พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตฟิล์มที่เสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต

นางสาวนันทภรณ์ แสงวิรุณ

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 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/SILICA COMPOSITE FILMS COMPATIBILIZED WITH GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE)

Miss Nanthaporn Sangviroon

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตฟิล์มที่เสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต
โดย	นางสาวนันทภรณ์ แสงวิรุณ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกูลกิจ)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นันทภรณ์ แสงวิรุณ : พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตฟิล์มที่เสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/SILICA COMPOSITE FILMS COMPATIBILIZED WITH GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตให้เหมาะกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์มากยิ่งขึ้น งานวิจัยเริ่มจากการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตผ่านเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เพื่อใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้สำหรับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต จากนั้นวิเคราะห์ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อยืนยันผลของการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซักซิเนต ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตลงบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตได้ จากนั้นนำสารเสริมสภาพเข้ากันได้ดังกล่าวมาเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต โดยใช้ซิลิกาในปริมาณสัดส่วนต่างๆ เป็นตัวเติมเสริมแรง ผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม เมื่อนำฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนพบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาในฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้น ความทนแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความทนแรงฉีกขาดมีค่าลดลง และเมื่อผสมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้พบว่ามีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ อีกทั้งยังพบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ผสมไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไปช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและซิลิกา ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบสัณฐานวิทยา ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่านอกจากซิลิกาจะสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิตแล้วยังช่วยปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้อีกด้วย นอกจากนี้ฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต ....

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

5671999623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEYWORDS:

NANTHAPORN SANGVIROON: POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/SILICA COMPOSITE FILMS COMPATIBILIZED WITH GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE). ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 115 pp.

This research focuses on improving properties of bioplastic films from poly(butylene succinate) (PBS) for packaging. Initially, the modification of poly(butylene succinate) was carried out by the reactive melt-grafting with glycidyl methacrylate in a twin-screw extruder. The obtained glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate) (PBS-*g*-GMA) was analyzed by the FTIR technique which affirmatively confirms the presence of glycidyl methacrylate on poly(butylene succinate) chains. After that, PBS-*g*-GMA has been used as a compatibilizer for preparing poly(butylene succinate) composites filled with silica at various ratios as a reinforcement. The composites were then processed into films by a chill roll cast extruder. The effects of compatibilizer and silica loading on the properties of the prepared films were investigated. The results indicated that, the tensile strength, elongation at break and tear strength decreased with the increasing amount of silica. When the PBS-*g*-GMA was incorporated, the mechanical properties of composite films were higher than those of the composite films without PBS-*g*-GMA, especially the composite films with compatibilizer and silica at respectively 5 and 1 % wt were slightly higher than that of neat PBS film indicating the improved interfacial interaction between silica particles and PBS matrix. The results were in agreement with the morphological study. In addition, silica enhanced mechanical properties as well as water and oxygen barrier properties of the composite films. Furthermore, the thermal stability of the prepared composite films were higher than that of neat PBS film.

Field of Study:	Petrochemistry and	Student's Signature	....
	Polymer Science	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งการให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การสนับสนุนเงินทุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนถึงการดูแลเอาใจใส่และเสียสละเวลาในการตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกูลกิจ และรองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำแนะนำต่างๆแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.................... จ

กิตติกรรมประกาศ.................... ฉ

สารบัญ.................... ช

สารบัญตาราง.................... ฐ

สารบัญรูปภาพ....................ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.................... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.................... 2

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.................... 3

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.................... 3

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามแหล่งวัตถุดิบ.................... 3

2.1.2 แนวโน้มอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในไทย.................... 4

2.2 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต.................... 5

2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต 5

2.2.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต 6

2.2.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต 7

2.2.4 การนำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตไปใช้ประโยชน์ 7

2.3 วัสดุคอมพอสิต.................... 8

2.3.1 เมทริกซ์ 8

2.3.2 ตัวเติม 9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.4 ซิลิกา ... 11
2.4.1. ซิลิกาธรรมชาติ ... 11
2.4.2. ซิลิกาสังเคราะห์ ... 11
2.5 ความสามารถเข้ากันได้ ... 12
2.5.1 การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ... 13
2.5.2 การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ... 13
2.6 พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ... 15
2.6.1 พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ... 17
2.7 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน ... 18
2.7.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยกระบวนการอัดรีด ... 18
2.7.2 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีดฟิล์มพลาสติก ... 21
2.8 ฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติก ... 22
2.8.1 ความแตกต่างระหว่างฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติก ... 23
2.9 บรรจุภัณฑ์แอกทีฟ ... 24
2.9.1 เทคโนโลยีที่ใช้กับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ ... 24
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 26
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย ... 30
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินการทดลอง ... 30
3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ... 30
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ... 31
3.4 ขั้นตอนการทดลอง ... 33
3.4.1 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ... 33
3.4.1.1 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ... 33

หน้า

3.4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยวิธีการไทเทรต 35
3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ 37
3.4.3 การเตรียมฟิล์มคอมพอสิต 39
3.5 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต 40
3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของอนุภาคซิลิกา 40
3.5.1.1 วิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลิกา 40
3.5.1.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา 40
3.5.1.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา 41
3.5.2 การวิเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 42
3.5.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต 42
3.5.3.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม 42
3.5.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างภายใต้ความร้อน 43
3.5.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี 44
3.5.3.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง 45
3.5.3.5 การทดสอบความทนแรงฉีกขาด 46
3.5.3.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ 46
3.5.3.7 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน 47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 48
4.1 สมบัติของซิลิกา 48
4.1.1 ขนาดอนุภาคซิลิกา 48
4.1.2 พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา 48
4.1.3 โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.1.4 สัณฐานวิทยาของซิลิกา ... 49

4.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ... 50

4.2.1 การตรวจสอบปริมาณพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการไทเทรต ... 50

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ... 52

4.3 สมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 53

4.3.1 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 53

4.3.2 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 56

4.3.2.1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 56

4.3.2.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 58

4.3.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 62

4.3.3.1 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 62

4.3.3.2 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 65

4.3.3.3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 67

4.3.3.4 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 69

4.3.3.5 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร ... 72

4.3.4 การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ... 74

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 77
5.1 สรุปผลการทดลอง 77
5.2 ข้อเสนอแนะ 78
รายการอ้างอิง 79
ภาคผนวก ก ขนาดอนุภาคซิลิกา 86
ภาคผนวก ข ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต 88
ภาคผนวก ค TGA Thermogram 89
ภาคผนวก ง DSC Thermogram 95
ภาคผนวก จ สมบัติเชิงกล 107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 115

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 35

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 35

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพาวนด์ 38

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการผสมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ 38

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม 39

ตารางที่ 4.1 ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนต 51

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต 56

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต 58

ตารางที่ 4.4 ความทนแรงดึง ยังส์มอดุลัส และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร 72

ตารางที่ 4.5 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร 73

ตารางที่ 4.6 การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต 5

รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต 5

รูปที่ 2.3 สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตพอลิบิวทิลีนซักซิเนต........ 6

รูปที่ 2.4 วงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 7

รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของตัวเติมเสริมแรง 9

รูปที่ 2.6 วัสดุคอมพอสิตตามลักษณะของตัวเติมเสริมแรง 10

รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์พรีซิพิเทตซิลิกาและฟูมซิลิกา........ 11

รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิโอเลฟินส์........ 14

รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลต 15

รูปที่ 2.10 แนวทางการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตกับพอลิเมอร์ผ่านการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์และการเปิดวงแหวนอิพ็อกไซด์ 16

รูปที่ 2.11 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต........ 17

รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 17

รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด 19

รูปที่ 2.14 ส่วนต่างๆ ของสกรูของเครื่องอัดรีด........ 20

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสกรูแบบต่างๆ 20

รูปที่ 2.16 การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก........ 22

รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28 34

รูปที่ 3.2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของ Labtech Engineering รุ่น LZ-80/VS........ 34

รูปที่ 3.3 การรีฟลักซ์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 36

รูปที่ 3.4 เครื่องรีดหล่อฟิล์มของ Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX 39

Chulalongkorn University

หน้า

รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลิกาของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 40

รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวอนุภาคของ Microtrac รุ่น BELSORP-mini II 41

รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Bruker รุ่น D8 Advance 41

รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของ Thermo sciencetific .. 42

รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL รุ่น JSM-6400LV 43

รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^{e}... 43

รูปที่ 3.11 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR^{e} 44

รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของ LLOYD รุ่น LR100K... 45

รูปที่ 3.13 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง 45

รูปที่ 3.14 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบความทนแรงฉีกขาด.. 46

รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ MOCON รุ่น PERMATRAN-W®3/33............ 46

รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของ SYSTECH Illinois รุ่น 8000 47

รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิกา 48

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา.. 49

รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกา 50

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงปริมาณการกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนต 50

รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต กราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 52

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และ พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต.. 53

รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกับซิลิกา............. 55

รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกา คอมพอสิต.. 57

หน้า

รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.......... 62

รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร 63

รูปที่ 4.11 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.......... 65

รูปที่ 4.12 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร 66

รูปที่ 4.13 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.......... 67

รูปที่ 4.14 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.......... 68

รูปที่ 4.15 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.......... 70

รูปที่ 4.16 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สิ่งอำนวยความสะดวกและสภาพการดำเนินชีวิตในปัจจุบันทำให้ปริมาณความต้องการใช้งานพลาสติกมีเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มพลาสติกบรรจุภัณฑ์ ซึ่งล้วนสังเคราะห์มาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม แต่ปัจจุบันแหล่งวัตถุดิบดังกล่าวมีปริมาณลดลง อีกทั้งพลาสติกจากปิโตรเลียมมักสลายตัวด้วยกระบวนการทางธรรมชาติได้ยาก เป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกสะสมส่งผลเสียต่อคนและสิ่งแวดล้อม การคิดค้นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่อการอนุรักษ์ด้านสิ่งแวดล้อม

พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่น่าสนใจ เพราะสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและทนทานต่อสารเคมี แต่พอลิบิวทิลีนซักซิเนตยังไม่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเท่าที่ควร เนื่องจากมีสมบัติบางประการที่ยังไม่เหมาะนำไปใช้งาน อีกทั้งยังมีราคาแพงกว่าพอลิเมอร์อื่นที่มีการใช้งานทั่วไป ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาพอลิบิวทิลีนซักซิเนตไปผสมกับตัวเติม เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) แป้ง (starch) ซิลิกา (silica) เป็นต้น เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตให้ดีขึ้น แต่เนื่องจากตัวเติมที่เติมลงไปนั้นมีสภาพขั้วที่แตกต่างกันกับพอลิเมอร์มาก ตัวเติมดังกล่าวจึงมักเกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์มากขึ้น โดยเตรียมเป็นฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตแล้วใช้ซิลิกาเป็นตัวเติมเสริมแรง มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติมเสริมแรง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของฟิล์มดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาฟิล์มคอมพอสิตโดยใช้พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

1.2.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยซิลิกาที่มีสมบัติที่ดีขึ้น สามารถประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น [1]

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามแหล่งวัตถุดิบ

2.1.1.1 แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม คือ วัตถุดิบที่มาจากน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) พอลิคาร์โปแล็กโทน (polycaprolactone) พอลิบิวทิแอดิเพตโคเทเรฟแทเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate)) เป็นต้น แหล่งวัตถุดิบประเภทนี้นอกจากจะใช้แล้วหมดไป กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2.1.1.2 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ คือ วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ สามารถหาหรือปลูกทดแทนใหม่ได้ (renewable resource) ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวสาลี ปาล์ม เป็นต้น ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ เช่น พอลิบิวทิลีนซักซิเนต พอลิแล็กทิกแอซิด (poly(lactic acid)) เป็นต้น แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ถือเป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตพลาสติกเพื่อลดการใช้วัตถุดิบ จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมลง นอกจากสามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัตถุดิบแล้วยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย [2]

2.1.2 แนวโน้มอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในไทย

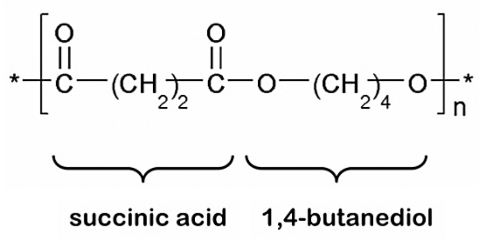
พลาสติกที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบันผลิตจากน้ำมันหรือก๊าซ ซึ่งแหล่งที่มาและการเกิดของน้ำมันและก๊าซมีกระบวนการที่ยาวนานหลายพันล้านปี อัตราการนำมาใช้ในปัจจุบันทำให้น้ำมันหมดไปในเร็ววัน มีผลทำให้ราคาน้ำมันโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นรวมทั้งส่งผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งแวดล้อม จากกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั่วโลกส่งผลให้ผู้ประกอบการ ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ตลอดจนผู้บริโภคทั่วไป ได้เริ่มปรับตัวไปสู่การดำเนินกิจการและการดำเนินชีวิตที่คำนึงถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมพลาสติกที่ “พลาสติกชีวภาพ” ได้เริ่มเป็นที่กล่าวถึงกันมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องด้วยความสามารถพิเศษที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้หรือการใช้พืชผลทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พลาสติกชีวภาพกลายเป็นนวัตกรรมด้านพลาสติกที่ตอบโจทย์การรักษาสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าพลาสติกชีวภาพจะมีลักษณะพิเศษที่โดดเด่นที่พลาสติกทั่วไปไม่มีแต่ด้านการผลิตและการบริโภคไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ต้นทุนราคาหรือแม้แต่ความพร้อมในการยอมรับของผู้บริโภคสุดท้ายยังคงเป็นอุปสรรคในการเติบโตของตลาดพลาสติกชีวภาพในปัจจุบัน

ประเทศไทยมีความพร้อมในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านพืชผลเกษตรกรรมที่จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าเกษตรจากเดิมที่ส่งออกในรูปวัตถุดิบหรือแปรรูปขั้นต้น ซึ่งมีราคาถูกและมีความผันผวนด้านราคา หากนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพจะสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพถือเป็นอุตสาหกรรมคลื่นลูกใหม่อันเป็นแนวโน้มความต้องการของโลกที่จะช่วยลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการใช้ทรัพยากรที่สามารถนำกลับมาใช้หรือสร้างใหม่ได้ ดังนั้นการสนับสนุนจากรัฐบาลในระยะเริ่มต้นจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดการลงทุนของอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ซึ่งในเบื้องต้นผลตอบแทนอาจยังไม่จูงใจต่อการลงทุนและใช้เวลานานในการคืนทุน หากไม่มีการทำงานร่วมกันระหว่างหน่วยงานรัฐและภาคเอกชน อาจทำให้ประเทศไทยสูญเสียโอกาสการเป็นศูนย์กลางด้านอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในภูมิภาคอาเซียน ซึ่งจะนำไปสู่การเป็นศูนย์กลางด้านอุตสาหกรรมเคมีชีวภาพในอนาคต ซึ่งจะครอบคลุมธุรกิจอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ที่กว้างและมีมูลค่ามากกว่า เช่น เครื่องสำอาง ยารักษาโรค สารอาหารเพื่อสุขภาพ เป็นต้น [3]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต

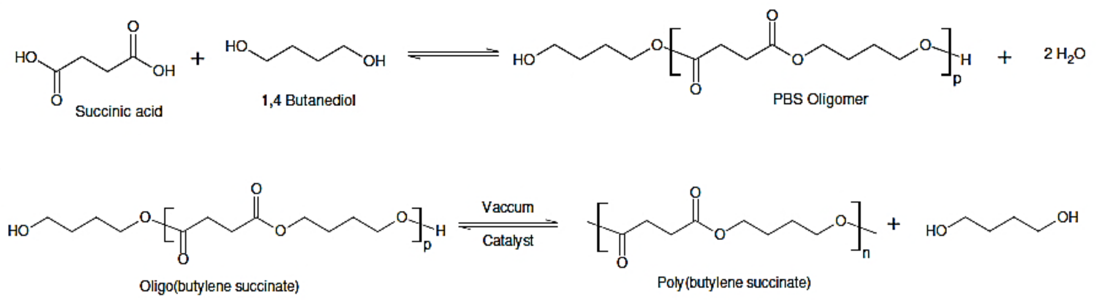
พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นแอลิแฟติกพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีโครงสร้างเป็นกึ่งอสัณฐาน (semicrystalline) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ [2]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

