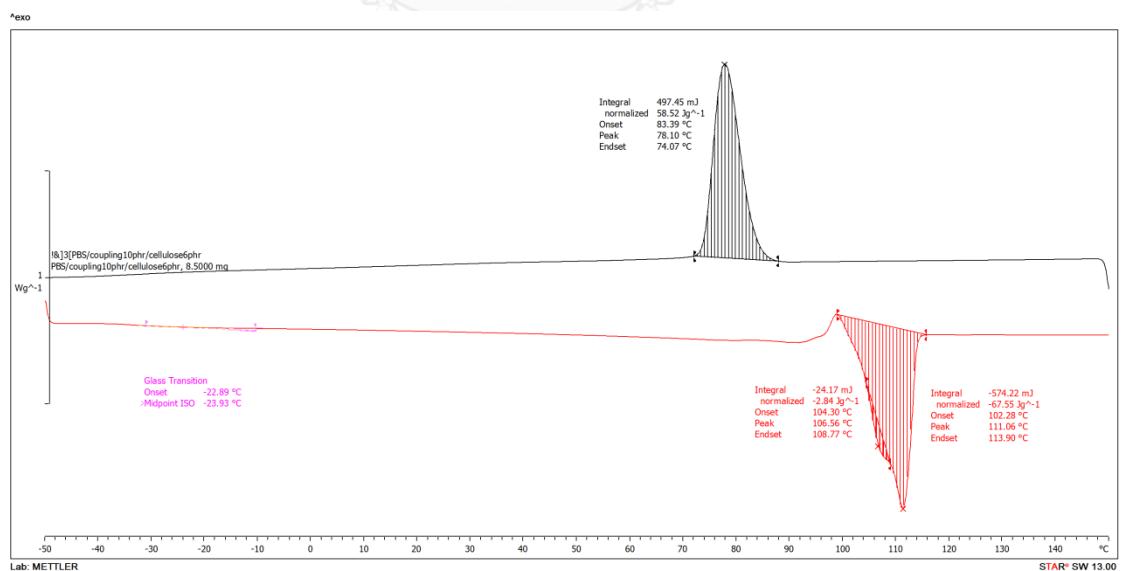
รูปที่ ง-8 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr

9. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



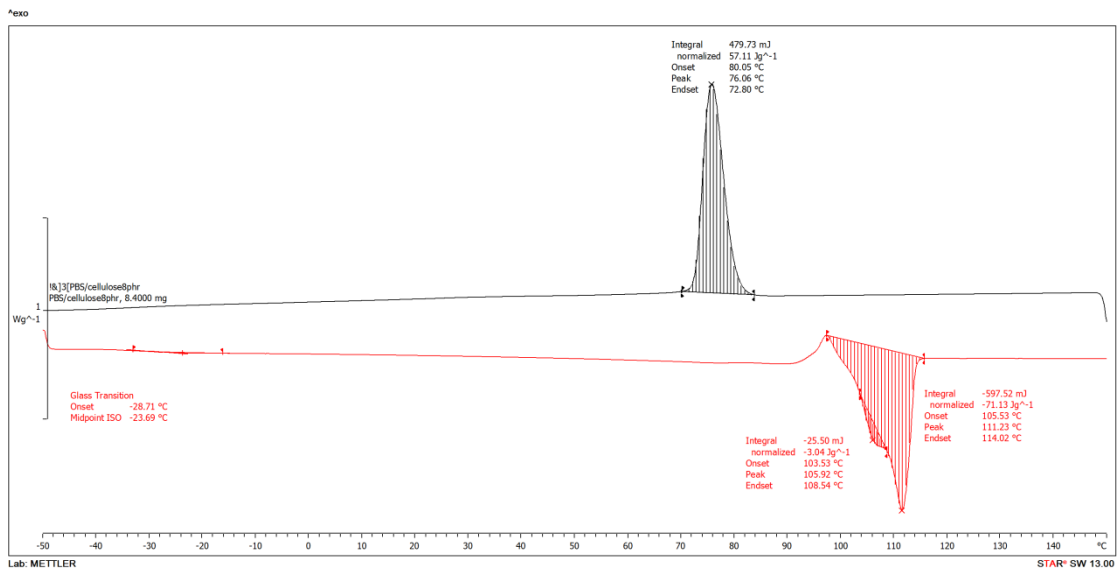
รูปที่ ง-9 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

10. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



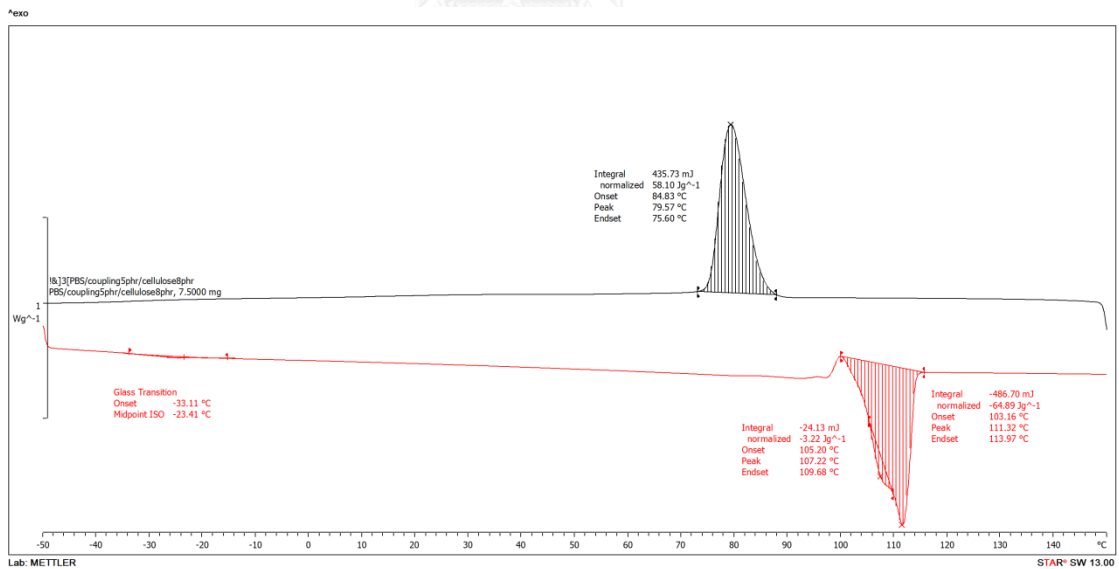
รูปที่ ง-10 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 6 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

11. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr



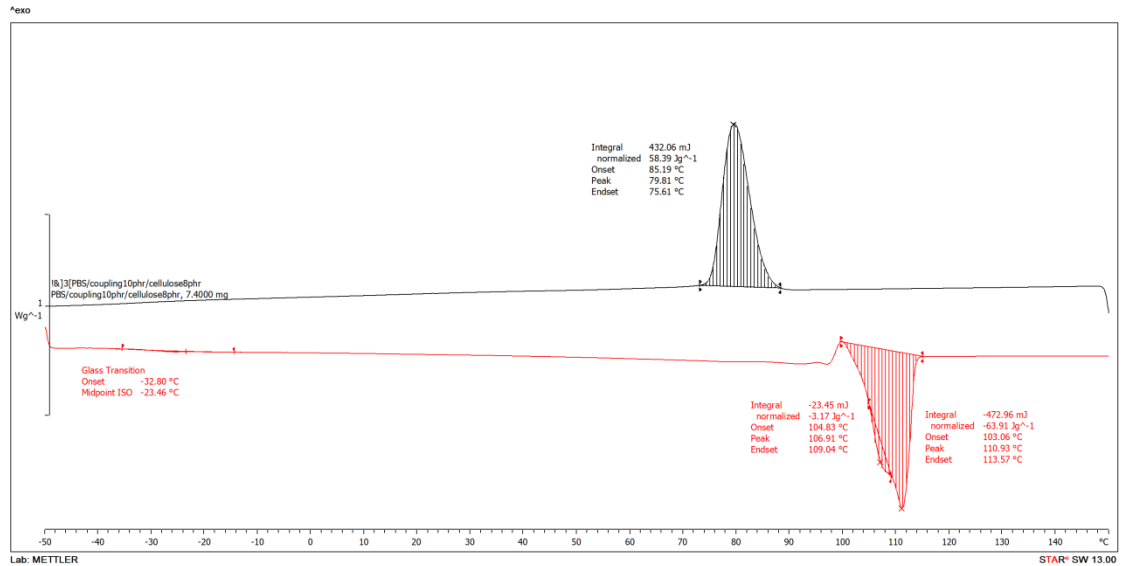
รูปที่ ง-11 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr

12. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



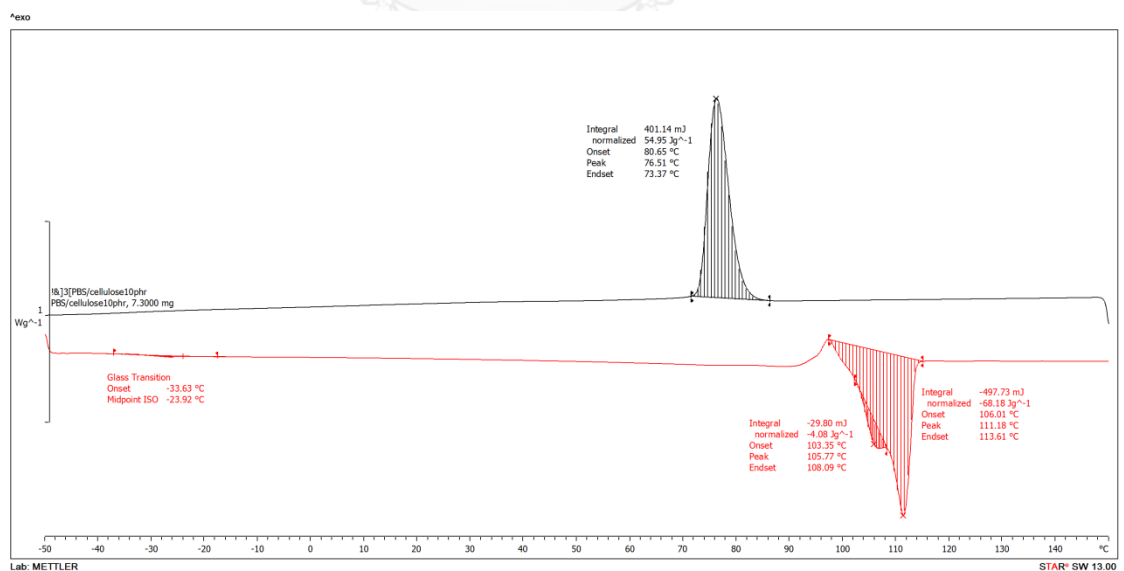
รูปที่ ง-12 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

13. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



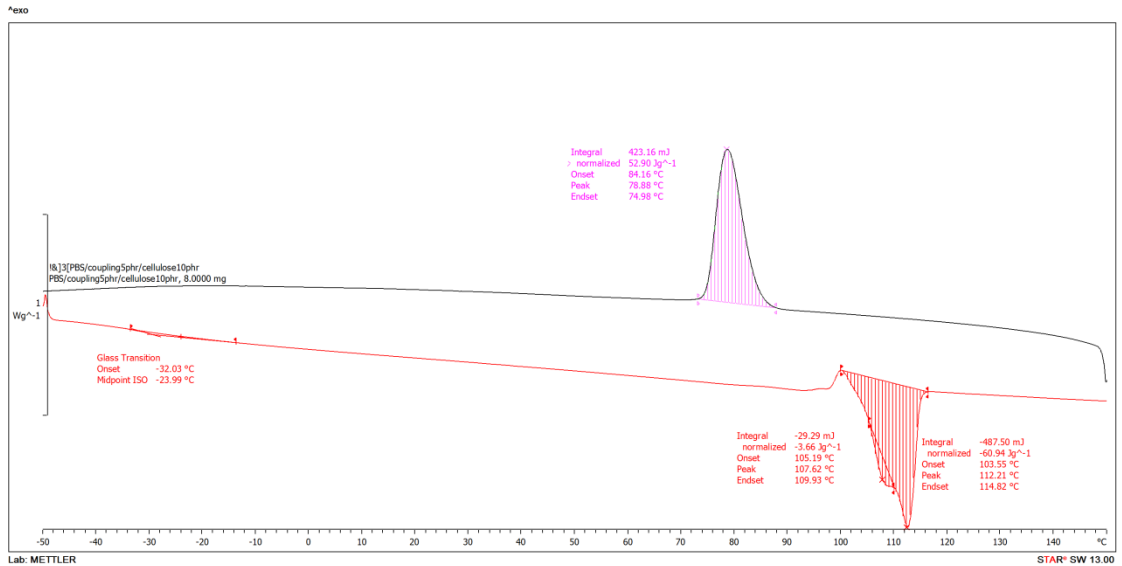
รูปที่ ง-13 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 8 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

14. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr



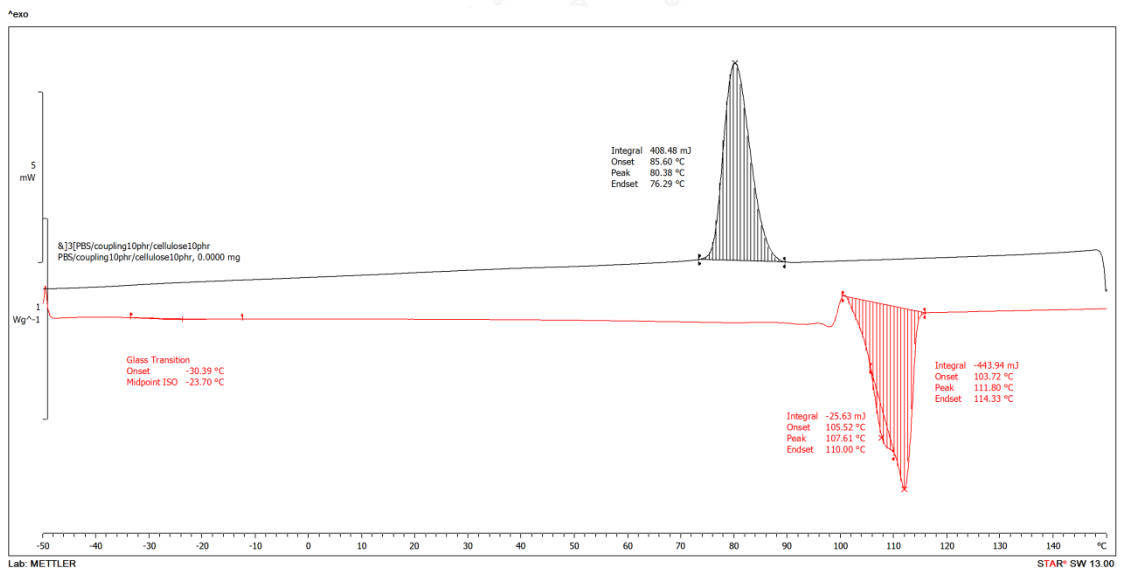
รูปที่ ง-14 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr

15. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



รูปที่ ง-15 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr

16. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr



รูปที่ ง-16 เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอลฟาเซลลูโลส 10 phr และใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุภชัย ลิประพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 เมษายน พ.ศ.2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2553 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคต้นในปีการศึกษา 2554 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลาย ปีการศึกษา 2557 (กรกฎาคม 2558)