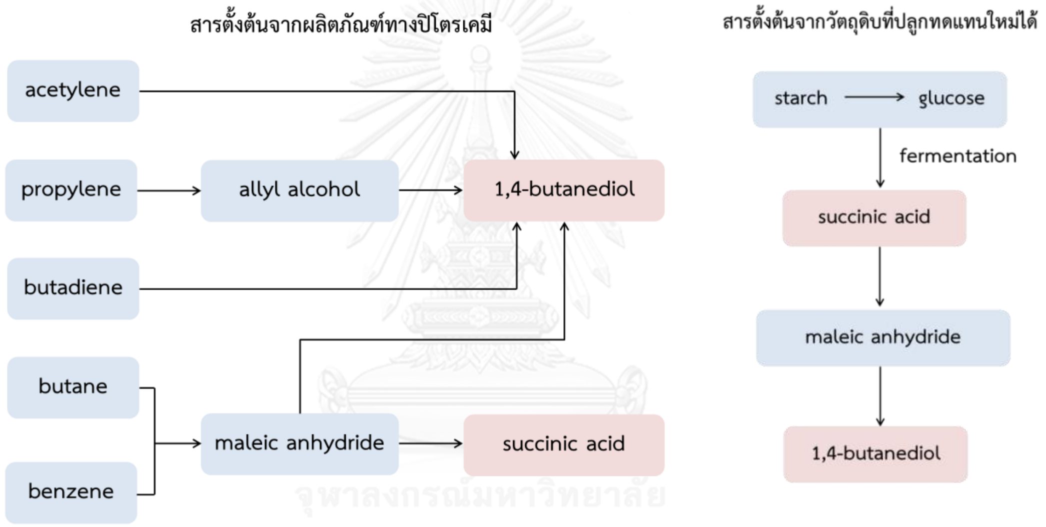
2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต

พอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของมอนอเมอร์สองชนิด คือ กรดซักซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ซึ่งจะได้เป็นโอลิโกเมอร์ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต จากนั้นโอลิโกเมอร์ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพอลิบิวทิลีนซักซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งปัจจุบันการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยวิธีการนี้กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต [4]

ปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้สามารถสังเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและจากวัตถุดิบที่ปลูกใหม่ทดแทนได้ สำหรับการผลิตจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีนั้น เริ่มจากก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดซักซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลต่อไป อย่างไรก็ตาม กรดซักซินิกยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกใหม่ทดแทนได้โดยผ่านกระบวนการหมัก นอกจากนี้กรดซักซินิกที่ได้ยังสามารถเป็น สารตั้งต้นในการผลิต 1,4-บิวเทนไดออลได้ โดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกไฮไดรด์ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากนั้นนำมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดคือกรดซักซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออล มาทำปฏิกิริยาการควบแน่น ซึ่งจะเกิดการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต



รูปที่ 2.3 สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

2.2.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

พอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิแล็กทิกแอซิด มีอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกประมาณ 112-116 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำมาก โดยทั่วไปแล้วพอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียสโดยไม่เสียสภาพ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ทนทานต่อสารเคมี และย้อมติดสีได้ดีอีกด้วย

2.2.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

กระบวนการย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการ hydro-biodegradable เริ่มต้นจากการย่อยสลายทางชีวภาพผ่านกลไกปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยน้ำจะไปทำปฏิกิริยาที่พันธะเอสเทอร์ เมื่อพันธะเกิดการแตกจะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตลดลง จากนั้นจุลินทรีย์จึงทำการย่อยสลายต่อไปได้ หากมีการย่อยสลายที่สมบูรณ์จะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้สังเคราะห์แสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ระยะเวลาในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำในดิน การถ่ายเทอากาศในดิน ปริมาณธาตุอาหารในดินที่มีส่วนช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันก็ใช้เวลาในการย่อยสลายแตกต่างกันด้วย [5]

รูปที่ 2.4 วงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.2.4 การนำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตไปใช้ประโยชน์

พอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถนำไปใช้แทนที่พอลิโพรพิลีน (polypropylene) และพอลิเอทิลีนแทเรฟแทเลต (polyethylene terephthalate) ได้ พอลิบิวทิลีนซักซิเนตถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้งจำพวก ช้อน ส้อม แก้วน้ำ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น

2.3 วัสดุคอมพอสิต

วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมพอสิต (composite materials) หมายถึงวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ วัสดุคอมพอสิตจะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลักหรือเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) และวัสดุที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก เรียกว่า ตัวเติมเสริมแรง (reinforcement) [6]

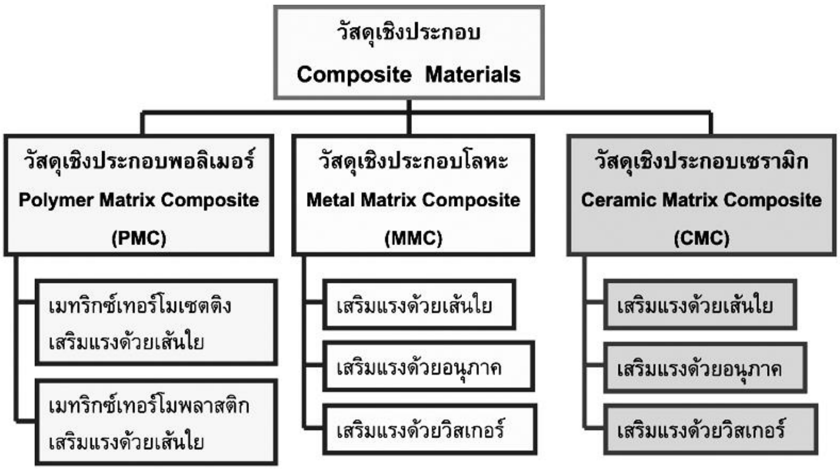
2.3.1 เมทริกซ์

เมทริกซ์ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวเติมเสริมแรงและทำให้วัสดุคอมพอสิตเป็นรูปร่างขึ้น โดยทั่วไปแล้วเมทริกซมักจะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรงและยังส์มอดุลัสต่ำกว่าตัวเติมเสริมแรง เมทริกซ์ที่ดีควรสามารถถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่ตัวเติมเสริมแรงของวัสดุคอมพอสิตได้ ดังนั้นถ้าจำแนกวัสดุคอมพอสิตตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ได้แก่

2.3.1.1 วัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (polymer matrix composite) โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว พอลิเมอร์จึงมีความแข็งแรงไม่สูงนัก การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมตัวเติมเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น สมบัติที่ได้จะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์และสมบัติของตัวเติมเสริมแรงประกอบกัน ทำให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยได้เป็นเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix) ตามพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์

2.3.1.2 วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ (metal matrix composite) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้นโดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เป็นเมทริกซ์โลหะ อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงและมีน้ำหนักมาก

2.3.1.3 วัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramic matrix composite) มักใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญ คือ เปราะและแตกหักง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใส่ตัวเติมเสริมแรงเข้าไปเพื่อให้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูง



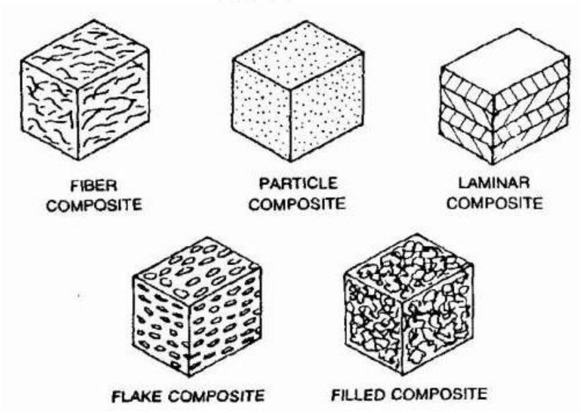
รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของตัวเติมเสริมแรง

2.3.2 ตัวเติม

ตัวเติม (filler) เป็นสารที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนหรือปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ตัวเติมที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งตัวเติมอินทรีย์ (organic filler) เช่น แป้ง ผงไม้ (wood flour) และตัวเติมอนินทรีย์ (inorganic filler) เช่น ผงเขม่าดำ (carbon black) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ทัลก์ (talc) เป็นต้น

สำหรับตัวเติมที่ใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตเป็นหลัก เรียกว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extender หรือ inert filler) การใส่ตัวเติมประเภทนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย และเรียกตัวเติมที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนแรงดึงว่าตัวเติมเสริมแรง การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลจะมากหรือน้อยนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเติมที่เติมลงไปแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาค ความพรุนและรูปร่างของอนุภาค ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิวของอนุภาคและสารเจือปนที่อยู่ในตัวเติมอีกด้วย [7]

ตัวเติมเสริมแรงมีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แผ่นบาง (flake) ชั้น (laminar) อนุภาค (particle) เม็ดขนาดใหญ่ (filler) เส้นใย (fiber) วิสเกอร์ (whisker) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) หากอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกตัวเติมเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใย ซึ่งมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะรามีด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น ส่วนวิสเกอร์เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 วัสดุคอมพอสิตตามลักษณะของตัวเติมเสริมแรง [8]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การเติมตัวเติมเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ดังต่อไปนี้

- ความทนแรงอัด (compressive strength) ความทนแรงเฉือน (shear strength) ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) อิลาสติกมอดุลัส (elastic modulus) ความแข็งตึง (hardness) และอุณหภูมิการดัดโค้ง (heat deflection temperature) เพิ่มขึ้น

- ความทนแรงกระแทก (impact strength) เพิ่มขึ้นบางส่วน

- การหดตัว (shrinkage) และสมบัติเชิงกลขึ้นกับอุณหภูมิน้อยลง

2.4 ซิลิกา

2.4.1. ซิลิกาธรรมชาติ

ซิลิกาธรรมชาติ (natural silica) มีหลากหลายแหล่งด้วยกัน เช่น ทราย (sand) ควอร์ตซ์ (quartz) ไดอะตอมเอเชียสเอิร์ต (diatomaceous earth) ขี้เถ้าจากแกลบ (rice hall ash) เป็นต้น ซึ่งซิลิกาแต่ละชนิดมีความแข็ง ปริมาณผลึก ขนาดของผลึกที่แตกต่างกัน ก่อนนำซิลิกาไปใช้เป็นตัวเติมหรือตัวเติมเสริมแรงในพอลิเมอร์จำเป็นต้องนำซิลิกาเหล่านี้ไปบดจนมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1-10 ไมโครเมตร และเพื่อให้ซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์จำเป็นต้องมีการปรับแต่งพื้นผิวของซิลิกาก่อนนำไปใช้งาน [7]

2.4.2. ซิลิกาสังเคราะห์

ซิลิกาสังเคราะห์ (synthetic silica) สามารถเตรียมได้จากการนำเอาซิลิกาไฮโดรเจล (hydrogel) มาขจัดน้ำ ซิลิกาที่ได้เรียกว่าพรีซิพิเทตซิลิกา (precipitated silica) ซึ่งมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.02-0.1 ไมโครเมตร นอกจากนี้อาจเตรียมซิลิกาสังเคราะห์ได้จากการเผาซิลิกอนเตตระคลอไรด์ ($SiCl_4$) ที่อุณหภูมิสูงพร้อมทั้งเป่าอากาศและไฮโดรเจนเข้าไปด้วย ซิลิกาที่ได้เรียกว่าฟูมซิลิกา (fumed silica หรือ pyrogenic silica) ซึ่งมีอนุภาคที่ละเอียดมาก ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.007-0.05 ไมโครเมตร [7] การสังเคราะห์พรีซิพิเทตซิลิกาและฟูมซิลิกาแสดงในรูปที่ 2.7

Precipitated silica $$Na_2Si_3O_7 + H_2SO_4 \longrightarrow 3SiO_2 + Na_2SO_4 + H_2O$$

Fumed silica $$SiCl_4 + 2H_2 + O_2 \xrightarrow{\text{reaction} > 1500\,^{\circ}C} SiO_2 + 4HCl$$

รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์พรีซิพิเทตซิลิกาและฟูมซิลิกา [9, 10]

เมื่อนำอนุภาคซิลิกามาใช้กับพอลิเมอร์ พรีซิพิเทตซิลิกาจะเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางรูปร่างที่อุณหภูมิสูง ช่วยลดการหดตัวและการเกิดรอยแตก และช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน (scratch resistance) นอกจากนี้พรีซิพิเทตซิลิกายังใช้เป็นสารกันติดและสารทำให้ลื่น (release agent) ได้อีกด้วย เนื่องจากฟูมซิลิกามีราคาสูงเมื่อเทียบกับ

ราคาของพลาสติกส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงไม่นิยมนำฟูมซิลิกามาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรง และจากการที่ฟูมซิลิกามีอนุภาคที่ละเอียดมากจึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นสารข้น (thickening agent) หรือสารทิกโซโทรปี (thixotropy agent) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเกิดเจลในของเหลวหรือวัสดุกึ่งของเหลวที่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ กล่าวคือ เมื่อปล่อยของเหลวทิ้งไว้จะกลายเป็นเจล และเจลที่เกิดขึ้นสามารถทำลายได้ง่ายโดยการกวน การเขย่า หรือให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นฟูมซิลิกาจึงเหมาะกับการนำไปใช้กับพลาสติกที่การขึ้นรูปหรือการใช้งานที่จำเป็นต้องให้ความหนืดของระบบสูง

เนื่องจากอนุภาคซิลิกามีความเป็นขั้วที่ค่อนข้างสูง เพราะที่ผิวของอนุภาคซิลิกามีหมู่ไซลานอล (silanol group, Si-OH) เป็นจำนวนมาก ทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) สูง เป็นเหตุทำให้อนุภาคซิลิกาเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อน (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) นอกจากนี้อนุภาคซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น (agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) จากการที่อนุภาคซิลิกามีความเป็นขั้วที่แตกต่างกับพอลิเมอร์มาก ทำให้อนุภาคซิลิกากระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์และขัดขวางการเจริญเติบโตของผลึก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงลดลง [11]

การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเติมเสริมแรง (interfacial strength) [12] เพื่อให้แรงที่ได้รับจากภายนอกสามารถเกิดการถ่ายโอนจากเมทริกซ์ผ่านผิวสัมผัสมายังตัวเติมเสริมแรงได้ ทำให้สมบัติของคอมพอสิตดีขึ้น

2.5 ความสามารถเข้ากันได้

การนำสารต่างชนิดกันมาผสมกันเพื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการนั้นส่วนใหญ่จะมีสมบัติต่ำลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเปราะและไม่แข็งแรง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของเมทริกซ์กับตัวเติมต่ำ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นความสามารถเข้ากันได้ (compatibility) ของสารที่นำมาผสมกันจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา [13]

2.5.1 การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง

การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง (non-reactive blending) เป็นการใช้เครื่องมือ เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) หรือเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill) มาช่วยในการช่วยผสม ซึ่งเครื่องมือประเภทนี้ทำให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสม แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้สารที่นำมาผสมกันเกิดการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การผสมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.5.2 การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง

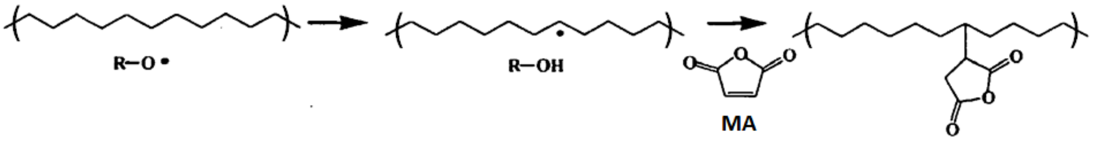
การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง (reactive blending) สารที่นำมาผสมจำเป็นต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ เช่น การผสมพอลิเอสเทอร์กับพอลิเอไมด์ การผสมพอลิสไตรีนกับพอลิโพรพิลีนออกไซด์ เป็นต้น เทคนิคที่ใช้ผสมมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องมีด้วยกันหลายวิธี เช่น

2.5.2.1 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (addition of block or graft copolymer) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ โดยโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการผสมเป็นอย่างมาก จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง สามารถสรุปได้ดังนี้

- บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
- ไดบล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
- ไดบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกสายสั้นสลับยาวจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2.5.2.2 การเติมสารที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (addition of functional/reactive polymer) การเติมพอลิเมอร์หรือสารที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ อาจได้จากการนำสารชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะโคเวเลนต์หรือพันธะไออนิกกับสารอีกชนิดได้ ซึ่งการดัดแปรพอลิเมอร์หรือสารให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือผ่านเครื่องอัดรีด เช่น การกราฟต์มาเลอิก

แอนไฮไดรด์บนสายโซ่ตรงของพอลิโอเลฟินส์ โดยอนุมูลอิสระบนสายโซ่ตรงของพอลิโอเลฟินส์สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่แอนไฮไดรด์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนั้นพอลิโอเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จึงเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่ได้รับความนิยมทางการค้าเพราะสามารถทำได้ง่ายอีกทั้งยังมีราคาไม่แพง



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิโอเลฟินส์

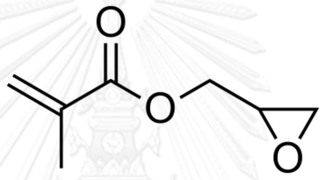
การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมพอสิตจะช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสในภาวะหลอมเหลว ทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กและสามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงระหว่างเฟส

2.5.2.3 การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างการผสม (*in -situ* grafting copolymerization) เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ผสมสารหรือพอลิเมอร์ให้เข้ากัน โดยแตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือองค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารหรือพอลิเมอร์อีกชนิดได้โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ เช่น การผสมพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจมีได้ ดังนี้

- เกิดการกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (initiator) ในระหว่างการผสม
- เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ส่วนใหญ่เกิดกับพอลิเมอร์แบบควบแน่น
- เกิดการขาดหรือรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุลเพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่มีความเค้นเฉือนสูง
- ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

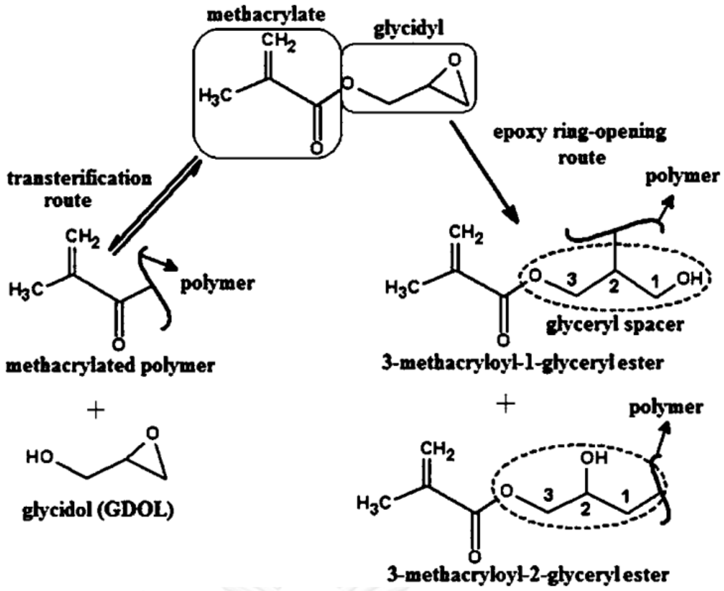
2.6 พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

ไกลซิดิลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) เป็นสารโมเลกุลเล็ก ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันสองชนิดในโครงสร้างโมเลกุล คือ พันธะคู่ ซึ่งสามารถกราฟต์ลงบนพอลิเมอร์โดยผ่านการทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระได้ และหมู่อิพ็อกไซด์ที่มีความเป็นอิเล็กโทรไฟล์ (electrophile) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นนิวคลีโอไฟล์ (nucleophile) ได้ เช่น หมู่เอมีน หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิล [15, 16] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นไกลซิดิลเมทาคริเลตจึงได้รับความนิยมในการใช้เป็นสารปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีในพอลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ รวมทั้งการใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (reactive compatibilizer) ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมพอสิต



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลต

สำหรับกลไกการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) หรือหมู่แอลกอฮอล์ (-OH) ของพอลิเมอร์กับไกลซิดิลเมทาคริเลต ซึ่งจะเกิดได้ด้วยสองแนวทางหลัก คือ การเกิดปฏิกิริยาผ่านการเปิดวงแหวนอิพ็อกไซด์ (epoxide ring-opening) และการเกิดปฏิกิริยาผ่านการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ (transesterification) [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยมีความเป็นกรด-เบส (pH) ของระบบเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมทิศทางในการเกิดปฏิกิริยา

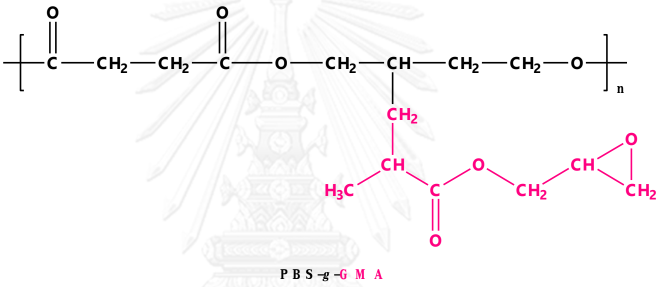


รูปที่ 2.10 แนวทางการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตกับพอลิเมอร์ผ่านการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์และการเปิดวงแหวนอิพ็อกไซด์

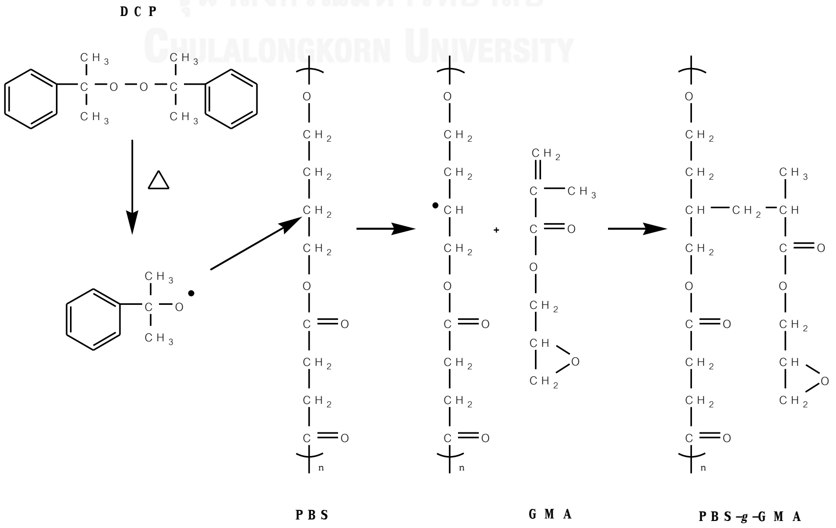
โดยทั่วไปแล้วพบว่าปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น คือ การเกิดปฏิกิริยาผ่านการเปิดวงแหวนอิพ็อกไซด์ [18] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Al-Malaika และคณะได้กล่าวว่า [19] โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลตบนสายโซ่พอลิเมอร์จะค่อนข้างต่ำ สำหรับระบบที่ไม่มีตัวเร่งหรือตัวริเริ่มให้เกิดปฏิกิริยา เนื่องจากไกลซิดิลเมทาคริเลตมีขนาดใหญ่และไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากจะไม่ส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาบนสายโซ่พอลิเมอร์แล้ว ยังอาจมีโอกาสก่อให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งได้แก่การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ของไกลซิดิลเมทาคริเลต (poly(glycidyl methacrylate), pGMA) ทั้งนี้ประสิทธิภาพและทิศทางในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการผสมหลอมเหลวเป็นหลัก โดยมีปัจจัยควบคุมหลายประการ เช่น อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการผสมหลอมเหลว การมีตัวเร่งหรือตัวริเริ่มให้เกิดปฏิกิริยาในระบบ ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไกลซิดิลเมทาคริเลตกับหมู่ที่ว่องไว (active site) บนสายโซ่พอลิเมอร์

2.6.1 พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate grafted poly(butylene succinate), PBS-*g*-GMA) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.11 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้สามารถเตรียมได้หลายวิธี ทั้งการรีฟลักซ์ [20] และเตรียมผ่านกระบวนการหลอมเหลว [21] แต่ทั้งนี้งานวิจัยที่ทำการศึกษาสารเสริมสภาพเข้ากันได้ชนิดนี้ยังมีไม่มากนัก พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตสามารถเตรียมได้โดยนำไกลซิดิลเมทาคริเลตไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยการทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่พอลิบิวทิลีนซักซิเนต ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต



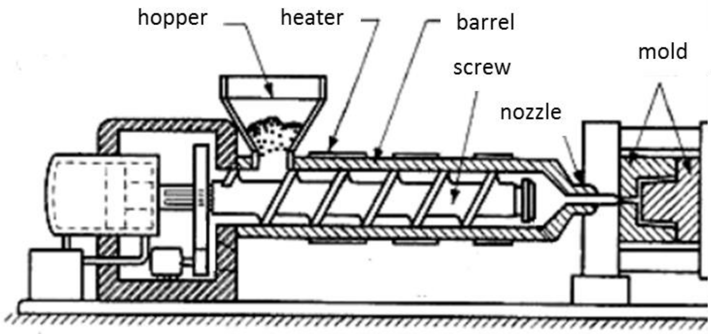
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต
(ดัดแปลงมาจาก [20])

2.7 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน

การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การพอลิเมอไรเซชันแบบอินซิทู (*in -situ* polymerization) วิธีการใช้สารละลาย (solution method) และวิธีการหลอมเหลว (melt method) [22] โดยในปัจจุบันนี้วิธีการหลอมเหลวเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตออกเป็น 2 แบบ คือ การผสมภายในแบบทีละชุด (internal batch mixer) ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ผสม เช่น เครื่องผสมระบบปิดแบบแบนบูรี (banbury internal mixer) และการผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing) ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ผสม เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) [23] งานวิจัยนี้เลือกเทคนิคการผสมแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่หรือเรียกเทคนิคนี้ว่าเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ (reactive extrusion) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถนำไปประยุกต์ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ อีกทั้งยังสะดวกและรวดเร็ว

2.7.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยกระบวนการอัดรีด

การอัดรีดเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติกเรียกว่าการคอมพาวนด์ (compounding) ซึ่งเป็นกระบวนการผสมแบบต่อเนื่องโดยทำการหลอมพลาสติกแล้วทำการอัดโดยการหมุนสกรูหรือโดยการดันลูกสูบ (piston) ให้พลาสติกหลอมไหลผ่านหัวดายที่มีรูปทรงตามต้องการ ชิ้นงานที่ถูกรีดออกมาอาจทำให้แข็งตัวด้วยการหล่อเย็นจะได้เป็นชิ้นงานสุดท้าย (finished products) หรืออาจนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปพลาสติกกระบวนการอื่นต่อจะได้เป็นชิ้นงานกึ่งสำเร็จ (semi-finished products) พลาสติกที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดอาจอยู่ในรูปผง (powder) หรือเม็ด (pellets) ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านกระบวนการอัดรีดมีหลากหลายรูปแบบ เช่น เส้นใย (fiber) ท่อขนาดเล็ก (tube) ท่อขนาดกลาง และใหญ่ (pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) หรือฟิล์ม (film) เป็นต้น ขึ้นอยู่กับรูปทรงของหัวดายที่ใช้ [24] ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด ดังแสดงในรูปที่ 2.13

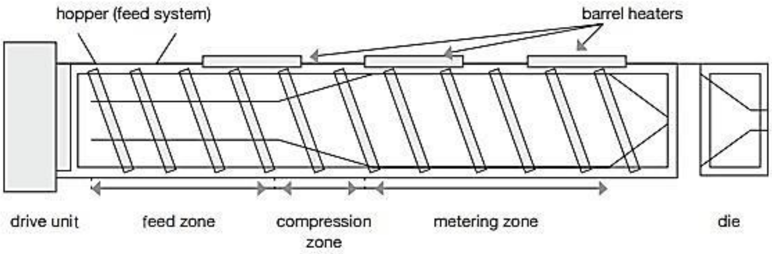


รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด [25]

2.7.1.1 กรวยเติมหรือส่วนป้อนพลาสติก (feed hopper) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เหนือส่วนต้นของเครื่องอัดรีด ทำหน้าที่เติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในบาร์เรล โดยเม็ดหรือผงพลาสติกจะตกลงบนเกลียวรีด เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

2.7.1.2 กระบอกหรือบาร์เรล (cylinder หรือ barrel) ทำหน้าที่บรรจุสกรูไว้ภายในและบาร์เรลถูกหุ้มด้วยแผ่นให้ความร้อนเป็นช่วงๆ เพื่อให้เม็ดหรือผงพลาสติกเกิดการหลอมตัวโดยรอบ บาร์เรลมีการใช้น้ำหล่อเย็นหรือพัดลมเป่าเพื่อควบคุมอุณหภูมิของพลาสติกให้เป็นตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ บาร์เรลของเครื่องอัดรีดทำมาจากวัสดุที่เป็นโลหะแข็งรูปทรงกระบอกที่สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตได้สูง นอกจากนี้มักมีการเคลือบผิวด้านในของบาร์เรลด้วยอัลลอยด์ของโลหะเพื่อให้ทนต่อการสึกกร่อน

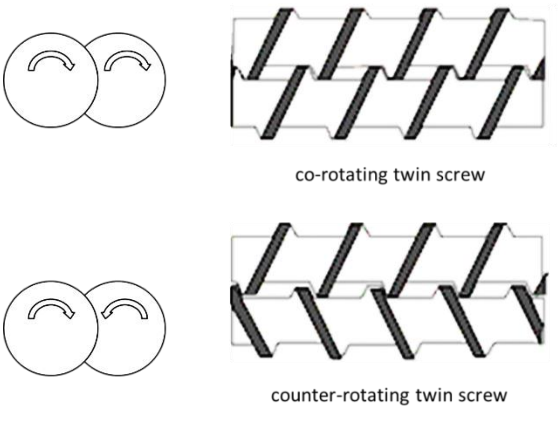
2.7.1.3 เกลียวรีดหรือสกรู (extrusion screw) สกรูมีหน้าที่หลัก คือ ผสมเม็ดหรือผงพลาสติกและสารต่างๆ เช่น สารเติมแต่ง สี เข้าด้วยกัน ทำให้พลาสติกหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะสร้างแรงดันที่เพียงพอเพื่อส่งพลาสติกหลอมไปยังส่วนอื่นๆ ของสกรูและส่งผ่านไปยังหัวดายได้ เพื่อให้สกรูสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีการออกแบบให้สกรูมีส่วนต่างๆ 3 ส่วน คือ ส่วนป้อน (feed zone) ส่วนหลอมอัด (compression zone) และส่วนส่งพลาสติกหลอม (metering หรือ melt pump zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ส่วนต่างๆ ของสกรูของเครื่องอัดรีด [26]

โดยส่วนป้อนเป็นส่วนที่มีความลึกของร่องป้อนมากที่สุด ทำหน้าที่ดึงเม็ดหรือผงพลาสติกจากกรวยเติมป้อนให้แก่ส่วนหลอมอัดที่มีความลึกของร่องป้อนน้อยลงอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากช่องว่างของปริมาตรลดลง พลาสติกที่อยู่ในส่วนนี้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นพลาสติกที่ออกมาจากส่วนนี้จะเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์และเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนส่งเป็นส่วนสุดท้ายของสกรู ทำหน้าที่ทำให้พลาสติกเป็นเนื้อเดียวกันและดันพลาสติกที่หลอมเหลวผ่านหัวดาย พลาสติกหลอมในส่วนนี้มีความดันสูงเนื่องจากมีร่องสกรูคงที่ ซึ่งลึกน้อยกว่าส่วนหลอมอัด

เครื่องอัดรีดที่มีหนึ่งสกรู เรียกว่า เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว นอกจากนี้ยังมีเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยสามารถแบ่งประเภทของสกรูได้ตามลักษณะการหมุนได้สองแบบ คือ แบบสกรูหมุนไปทางเดียวกัน (co-rotating) และแบบสกรูหมุนสวนทางกัน (counter-rotating) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 นอกจากนี้ยังมีเครื่องอัดรีดแบบหลายสกรู (multi screw extruder) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสกรู



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสกรูแบบต่างๆ [27]

ประสิทธิภาพในการขับดันของพลาสติกหลอมนั้นขึ้นอยู่กับระดับการขบของสกรู ซึ่งเมื่อมีการขบกันของสกรูมากจะทำให้ประสิทธิภาพในการขับดันของพลาสติกหลอมเพิ่มมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการผสมลดลง ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วเครื่องอัดรีดที่ใช้ในงานผสมและงานคอมพาวนด์นิยมใช้สกรูแบบขบกันที่มีความเร็วในการหมุนสูงและระดับของการขบกันต่ำ

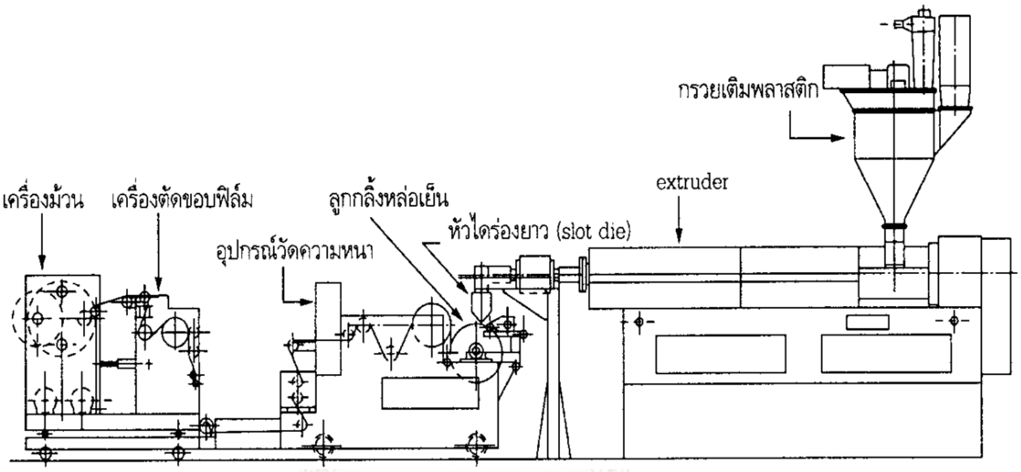
เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีข้อดีที่เหนือกว่าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวหลายประการ เช่น การขับดันของพลาสติกหลอมเกิดขึ้นได้ดีกว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิของพลาสติกหลอมที่อยู่ในเครื่องอัดรีดได้ดีกว่า และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ดังนั้นเครื่องอัดรีดสกรูคู่จึงเหมาะกับการนำไปใช้แปรรูปพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ นอกจากนี้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ยังสามารถหลอมพอลิเมอร์ได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งยังผสมพลาสติกกับสารอื่นๆ ให้เข้ากันได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูสูงกว่า [28]

2.7.1.4 แม่แบบหรือหัวดาย (die) หัวดายยึดติดอยู่กับปลายบาร์เรล ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลาสติกหลอมให้มีรูปทรงต่างๆ ตามต้องการ โดยสามารถแบ่งชนิดของหัวดายที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดออกตามชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต เช่น เส้นใย ท่อ แผ่น ฟิล์ม เป็นต้น

2.7.2 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีดฟิล์มพลาสติก

ในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก เริ่มต้นจากการนำเม็ดพลาสติกมาหลอมในเครื่องอัดรีด โดยมีสกรูทำหน้าที่ดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านหัวดาย สำหรับหัวดายที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มพลาสติก คือ หัวดายไม้แขวนเสื้อ (coathanger sheet extrusion die) และหัวดายรูปตัวที (center-fed T die) ซึ่งลักษณะของหัวดายทั้งสองแบบจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีหน้ากว้างใกล้เคียงกับความกว้างของฟิล์ม มีความสูงใกล้เคียงกับความหนาของฟิล์ม หัวดายทั้งสองแบบมีร่อง (manifolds) จำนวนมาก โดยร่องมีความยาว (land length) และมีรูปทรงที่เหมาะสม ทั้งนี้อาจเป็นร่องครึ่งวงกลมหรือร่องรูปทรงเหลี่ยมต่างๆ หัวดายในลักษณะนี้ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกจากบาร์เรลของเครื่องอัดรีดเกิดการกระจายตัว (distribution zone) เป็นแผ่นบางเต็มช่วงกว้างของหัวดายได้ดี ทำให้การบิดตัวของโมเลกุล (molecular orientation) ของพอลิเมอร์หลอมที่ปากทางออกหัวดายคงที่ตลอดหน้ากว้างของหัวดาย ฟิล์มที่ได้จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีสมบัติคล้ายกันทั่วทั้งแผ่น

เมื่อพลาสติกหลอมเหลวผ่านหัวดายแล้วได้เป็นฟิล์มพลาสติก จากนั้นฟิล์มพลาสติกถูกส่งไปยังช่องว่าง (nip) ของลูกกลิ้ง โดยลูกกลิ้งมีลักษณะพื้นผิวที่มันเพราะมีการเคลือบหรือชุบด้วยโครเมียม ลูกกลิ้งตัวบนสุดทำหน้าที่หล่อเย็น ลูกกลิ้งตัวกลางทำหน้าที่บีบอัดฟิล์มพลาสติก โดยใช้ลูกกลิ้งตัวบนและตัวล่างบีบอัดเพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มพลาสติกให้มีความเหมาะสม อีกทั้งยังทำให้ฟิล์มพลาสติกมีผิวที่เรียบจากนั้นส่งฟิล์มพลาสติกไปยังลูกกลิ้งตัวสุดท้ายซึ่งถือว่าเป็นการสิ้นสุดการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก ฟิล์มพลาสติกที่ได้ถูกม้วนเก็บหรือตัดออกเป็นแผ่นเพื่อใช้ในกระบวนการอื่นต่อไป [29] ส่วนประกอบหลักในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก [30]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 ฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติก

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีการพัฒนาเพื่อการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น โดยฟิล์มที่ผลิตจากพลาสติกแต่ละชนิดมีคุณลักษณะเฉพาะตัวตามสมบัติของฟิล์มที่แตกต่างกันออกไป ปัจจุบันฟิล์มพลาสติกได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น นำมาผลิตเป็นถุงพลาสติก ซองพลาสติก หรือถูกนำมาทอเป็นกระสอบ เป็นต้น ฟิล์มพลาสติกที่ใช้สำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์สามารถผลิตได้จากฟิล์มหลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิต

2.8.1 ความแตกต่างระหว่างฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติก

ข้อแตกต่างระหว่างฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติกคือความหนาและลักษณะการม้วนพับของพลาสติก โดยฟิล์มพลาสติกมีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร สามารถม้วนพับโดยไม่มีการผิดรูป ในขณะที่แผ่นพลาสติกหนามากกว่า 0.25 มิลลิเมตรขึ้นไป และเมื่อม้วนพับจะเกิดการผิดรูปขึ้น [31] ฟิล์มพลาสติกเพื่อการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ สามารถแบ่งประเภทตามชนิดวัตถุดิบและวัตถุประสงค์ในการใช้งานได้ 3 ประเภทดังนี้ [32]

2.8.1.1 ฟิล์มพลาสติกเดี่ยว (single plastic film) มักใช้ทำถุงทั่วไป โดยมีราคาไม่สูงมาก เช่น ถุงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene) หรือถุงเย็น ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างใส นิ่ม ยืดหยุ่นพอสมควร และถุงพอลิโพรพิลีนหรือถุงร้อน มีลักษณะใสมาก และมีความกระด้างกว่าถุงเย็น นอกจากนี้ยังนิยมทำเป็นถุงชั้นในของกล่องกระดาษแข็งบรรจุอาหารสำเร็จรูปเพื่อการขายปลีก

2.8.1.2 ฟิล์มพลาสติกประกบ (laminated plastic film) หมายถึงการนำฟิล์มต่างชนิดกันมาประกบเข้าด้วยกันเป็นฟิล์มพลาสติกแผ่นเดียว หรือนำฟิล์มพลาสติกมาประกบกับวัสดุอื่นๆ เช่น กระดาษ แผ่นเปลวอะลูมิเนียม หรือพลาสติกประกบกับแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยไออะลูมิเนียม ทำการยึดติดระหว่างชั้นฟิล์มด้วยการให้ความร้อนหรือใช้กาว (adhesive) โดยจำนวนชั้นของฟิล์มพลาสติกประกบมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปฟิล์มพลาสติกประเภทนี้ต้องประกอบด้วยวัสดุตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป

2.8.1.3 ฟิล์มพลาสติกรีดร่วม (coextruded plastic film) เป็นฟิล์มหลายชั้นซึ่งประกบด้วยพลาสติกชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน และใช้ความร้อนประสานรีดให้ฟิล์มติดกัน ฟิล์มจากกระบวนการนี้มีความใส เรียบสม่ำเสมอ และยังช่วยตัดปัญหาในการหลุดลอกแยกชั้นของฟิล์มได้อีกด้วย

2.9 บรรจุภัณฑ์แอกทีฟ

บรรจุภัณฑ์แอกทีฟ (active packaging) หมายถึงบรรจุภัณฑ์ซึ่งทำหน้าที่ปกป้องอาหารและขณะเดียวกันช่วยควบคุมสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ โดยการยอมหรือสกัดกั้นการแพร่ของก๊าซผ่านเข้า-ออกจากบรรจุภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของอาหารหรือผลิตผลเพื่อยืดอายุการวางจำหน่าย (shelf life) และรักษาคุณภาพของอาหาร [33, 34]

2.9.1 เทคโนโลยีที่ใช้กับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ

2.9.1.1 sachet-based technology คือ การใช้สารดูดหรือคายก๊าซ โดยบรรจุในซองเล็ก ๆ (packet หรือ sachet) โดยซองนี้ถูกใส่เพิ่มลงไปในภาชนะบรรจุหลักของอาหาร ซึ่งใช้แพร่หลายในอาหารอบแห้งต่างๆ ขนมเค้ก หรือเนยแข็ง

2.9.1.2 plastic packaging as media คือ การผสมสารดูดหรือคายก๊าซในพลาสติกหรือฟิล์มที่เป็นบรรจุภัณฑ์โดยตรง เช่น ฟิล์มพลาสติกที่มีสารผสมเพื่อยับยั้งหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในอาหาร ฟิล์มพลาสติกที่มีการผสมสารดูดออกซิเจนเป็นซีล (seal) ด้านในของฝาขวดเบียร์

2.9.2 สารเคมีที่ใช้ควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ

2.9.2.1 สารดูดออกซิเจน (oxygen scavenger หรือ oxygen absorber) คือ การใช้สารที่สามารถดูดซับออกซิเจน โดยตัวเองทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพ ทั้งการเปลี่ยนสี กลิ่น และรสชาติ เหมาะสำหรับใช้บรรจุอาหารทั่วไป เช่น อาหารแห้ง เบเกอรี เป็นต้น สารดูดออกซิเจนที่ใช้ทางการค้า คือ ผงเหล็กออกไซด์ (iron oxide) ซึ่งเป็นธาตุเหล็กหรือสารประกอบธาตุเหล็กที่บรรจุในซองขนาดเล็กแล้วใส่ไว้ในบรรจุภัณฑ์หรือเติมในพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดพลาสติก ถุงเพาซ์ (pouch) เพื่อช่วยในการดูดซับออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากภายนอกสัมผัสกับอาหารได้

2.9.2.2 สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide release) ใช้กับบรรจุภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยลดปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกมา

จะรวมกับน้ำในอาหารได้เป็นกรดคาร์บอนิก ทำให้ค่า pH ที่ผิวหน้าของอาหารลดลง ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ก่อโรค (pathogen) ได้ เช่น อาหารประเภท เนื้อสด เนื้อไก่ เนื้อปลา ขนมปัง เป็นต้น

2.9.2.3 สารควบคุมความชื้น (humidity control) ใช้กับบรรจุภัณฑ์สำหรับควบคุมความชื้น เหมาะสำหรับบรรจุอาหารแห้งหรือผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ เป็นต้น เพื่อไม่ให้คายน้ำออกมามากเกินไป ทำให้สูญเสียน้ำหนักและเร่งการเจริญของเชื้อราอีกด้วย สารควบคุมความชื้นที่ใช้ เช่น แร่ดินหรือเคลย์ ซิลิกาเจล โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

2.9.2.4 สารดูดจับเอทิลีน (ethylene scavenging) ใช้กับบรรจุภัณฑ์สำหรับลดปริมาณเอทิลีน เหมาะสำหรับบรรจุผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผักและผลไม้ เพื่อชะลอการสุก สารดูดซับเอทิลีน เช่น โพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนต เนื่องจากเอทิลีนมีขนาดโมเลกุลเล็ก ทำให้ถูกดูดซับได้ง่ายด้วยวัสดุที่มีรูพรุน ตัวอย่างสารที่มีรูพรุนที่ใช้ดูดซับเอทิลีน เช่น ถ่านกัมมันต์ อะลูมิโนซิลิเกต เป็นต้น

2.9.2.5 สารต้านจุลินทรีย์ (antimicrobial agent) ใช้กับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเน่าเสียและไม่ปลอดภัย อาจใช้สารต้านแบคทีเรียในรูปของซองบรรจุสารต้านจุลินทรีย์หรือผสมสารต้านจุลินทรีย์ในฟิล์มพลาสติกที่เป็นบรรจุภัณฑ์โดยตรงหรือใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติต้านจุลินทรีย์มาทำเป็นฟิล์มพลาสติก ตัวอย่างสารต้านแบคทีเรีย เช่น กรดซอร์บิก เบนโซอิก และเบนโซเอต เป็นต้น

2.9.2.6 สารดูดกลิ่น (odor absorber) ใช้กับบรรจุภัณฑ์สำหรับลดกลิ่นที่มาจากอาหารบางชนิด ตัวอย่างเช่น การผสมวิตามินซีในฟิล์มพลาสติกเพื่อดูดกลิ่นสำหรับอาหารที่เหม็นหืนได้ง่ายและอาหารทอด หรือ การใช้กรดซิตริกเติมในฟิล์มพลาสติกเพื่อดูดกลิ่นเอมีนที่ส่งผลทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติในเนื้อปลา เป็นต้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเป็นพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายด้วยกระบวนการหลอมเหลวที่ใช้กับพลาสติกทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการอัดรีด การฉีด การรีดเป่าฟิล์ม รวมทั้งการรีดหล่อฟิล์ม ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ทั้งนี้ยังคงต้องปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบางประการให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น มีหลายงานวิจัยที่พยายามปรับปรุงและพัฒนาสมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยการเตรียมเป็นคอมพอสิต

Sang และคณะ [35] ศึกษาผลการใช้ซิลิกาเป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ปริมาณต่างๆ โดยเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน จากการศึกษาด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างหมู่ไซลานอลของซิลิกากับหมู่คาร์บอนิลของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าการเติมซิลิกาปริมาณร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตได้ดีที่สุด แต่เมื่อใช้ปริมาณซิลิกาที่สูงกว่าร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ทำการทดสอบมีความเปราะมากจนไม่สามารถทดสอบสมบัติเชิงกลได้ เนื่องมาจากการใช้ซิลิกาที่มากขึ้นทำให้ซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกัน สังเกตได้จากภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM)

Jacquel และคณะ [36] ศึกษาผลการใช้ซิลิกาเป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ปริมาณต่างๆ โดยเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยการเป่าฟิล์ม (extrusion blowing) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและขวางแนวเครื่องจักร เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตพบว่าการเติมซิลิกาส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกามีผลต่อการเกิดนิวเคลียสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต และเมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิตพบว่าความทนแรงดึงและยังส์มอดุลัสของฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น แต่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดและพื้นที่ผิวของซิลิกาส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต ซึ่งอนุภาคซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวมากมีสมบัติโดยรวมที่ดีกว่าอนุภาคซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวน้อย

Bian และคณะ [37] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกา โดยการผสมซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ ในช่วงร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนักในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัด (compression molding) จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของซิลิกาที่ส่งผลต่อการตกผลึก โครงสร้างผลึก และสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตพบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากซิลิกาทำหน้าที่คล้ายสารก่อผลึกในระบบ ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (wide-angle x-ray diffraction, WAXD) พบว่าการเติมซิลิกาในพอลิบิวทิลีนซักซิเนตไม่ส่งผลต่อรูปแบบของผลึก สำหรับสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อมีปริมาณของซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ยังส์มอดุลัสและความเค้นที่จุดคราก (yield strength) เพิ่มมากขึ้น แต่ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง

Khankrua และคณะ [38] ได้ทำการเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกา โดยการผสมซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ ในช่วงร้อยละ 0.1-5.0 โดยน้ำหนัก จากนั้นศึกษาการกระจายตัวของซิลิกา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณซิลิกาที่ใส่และการกระจายตัวของซิลิกาในพอลิเมอร์ส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต หากใส่ซิลิกาปริมาณที่มากเกินความจำเป็นมีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาด้วยกัน ทำให้ซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกัน บริเวณนี้จึงมีความเค้นสะสม (stress concentration) ส่งผลให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่ซิลิกาช่วยให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว อุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลายมากที่สุดและอุณหภูมิการดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ การเติมซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตให้ดีขึ้นได้ แต่ปัญหาสำคัญที่พบ คือ อนุภาคซิลิกามักเกิดการรวมกลุ่มกันหากใส่ในปริมาณที่มากเกินไปอีกทั้งความไม่เข้ากันระหว่างอนุภาคซิลิกากับพอลิเมอร์ เนื่องจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติโดยรวมลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกล หนึ่งในวิธีที่ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเติมเสริมแรง คือ การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ลงไปในพอลิเมอร์คอมพอสิต

Mani และคณะ [39] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการกราฟต์ของพอลิเอสเทอร์กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยเตรียมพอลิเอสเทอร์กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยวิธีการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ (reactive extrusion) จากผลการการทดลองพบว่าปริมาณการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิเอสเทอร์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ได้ แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการกราฟต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การหาปริมาณสัดส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ เนื่องจากให้ปริมาณการกราฟต์ที่สูงที่สุด จากการศึกษาพบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์มากขึ้นปริมาณการกราฟต์มีค่าเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งการเพิ่มปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก็ส่งผลต่อการกราฟต์ที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน

Xiuju และคณะ [40] ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้สองชนิด ได้แก่ พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-*g*-MA) และพอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต (PP-*g*-GMA) โดยใช้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (microcrystalline cellulose, MCC) เป็นตัวเติมเสริมแรงและมีพอลิโพรพิลีนเป็นเมทริกซ์ โดยผสมพอลิโพรพิลีน สารเสริมสภาพเข้ากันได้ และไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (injection molding) แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าคอมพอสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยเพิ่มความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก และความทนแรงดัดโค้งได้มากกว่าคอมพอสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยในงานวิจัยของ Aggarwal และคณะ [41] ได้อธิบายสาเหตุที่คอมพอสิตที่ใช้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์บนพอลิเมอร์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าคอมพอสิตที่ใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์บนพอลิเมอร์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ว่าอาจเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนพอลิเมอร์มีความไวต่อการถูกไฮโดรไลซิสได้ง่าย แต่ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิเมอร์ สร้างพันธะกับตัวเติมเสริมแรงผ่านการเปิดวงของหมู่ฟังก์ชันอีพ็อกไซด์ซึ่งพันธะนี้ทนต่อความชื้นได้มากกว่าหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์

Wu และคณะ [20] ได้สังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต (PBS-*g*-GMA) สำหรับใช้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยปาล์มและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตให้มากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการรีฟลักซ์ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต คือ ไกลซิดิลเมทาคริเลตร้อยละ 10 โดยน้ำหนักผสมกับเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปเป็นคอมพอสิตโดยนำไปผสมกับเส้นใยปาล์มที่สัดส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์อยู่บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตช่วยให้ พอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถผสมเข้ากันกับเส้นใยปาล์มได้ดีขึ้น แสดงว่าไกลซิดิลเมทาคริเลตสามารถปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับเส้นใยปาล์มให้ดีขึ้นได้ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตและเส้นใยปาล์มให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและเส้นใยปาล์ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินการทดลอง

3.1.1 สืบค้นข้อมูลทางวิชาการและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 วางแผนงานของการวิจัย กำหนดขั้นตอน และวิธีการทดลอง

3.1.3 เตรียมวัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

3.1.4 ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือขึ้นรูปและเครื่องมือทดสอบ

3.1.5 เตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตและตรวจสอบปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยวิธีการไทเทรต

3.1.6 เตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

3.1.7 ขึ้นรูปชิ้นงานฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม

3.1.8 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต

3.1.9 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ GS Pla® เกรด FZ91PD สำหรับงานฟิล์ม จากบริษัท Mitsubishi Chemical (ประเทศญี่ปุ่น) มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น

3.2.2 ไกลซิดิลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ GMA ความบริสุทธิ์ 97% จากบริษัท Sigma-Aldrich (ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี และนำมาใช้ทันทีโดยไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์และการปรับปรุงใดๆ ทั้งสิ้น

3.2.3 ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ DCP ความบริสุทธิ์ 97% จากบริษัท Sigma-Aldrich (ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น

3.2.4 ซิลิกาทางการค้า (commercial silica) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ ULTRASIL® 9000 GR จากบริษัท Evonik (ประเทศไตหวัน) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว

3.2.5 คลอโรฟอร์ม (chloroform) เกรด AR จากบริษัท Lab scan (ประเทศไทย) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี

3.2.6 อะซิโตน (acetone) เกรด CG จากบริษัท Lab scan (ประเทศไทย) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี

3.2.7 กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ในไดเอทิลอีเทอร์ (hydrogen chloride solution 2.0 M in diethylether) เกรด AR จากบริษัท Sigma-Aldrich (ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี

3.2.8 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) จากบริษัท Panreac (ประเทศไทย) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี

3.2.9 ฟีนอล์ฟแทลีน (phenolphthalein) จากบริษัท Quality Reagent Chemical (ประเทศไทย) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.3.2 ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.3.3 กระบอกตวง (graduated cylinder) ขนาด 200 มิลลิลิตร

3.3.4 ขวดก้นกลม (round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.3.5 บิวเรต (buret) ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.3.6 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ขนาด 5 เซนติเมตร

3.3.7 คอนเดนเซอร์ (condenser)

3.3.8 หลอดหยดสาร (dropper)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.9 เข็มฉีดยาและหลอดฉีดยา (syringe)

3.3.10 ชุดกรองบุชเนอร์แบบสุญญากาศ (büchner funnel, büchner flask และ vacuum pump)

3.3.11 เครื่องกวนให้ความร้อน (hot plate stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ของบริษัท IKA รุ่น C-MAG HS7

3.3.12 ตู้อบ (hot air oven) ของบริษัท Memmer รุ่น UNB 400

3.3.13 เครื่องชั่งทศนิยมสองตำแหน่ง (analytical balance) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT

3.3.14 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (co-rotating twin-screw extruder) ของบริษัท Thermo Prism รุ่น DSR-28

3.3.15 เครื่องรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting) ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX/VS

3.3.16 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (pelletizer cutting machine) ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LZ-80

3.3.17 เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (thickness gage) ของบริษัท Mittutoyo Corporation รุ่น 7301

3.3.18 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (laser diffraction particle size analyzers) ของบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000

3.3.19 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area analyzer) ของบริษัท Microtrac รุ่น BELSORP-mini II

3.3.20 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer, XRD) ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Advance

3.3.21 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) ของบริษัท Thermo Sciencetific รุ่น Nicolet 6700

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV

3.3.23 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^{e}

3.3.24 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR^{e}

3.3.25 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของบริษัท LLOYD รุ่น LR100K

3.3.26 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeation tester, WVPT) ของบริษัท MOCON รุ่น PERMATRAN-W®3/33

3.3.27 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (oxygen permeation tester, OPT) ของบริษัท SYSTECH Illinois รุ่น 8000

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

3.4.1.1 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

ก่อนขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซักซิเนตถูกนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซักซิเนต ไกลซิดิลเมทาคริเลต และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มมาผสมให้เข้ากันโดยวิธีทางกายภาพ อัตราส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 3.1 ทำการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูดังแสดงในตารางที่ 3.2 พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตสูตรต่างๆ ที่ผ่านการอัดรีดถูกตัดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28

รูปที่ 3.2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของ Labtech Engineering รุ่น LZ-80/VS

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

sample	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
DCP (phr)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	1	1.5	2.0	1.5	3.0
GMA (phr)	5					10				

(parts per hundred, phr)

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

zone	temperature (^{o}C)
feed	115
2	125
3	130
4	135
die	140
ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	30

3.4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยวิธีการไทเทรต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ผ่านการอัดรีดแล้วจำนวน 5 กรัมมาละลายในคลอโรฟอร์มจำนวน 200 มิลลิลิตร นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นกรองและตกตะกอนสารละลายด้วยอะซิโตนที่ผ่านการแช่เย็นจำนวน 500 มิลลิลิตรต่อครั้ง ทำทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อแยกไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก นำสารที่ตกตะกอนได้ไปอบให้แห้งที่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.3 การรีฟลักซ์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

จากนั้นนำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้วจำนวน 1 กรัม มาละลายในคลอโรฟอร์มจำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนเป็นเวลา 5 นาที ทำการเติมกรดไฮโดรคลอริกในไดเอทิลอีเทอร์ 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปไทเทรตกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ โดยมีฟีนอล์ฟแทลีนเป็นอินดิเคเตอร์

ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (%G) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 [42]

$$\%G = \frac{142.5 \times (V_0 - V) \times C}{1000 \times m} \times 100\% \qquad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดยที่ V_0 คือ ปริมาตรโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์

V คือ ปริมาตรโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

C คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

m คือ น้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์

ก่อนขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซักซิเนต เม็ดพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต และซิลิกาถูกนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกา โดยซิลิกาทำหน้าที่เป็นตัวเติมเสริมแรงและมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ อัตราส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 3.3 นำทั้งหมดมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูดังแสดงในตารางที่ 3.4 พอลิเมอร์คอมพาวนด์สูตรต่างๆ ที่ผ่านการอัดรีดถูกตัดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ทำการศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

3.4.2.1 พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้และซิลิกา

3.4.2.2 ผลของอัตราส่วนของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก (% wt)

3.4.2.3 ผลของอัตราส่วนของซิลิกาต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก

3.4.2.4 ผลของอัตราส่วนของซิลิกาที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาในอัตราส่วยร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.4.2.5 ผลของอัตราส่วนของซิลิกาที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาในอัตราส่วยร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพาวนด์

composition	PBS (%wt)	PBS-*g*-GMA (%wt)	silica (%wt)
PBS	100	-	-
PBS/G5	95	5	-
PBS/G10	90	10	-
PBS/S1	99	-	1
PBS/S2	98	-	2
PBS/S3	97	-	3
PBS/G5/S1	94	5	1
PBS/G5/S2	93	5	2
PBS/G5/S3	92	5	3
PBS/G10/S1	89	10	1
PBS/G10/S2	88	10	2
PBS/G10/S3	87	10	3

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการผสมพอลิเมอร์คอมพาวนด์

zone	temperature ($^{\circ}$C)
feed	120
2	130
3	140
4	150
die	160
ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.3 การเตรียมฟิล์มคอมพอสิต

ก่อนขึ้นรูปเป็นฟิล์มคอมพอสิตพอลิเมอร์คอมพาวนด์ถูกนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มคอมพอสิตผ่านเครื่องรีดหล่อฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยมีการควบคุมความหนาของฟิล์มให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.10-0.15 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.4 เครื่องรีดหล่อฟิล์มของ Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม

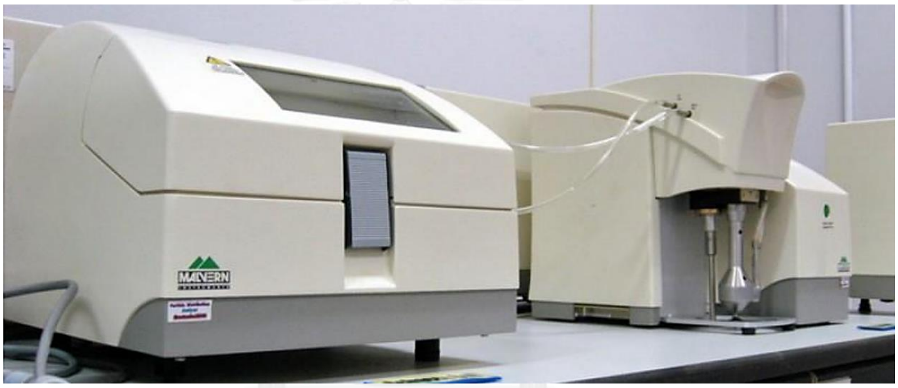
zone	temperature (°C)
feed	140
2	145
3	150
4	155
5	160
die	180
ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	30

3.5 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของอนุภาคซิลิกา

3.5.1.1 วิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลิกา

วิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิกาด้วยเครื่อง laser diffraction particle size analyzers ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำอนุภาคซิลิกาไปผ่านการสั่นโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (sonicate) นาน 30 วินาที เพื่อให้อนุภาคซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ดี จากนั้นจึงนำอนุภาคซิลิกามาวิเคราะห์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่า particle refractive index เท่ากับ 1.46 [7] และค่า absorption เท่ากับ 0.1 มีน้ำเป็นตัวกลาง โดยใช้ค่า d(0.5) สำหรับอ่านค่าขนาดอนุภาคของซิลิกา



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลิกาของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5.1.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา

วิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยเครื่อง surface area analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยศึกษาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส แล้วหาจำนวนโมเลกุลก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา

รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวอนุภาคของ Microtrac รุ่น BELSORP-mini II

3.5.1.3 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบในมุมที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างของผลึกของอนุภาคซิลิกา

รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Bruker รุ่น D8 Advance

3.5.2 การวิเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้วด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โหมดที่ใช้ในการทดสอบ คือ โหมด ATR ความถี่ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1} จำนวนครั้งการสแกน 64 ครั้ง ความละเอียด 8 cm^{-1}

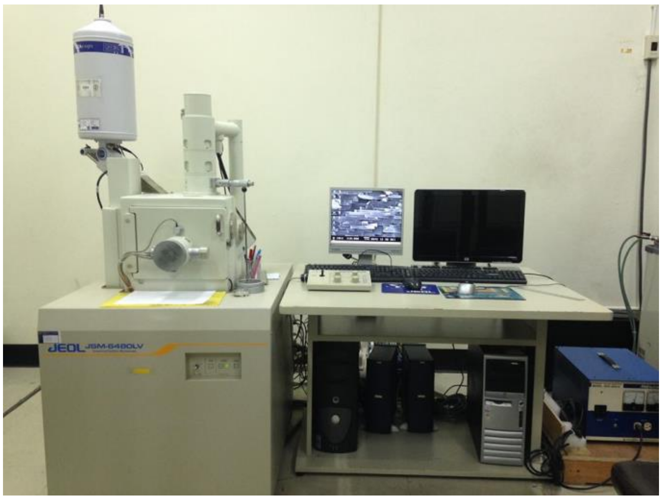
รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของ Thermo sciencetific รุ่น Nicolet 6700

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต

3.5.3.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม

ศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของซิลิกาในฟิล์มคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยนำฟิล์มคอมพอสิตที่ได้จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ทำการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของฟิล์มคอมพอสิต โดยใช้กำลังขยายในการทดสอบ 2,000 เท่า



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL รุ่น JSM-6400LV

3.5.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างภายใต้ความร้อน

วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (degradation temperature, T_d) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM E2550 ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทดสอบโดยนำฟิล์มคอมพอสิตน้ำหนักประมาณ 1-2 มิลลิกรัม มาวิเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^e

3.5.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D7426 ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยนำฟิล์มคอมพอสิตน้ำหนักประมาณ 1-2 มิลลิกรัมมาวิเคราะห์ในโหมดให้ความร้อน-ทำให้เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 [43]

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0 \times (1-W_f)} \times 100\% \qquad \text{สมการที่ 3.2}$$

โดยที่ ΔH_c คือ เอนทัลปีของการเกิดผลึกขณะให้ความเย็นของตัวอย่าง

ΔH_m^0 คือ เอนทัลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ (110.3 จูล/กรัม)

W_f คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเติมเสริมแรงที่เติมลงในฟิล์มคอมพอสิต

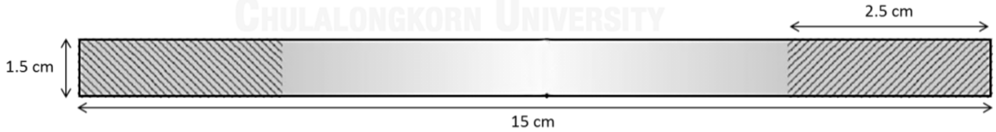
รูปที่ 3.11 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR^e

3.5.3.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

ทดสอบความทนแรงดึง (tensile strength) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยนำฟิล์มคอมพอสิตที่มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความหนาในช่วง 0.10-0.15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.13 มาทำการทดสอบโดยใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 12.5 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะที่วัดการยืดออก (gauge length) 125 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของ LLOYD รุ่น LR100K

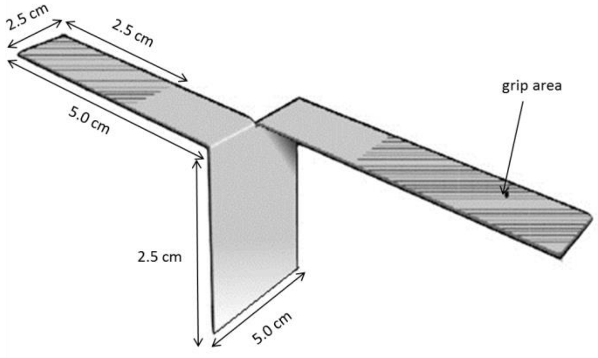
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

3.5.3.5 การทดสอบความทนแรงฉีกขาด

ทดสอบความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D1938 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยนำฟิล์มคอมพอสิตที่มีความกว้าง 5.0 เซนติเมตร ความยาว 7.5 เซนติเมตร และความหนาในช่วง 0.10-0.15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.14 มาทำการทดสอบโดยใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบความทนแรงฉีกขาด [44]

3.5.3.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate, WVTR) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM F1249 ด้วยเครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90

รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ MOCON รุ่น PERMATRAN-W®3/33 [45]

3.5.3.7 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (oxygen gas transmission rate, OTR) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D3985 ด้วยเครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 0

รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของ SYSTECH Illinois รุ่น 8000 [46]

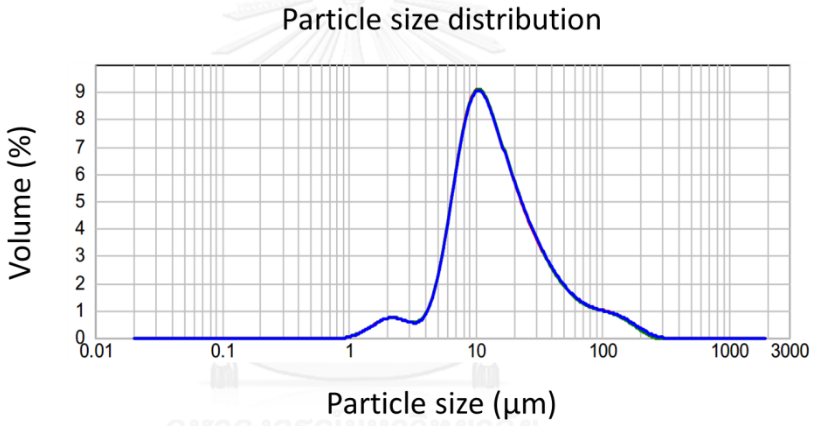
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของซิลิกา

4.1.1 ขนาดอนุภาคซิลิกา

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลิกาด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยวัดการกระเจิงของแสง (light scattering) ของอนุภาคซิลิกา พบว่าซิลิกามีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 1.026-257.653 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคที่มีปริมาณมากที่สุด คือ 13.318 ไมโครเมตร สังเกตได้จากจุดสูงสุดของกราฟ แสดงในรูปที่ 4.1



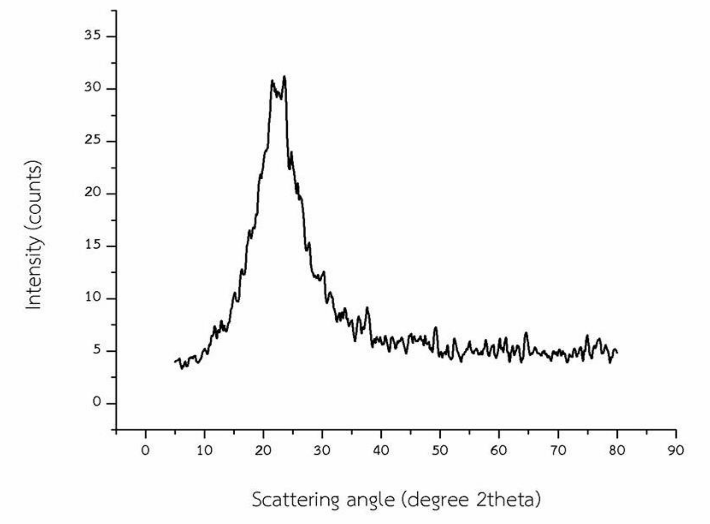
รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิกา

4.1.2 พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว พบว่าอนุภาคซิลิกามีพื้นที่ผิว 182.57 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุน 1.315 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 28.812 นาโนเมตร

4.1.3 โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกาจากเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าอนุภาคซิลิกานั้นมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous) โดยที่ตำแหน่ง 2 theta ประมาณ 22 องศา เป็นพีกหลักที่แสดงว่าอนุภาคซิลิกามีลักษณะโครงสร้างเป็นอสัณฐาน [47]

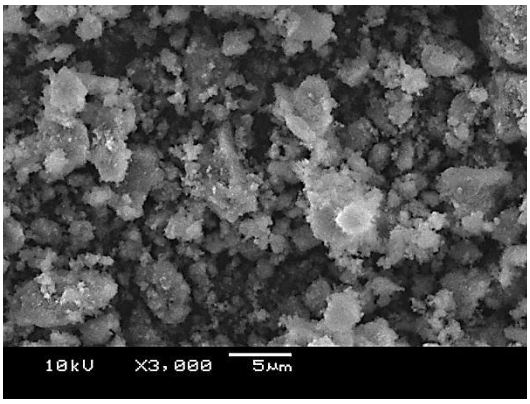


รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา

4.1.4 สัณฐานวิทยาของซิลิกา

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าอนุภาคซิลิกามีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวขรุขระ มีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่โดยทั่ว เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิลิกามีหมู่ไซลานอลอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคซิลิกาอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาด้วยกันเองโดยสร้างพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่ไซลานอล ทำให้อนุภาคของซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน [11]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

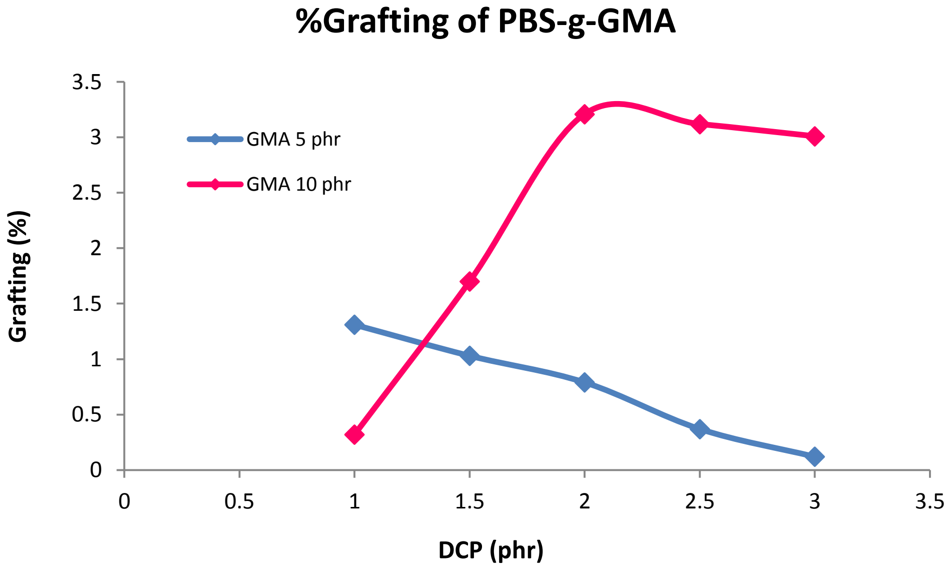


รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกา

4.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

4.2.1 การตรวจสอบปริมาณพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการไทเทรต

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยวิธีการไทเทรต แสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 10 phr กับปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ที่ 2.0 phr เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.4 ปริมาณการกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

ตารางที่ 4.1 ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

sample	degree of grafting (%G)	
	GMA 5 phr	GMA 10 phr
DCP 1.0 phr	1.31	0.32
DCP 1.5 phr	1.03	1.70
DCP 2.0 phr	0.79	3.21
DCP 2.5 phr	0.37	3.12
DCP 3.0 phr	0.12	3.01

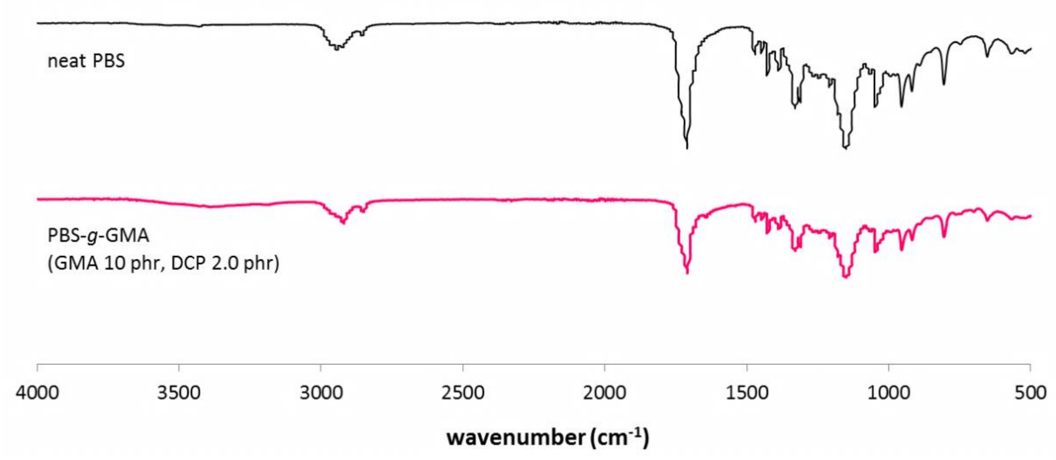
เมื่อพิจารณาปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 5 phr พบว่าการเพิ่มปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ทำให้ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์ลงบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตลดลง และเมื่อใช้ปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์มากกว่า 1.5 phr พบว่าไม่สามารถเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ได้ อาจเนื่องมาจากมีอนุมูลอิสระอยู่ในระบบมากเกินไป ส่งผลให้อนุมูลอิสระที่เหลืออาจไปตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตแทนที่จะเกิดการกราฟต์ หรืออนุมูลอิสระอาจเกิดการรวมตัวกันเอง ทำให้อนุมูลอิสระสูญเสียการเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตจึงลดลง

เมื่อเพิ่มปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็น 10 phr ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตในการเข้าทำปฏิริยาการกราฟต์ที่บริเวณจุดว่องไวบนสายโซ่พอลิบิวทิลีนซักซิเนตพบว่าในช่วงแรกปริมาณการกราฟต์น้อย อาจเนื่องมาจากปริมาณอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในระบบน้อยเกินไป และเมื่อปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ในระบบมีอนุมูลอิสระมากขึ้น ปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์ลงบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตจึงเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ 2.0 phr ขึ้นไป พบว่าปริมาณไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์ลงบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก [48]

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ทำให้ได้ปริมาณการกราฟต์มากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 10 phr และปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ที่ 2.0 phr ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตสโคปี แสดงในรูปที่ 4.5



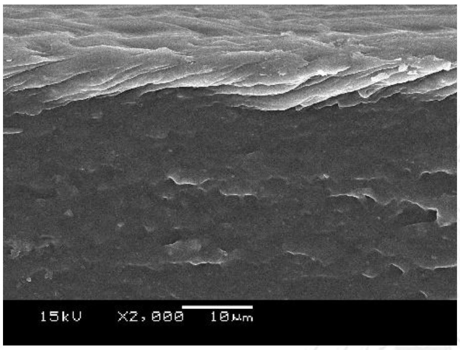
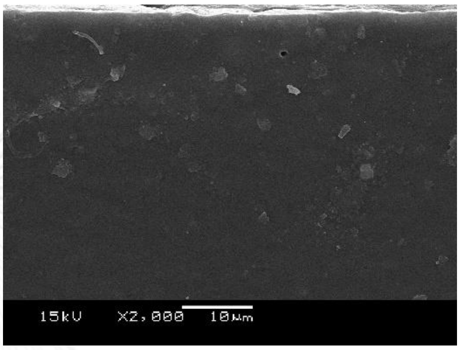
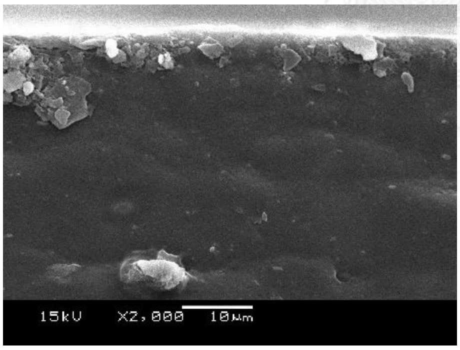
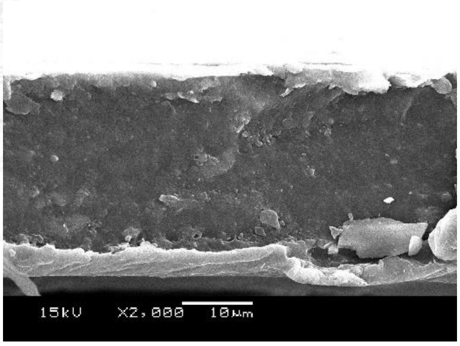
รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต

จากผลการทดลองพบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปรากฏพีกที่ช่วงเลขคลื่น 3,200–3,700 cm^{-1}, 1,700–1,750 cm^{-1}, และ 500–1,600 cm^{-1} เหมือนกัน [49] แต่จากผลการทดลองไม่ปรากฏพีกที่เลขคลื่น 1730 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งหมู่คาร์บอนิลของพันธะเอสเทอร์และหมู่อิพ็อกไซด์ในไกลซิดิลเมทาคริเลตตามลำดับ อาจเนื่องมาจากไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์ลงบนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตนั้นมีปริมาณน้อยมาก จึงไม่สามารถวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบการกราฟต์ได้

4.3 สมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

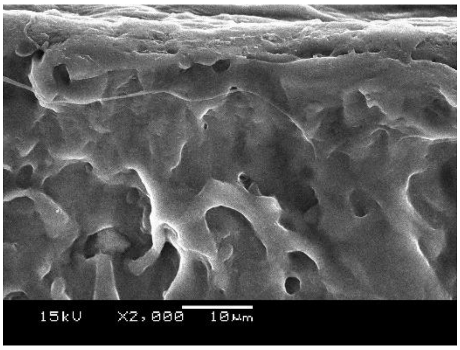
4.3.1 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์บริเวณพื้นผิวภาคตัดขวางเพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.6 (1-10)

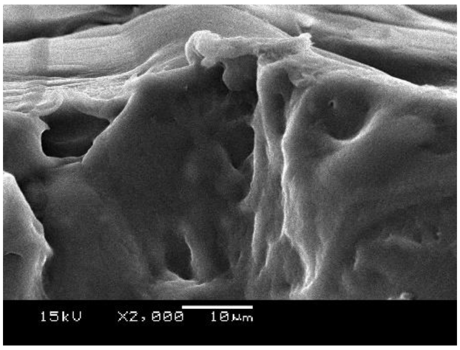
(1) PBS	(2) PBS/S1
	
(3) PBS/S2	(4) PBS/S3
	

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

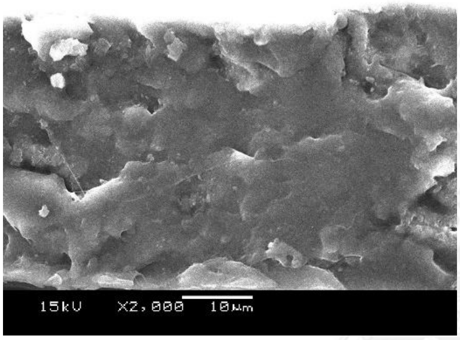
(5) PBS/G5/S1



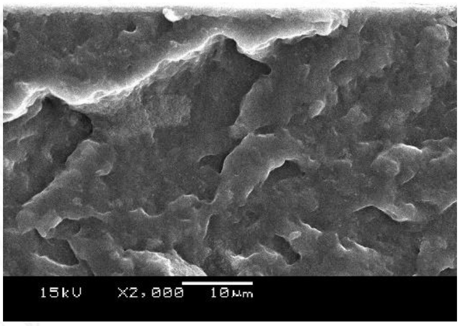
(6) PBS/G10/S1



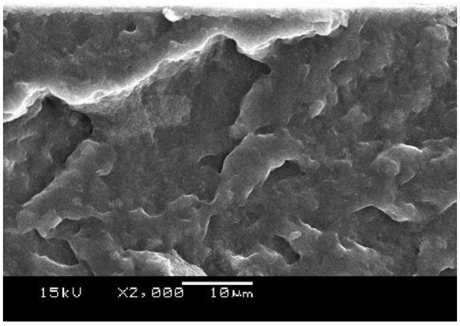
(7) PBS/G5/S2



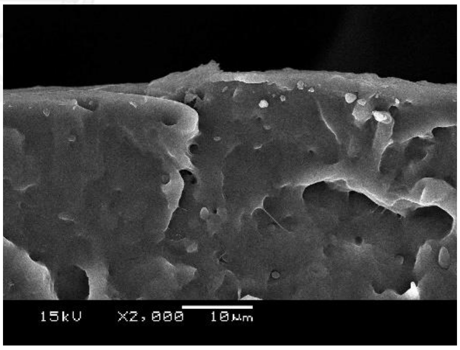
(8) PBS/G10/S2



(9) PBS/G5/S3



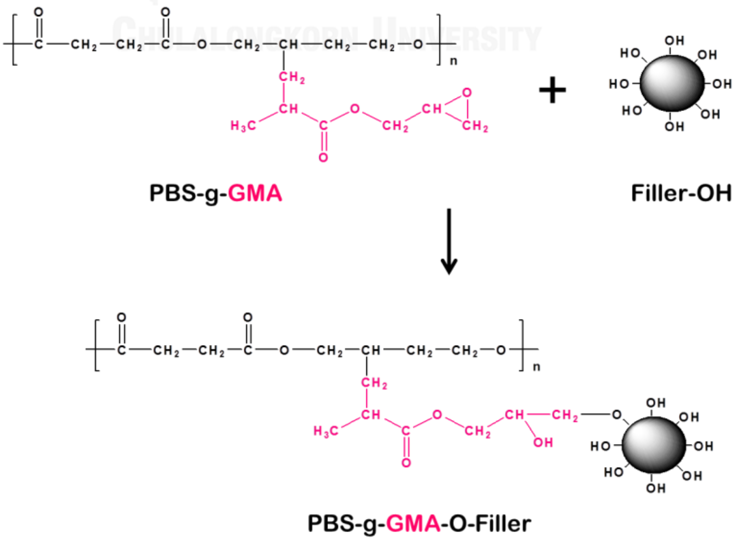
(10) PBS/G10/S3



รูปที่ 4.6 (ต่อ) สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.6 (1) พบว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ พื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะขรุขระ เมื่อเติมซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าซิลิกากระจายอยู่ในเนื้อฟิล์มอย่างสม่ำเสมอ แสดงในรูปที่ 4.6 (2) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาเป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.6 (3) (4) ตามลำดับ พบว่าที่พื้นผิวของฟิล์มมีซิลิกาบางส่วนรวมกลุ่มกัน เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีความเป็นขั้วต่ำ จึงเข้ากันได้ไม่ดีกับซิลิกาที่มีความเป็นขั้วสูง ประกอบกับที่พื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไซลานอลอยู่เป็นจำนวนมาก อาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาด้วยกันเองโดยสร้างพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่ไซลานอล ทำให้ซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน

เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.6 (5-10) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว ยืนยันได้จากลักษณะพื้นผิวการแตกหักของฟิล์มมีความขรุขระ ในขณะที่พื้นผิวการแตกหักของฟิล์มที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้จะค่อนข้างเรียบ แสดงในรูปที่ 4.6 (2-4) แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเปราะ ฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้แสดงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว อาจเนื่องมาจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้สามารถปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาให้ดีขึ้น โดยหมู่อิพ็อกไซด์ของไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกา ทำให้ซิลิกากระจายตัวได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกับซิลิกา แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตกับซิลิกา (ดัดแปลงมาจาก [20])

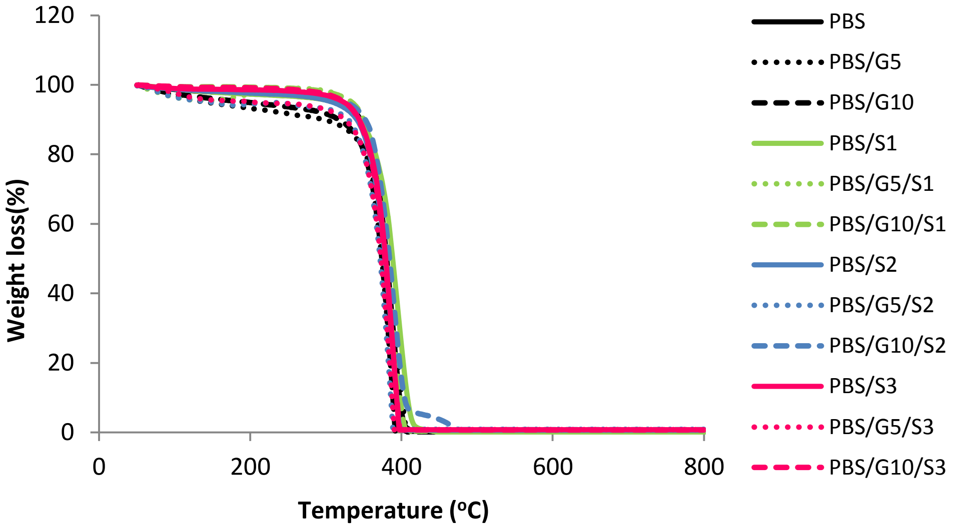
4.3.2 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

4.3.2.1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลายมากที่สุด ($T_{inflection\ point}$) และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัว (T_{endset}) ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิส โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในขณะที่ได้รับความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

sample	T_{onset} (°C)	$T_{inflection\ point}$ (°C)	T_{endset} (°C)
PBS	362.1	387.0	401.5
PBS/G5	362.5	392.5	409.8
PBS/G10	365.4	390.1	408.7
PBS/S1	368.4	395.4	412.1
PBS/S2	365.4	390.4	408.5
PBS/S3	366.4	392.0	409.4
PBS/G5/S1	366.2	391.5	408.1
PBS/G5/S2	364.9	391.6	407.8
PBS/G5/S3	365.5	392.7	409.3
PBS/G10/S1	364.1	390.1	407.8
PBS/G10/S2	363.6	388.7	404.9
PBS/G10/S3	362.9	389.8	407.0



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัวและอุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลายมากที่สุดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีค่าใกล้เคียงกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว อุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลายมากที่สุด และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารเกิดการเสื่อมสลายของฟิล์มคอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากเมื่อพอลิบิวทิลีนซักซิเนตได้รับความร้อนซิลิกาช่วยถ่ายโอนความร้อนจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนต จึงทำให้ฟิล์มเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น [49] ดังนั้นการเติมซิลิกาส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้และปริมาณซิลิกาที่ใส่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต

4.3.2.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก และปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

sample	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)
PBS	93.1	106.1, 114.1	56.3	51.0
PBS/G5	92.6	105.8, 114.1	57.7	52.4
PBS/G10	93.9	107.2, 114.6	62.0	56.2
PBS/S1	88.9	103.5, 114.7	67.0	61.3
PBS/S2	88.5	103.4, 114.4	59.9	55.4
PBS/S3	89.0	103.3, 114.5	58.3	54.5
PBS/G5/S1	95.7	107.5, 114.8	70.7	64.8
PBS/G5/S2	95.1	107.3, 114.8	64.6	59.8
PBS/G5/S3	94.9	107.4, 114.4	63.7	59.6
PBS/G10/S1	94.9	107.1, 114.1	78.3	71.7
PBS/G10/S2	95.2	107.8, 114.4	69.0	63.9
PBS/G10/S3	95.1	107.7, 114.6	65.7	61.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนในการให้ความร้อนขั้นที่สอง เนื่องจากการให้ความร้อนในครั้งแรกเป็นการให้ความร้อนเพื่อกำจัดประวัติทางความร้อน (thermal history) ที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปและการเตรียมตัวอย่าง แต่ด้วยสภาวะที่วิเคราะห์ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตได้

ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว พบว่าฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกใกล้เคียงกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกลดลงเมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากซิลิกาขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดผลึกได้ช้า เมื่อพิจารณาปริมาณซิลิกาที่ใส่ในฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าปริมาณซิลิกาไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก เมื่อเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกา พบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ทำให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาดีขึ้น ซิลิกาจึงทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการไม่ใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ส่งผลให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น อุณหภูมิการเกิดผลึกจึงเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้และปริมาณซิลิกาที่ใส่ในฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดผลึกของฟิล์มคอมพอสิต

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกพบว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมี 2 อุณหภูมิ เนื่องจากมีความแตกต่างของชนิดผลึกที่พบในพอลิบิวทิลีนซักซิเนต โดยอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงแรก (lower melting temperature, T_{m1}) เป็นอุณหภูมิที่แสดงถึงการหลอมผลึกที่ไม่สมบูรณ์และผลึกที่มีขนาดเล็ก ส่วนอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงหลัง (higher melting temperature, T_{m2}) เป็นอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกที่แสดงถึงการหลอมผลึกที่มีความสมบูรณ์และผลึกที่เกิดเพิ่มขึ้นหลังขั้นตอนการให้ความร้อน ซึ่งเป็นผลึกส่วนใหญ่ [50]

จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกทั้งสองช่วงใกล้เคียงกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงแรกลดลง

เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากซิลิกาขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงแรกจึงลดลง แต่เมื่อมีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงแรกมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากหมู่อิพ็อกไซด์ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกา ช่วยให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและซิลิกาดีขึ้น และจากอันตรกิริยาระหว่างสองเฟสที่ดีขึ้น ผลึกที่เกิดจึงมีความสมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงแรกสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาและสารเสริมสภาพเข้ากันได้นั้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกช่วงหลัง อาจเป็นเพราะอุณหภูมิช่วงนี้เป็นอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ซึ่งมีความเป็นผลึกค่อนข้างสมบูรณ์อยู่แล้ว ทำให้การเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิช่วงดังกล่าวเป็นไปได้ยาก [51] จากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้และปริมาณซิลิกาที่ใส่ในฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกของฟิล์มคอมพอสิต

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของฟิล์มคอมพอสิต พบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีปริมาณผลึกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา ซึ่งสามารถอธิบายได้จากภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.6 (2-4) จากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ดังนั้นซิลิกาจึงทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ดี ปริมาณผลึกจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมซิลิกาเพิ่มมากขึ้นกลับพบว่าปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกันจึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดผลึกในวัสดุคอมพอสิต เมื่อเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ลงไปพบว่าปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาให้ดีขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยให้ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าช่วยให้ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อาจเนื่องมาจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสายโซ่พอลิบิวทิลีนซักซิเนต

สารเสริมสภาพเข้ากันได้จึงทำหน้าที่เป็นเหมือนพลาสติไซเซอร์หรือตัวหล่อลื่นระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ปริมาณผลึกจึงเพิ่มขึ้น [49]

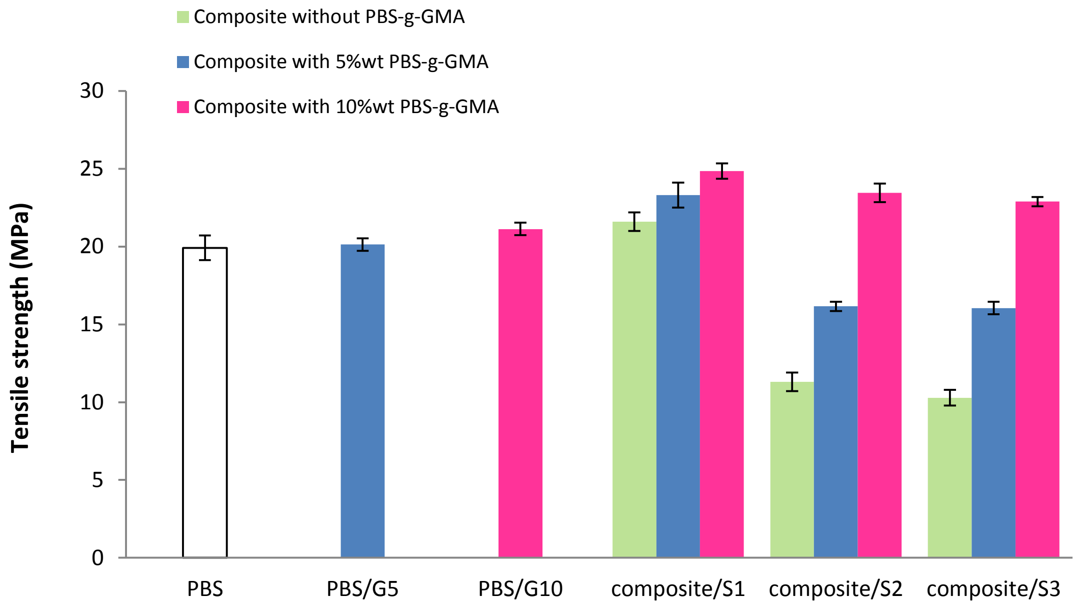
เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีปริมาณผลึกน้อยกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อาจเนื่องมาจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีน้อยเกินไป ส่งผลให้สัดส่วนของไกลซิดิลเมทาคริเลตในเมทริกซ์มีน้อยเกินไปไม่เหมาะสมกับสัดส่วนของซิลิกา ซิลิกาจึงมีโอกาสรวมกลุ่มกันและขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ปริมาณผลึกน้อย และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พอลิบิวทิลีนซักซิเนตและซิลิกาสามารถเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีเพียงพอในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกา โดยหมู่อิพ็อกไซด์ของไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกา ส่งผลให้ซิลิกาเกาะกลุ่มกันน้อยลงอีกทั้งยังช่วยให้ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ดี ปริมาณผลึกจึงสูงกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณซิลิกาในฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าปริมาณผลึกมีแนวโน้มคล้ายกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

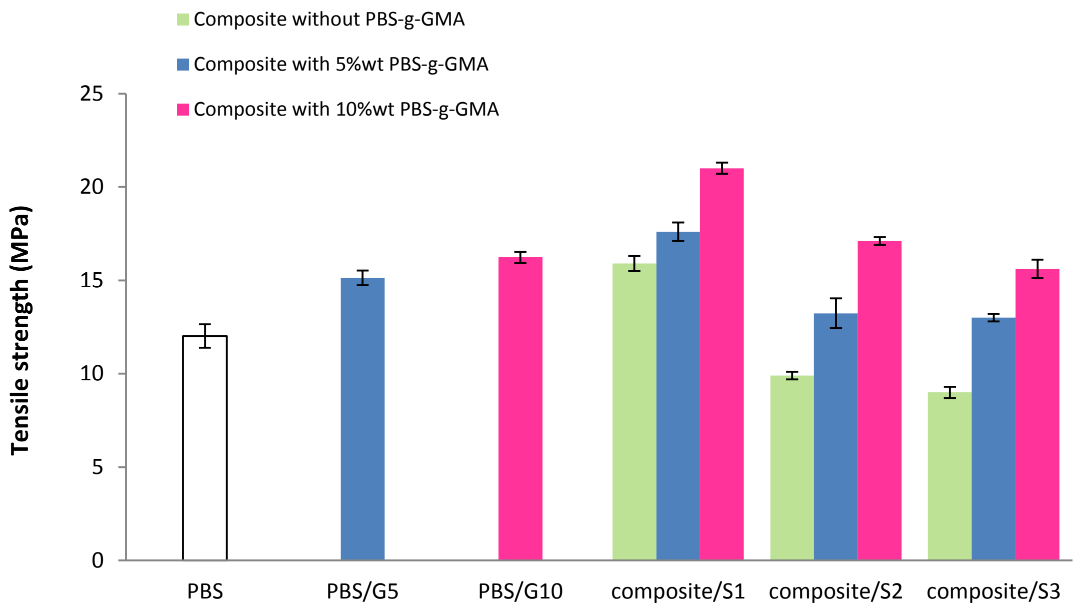
4.3.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

4.3.3.1 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

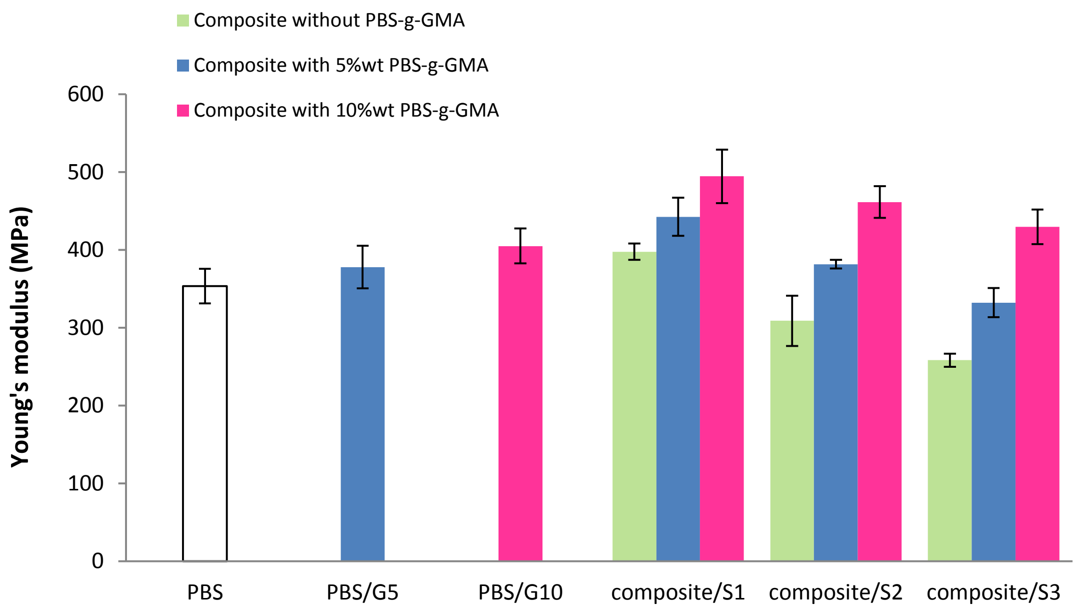
จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากฟิล์มมีปริมาณผลึกมากขึ้น ทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร สามารถอธิบายได้จากภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.6 (2-4) จะเห็นได้ว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนักซิลิกามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ทำให้เมื่อได้รับแรงจึงสามารถกระจายแรงได้ดี ส่งเสริมให้การเสริมแรงเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความทนแรงดึงจึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น พบว่าซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกัน ประกอบกับอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาต่ำ จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย นอกจากนี้ซิลิกาที่เกาะกลุ่มกันยังเป็นการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในพอลิบิวทิลีนซักซิเนต ทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตมีค่าลดลง

สำหรับฟิล์มที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้สามารถเพิ่มสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตได้ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องตามและขวางแนวเครื่องจักร เนื่องจากหมู่อิพ็อกไซด์ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่กราฟต์บนไกลซิดิลเมทาคริเลตทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาดีขึ้น พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาจึงสามารถเข้ากันได้มากขึ้น สามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.6 (5-10) ดังนั้นการกระจายแรงจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตไปยังซิลิกาจึงทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ประกอบกับซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ดีเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก

เมื่อพิจารณาปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในฟิล์มคอมพอสิต พบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงน้อยกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อาจเนื่องมาจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีน้อยเกินไป ส่งผลให้สัดส่วนของไกลซิดิลเมทาคริเลตในเมทริกซ์มีน้อยเกินไปไม่เหมาะสมกับสัดส่วนของซิลิกา ซิลิกาจึงมีโอกาสรวมกลุ่มกันและขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ปริมาณผลึกน้อย และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พอลิบิวทิลีนซักซิเนตและซิลิกาสามารถเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีเพียงพอในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกา ส่งผลให้ซิลิกาเกาะกลุ่มกันน้อยลงอีกทั้งยังช่วยให้ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ดี ปริมาณผลึกจึงสูงกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความทนแรงดึงสูงกว่า และเมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อสมบัติความทนแรงดึงในฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มคล้ายกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

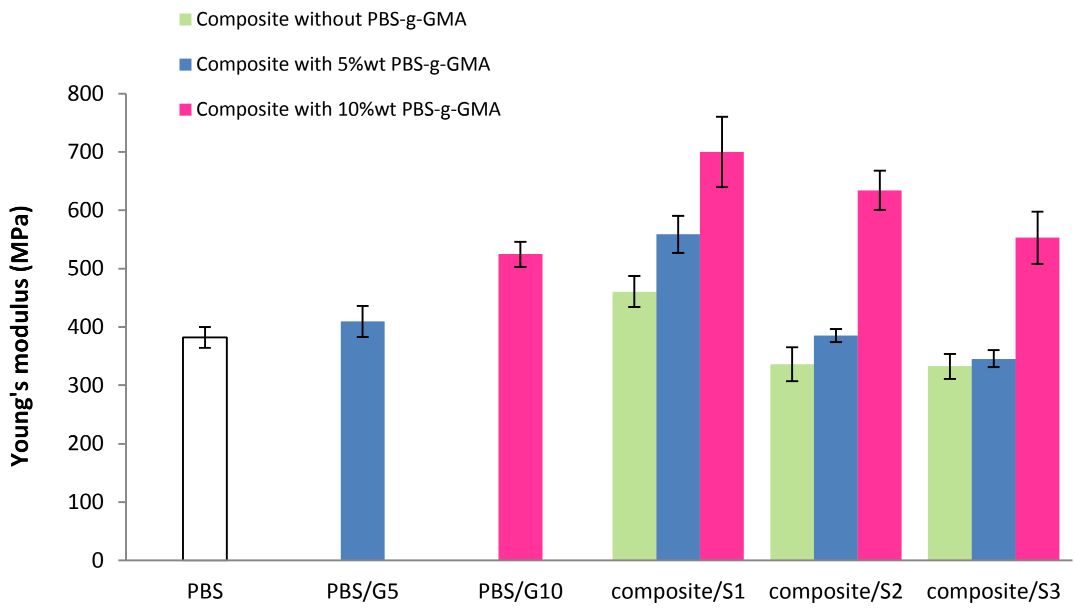
4.3.3.2 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์ยังส์มอดุลัสในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



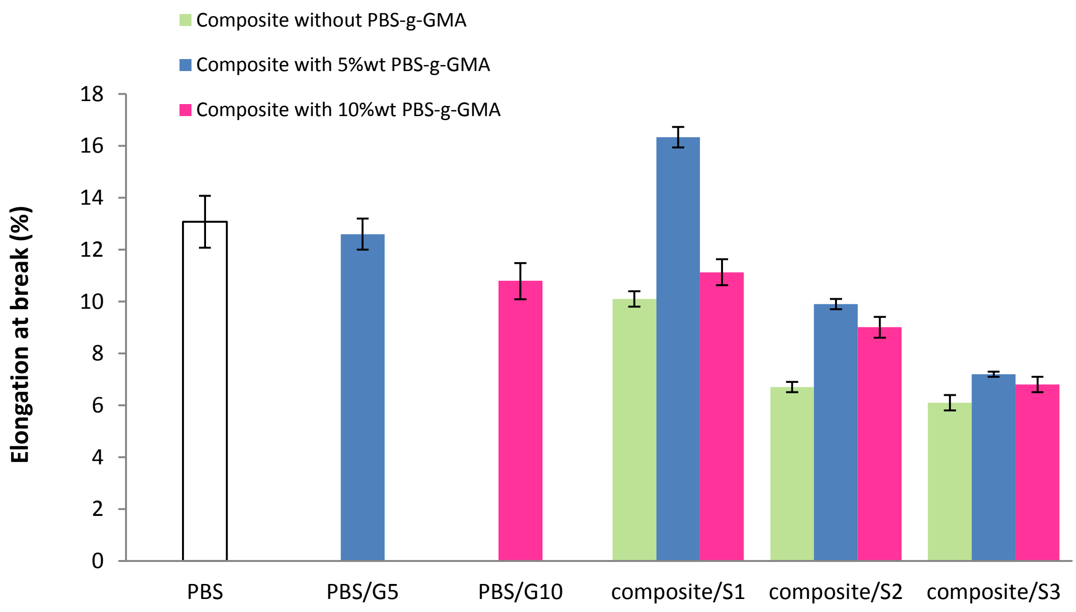
รูปที่ 4.12 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

ยังส์มอดุลัสสามารถบอกระดับความแข็งแกร่งของวัสดุหรือความสามารถในการคงรูปของวัสดุได้ ถ้าวัสดุมีค่ายังส์มอดุลัสมาก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความต้านทานการเปลี่ยนรูปหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยเมื่อมีความเค้นมากระทำมาก จากผลการทดลองพบว่ายังส์มอดุลัสมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความทนแรงดึงทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร กล่าวคือ เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่ายังส์มอดุลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ฟิล์มคอมพอสิตที่มีซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซิลิกามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ การเสริมแรงจึงเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ความต้านทานการเปลี่ยนรูปสูงกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ แต่เมื่อเติมซิลิกาในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ฟิล์มคอมพอสิตต้านทานการเปลี่ยนรูปได้น้อยลง เนื่องจากซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาต่ำ ซึ่งไม่เพียงจะส่งผลให้ซิลิกาไม่สามารถเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ได้แล้ว ยังทำหน้าที่เป็นศูนย์รวมแรงเค้น ทำให้ฟิล์มคอมพอสิตรับแรงกระทำได้น้อยลง ค่ายังส์มอดุลัสจึงลดลง

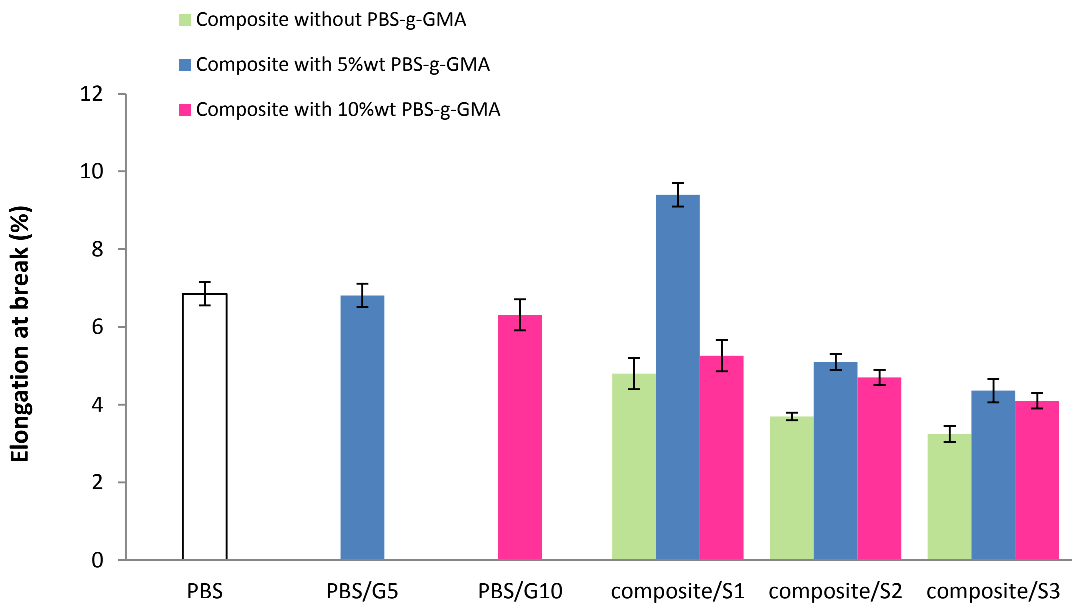
สำหรับฟิล์มที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้าได้ จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ช่วยเพิ่มความต้านทานการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานได้ เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาให้ดีขึ้น ส่งผลให้การกระจายแรงเกิดขึ้นได้ดี ทำให้การถ่ายโอนแรงจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตไปยังซิลิกาเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูป ค่ายังส์มอดุลัสจึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

4.3.3.3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



รูปที่ 4.14 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีค่าความความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง อาจเนื่องมาจากฟิล์มมีปริมาณผลึกมากขึ้น ทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้นส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นนั้นลดลง จึงทำให้ฟิล์มดึงยืดได้น้อยลง เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร เนื่องจากซิลิกาไม่มีความยืดหยุ่นเหมือนพอลิเมอร์ อีกทั้งยังทำให้อันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาต่ำ สายโซ่พอลิเมอร์จึงเคลื่อนผ่านกันได้ยากเมื่อได้รับแรงดึง เป็นผลทำให้ความสามารถในการดึงยืดของพอลิเมอร์มีค่าลดลง

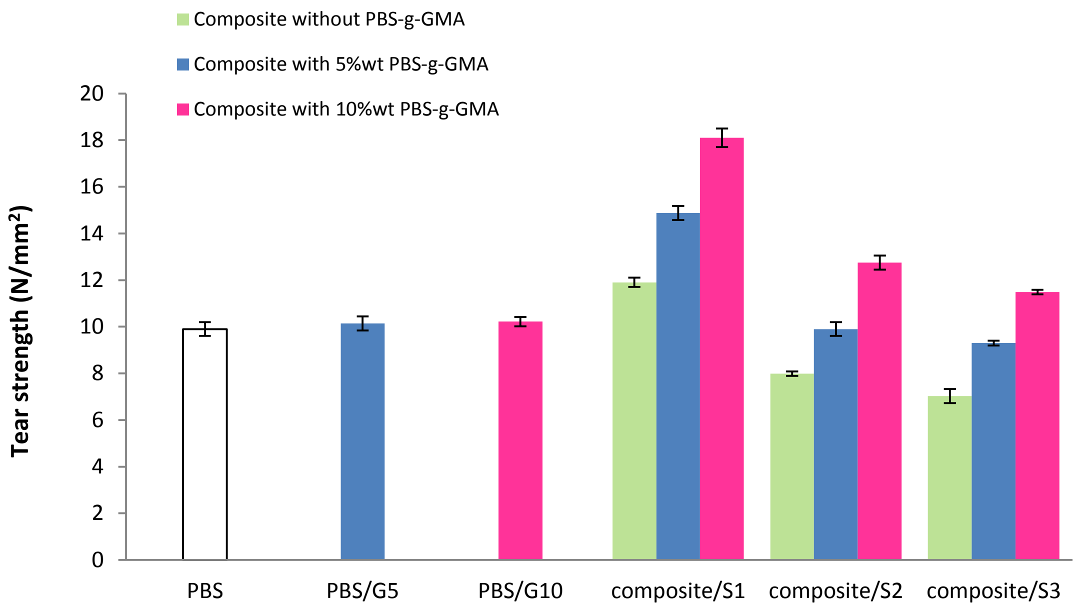
สำหรับฟิล์มคอมพอลิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้าได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจากผลการทดลอง พบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องตามและขวางแนวเครื่องจักร โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงที่สุดและสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องตามและขวางแนวเครื่องจักร เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ทำหน้าที่ปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัสของ

พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาให้ดีขึ้น ทำให้เนื้อฟิล์มคอมพอสิตมีความต่อเนื่อง ประกอบกับซิลิกากระจายตัวได้ดี จึงสามารถกระจายแรงที่มากระทำได้ดี ทำให้ดึงยืดฟิล์มคอมพอสิตได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิการ้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดน้อยกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนักและฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ อาจเนื่องมาจากมีปริมาณของไกลซิดิลเมทาคริเลตที่น้อยเกินไปไม่เหมาะสมกับสัดส่วนของซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้น ซิลิกาจึงมีโอกาสรวมกลุ่มกัน ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดจึงลดลง

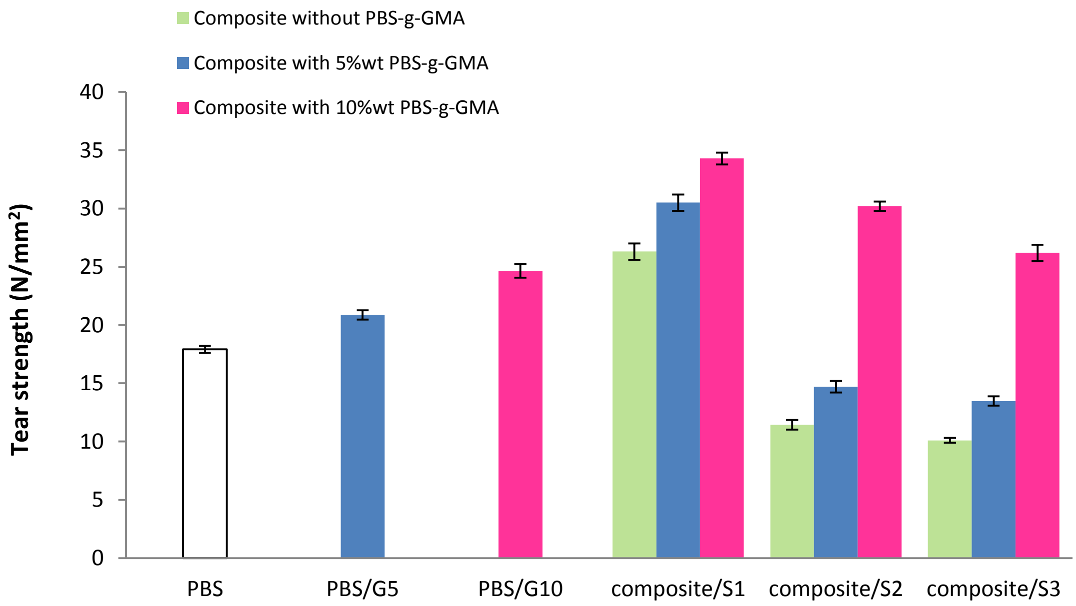
เมื่อเพิ่มปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องตามและขวางแนวเครื่องจักร เนื่องจากปริมาณของไกลซิดิลเมทาคริเลตเหมาะสมกับสัดส่วนของซิลิกา จึงช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาให้ดีขึ้น ทำให้เนื้อฟิล์มคอมพอสิตมีความต่อเนื่อง ซิลิกาจึงสามารถกระจายตัวในเนื้อฟิล์มคอมพอสิตได้ดี ทำให้ฟิล์มคอมพอสิตแข็งแรงขึ้น ดังนั้นฟิล์มคอมพอสิตจึงยืดได้น้อยลง สำหรับฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิการ้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดไม่แตกต่างกับฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.3.4 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



รูปที่ 4.16 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

จากผลการทดลองพบว่าพบว่าฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีค่าความทนแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากฟิล์มมีปริมาณผลึกมากขึ้น ทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้น จึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาด เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ความทนแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและขวางแนวเครื่องจักร ฟิล์มคอมพอสิตที่มีซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซิลิกามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ทำให้เมื่อได้รับแรงจึงสามารถกระจายแรงได้ดี ประกอบกับซิลิกาที่กระจายอยู่ไปขัดขวางการเติบโตของรอยขาด ทำให้การขาดที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปจากเส้นทางเดิม ส่งผลให้ต้องใช้แรงที่มากขึ้นเพื่อทำให้การฉีกขาดดำเนินต่อไป แต่เมื่อเติมซิลิกาในปริมาณที่มากขึ้นกลับทำให้ฟิล์มคอมพอสิตทนแรงฉีกขาดได้น้อยลง เนื่องจากซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง เมื่อมีการฉีดขาดจึงสามารถฉีกขาดได้ง่าย เนื่องจากการฉีกขาดเกิดขึ้นตามแรงที่ดึง

สำหรับฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยให้ฟิล์มคอมพอสิตทนแรงฉีกขาดได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและขวางแนวเครื่องจักร เนื่องจากหมู่อิพ็อกไซด์ของไกลซิดิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการเกาะกลุ่มของซิลิกา ซิลิกาจึงกระจายตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้แรงที่มากขึ้นเพื่อทำให้การฉีกขาดดำเนินต่อไป แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักผสมกับซิลิการ้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงฉีกขาดน้อยกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องตามและขวางแนวเครื่องจักร อาจเนื่องมาจากมีปริมาณของไกลซิดิลเมทาคริเลตที่น้อยเกินไปไม่เหมาะสมกับสัดส่วนของซิลิกา ซิลิกาจึงมีโอกาสรวมกลุ่มกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณของไกลซิดิลเมทาคริเลตมีเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา ซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อสมบัติความทนแรงฉีกขาดในฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าความทนแรงฉีกขาดมีแนวโน้มคล้ายกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

4.3.3.5 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึง ยังส์มอดุลัส และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความทนแรงดึง ยังส์มอดุลัส และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

sample	tensile strength (MPa)		Young’s modulus (MPa)		elongation at break (%)	
	MD	TD	MD	TD	MD	TD
PBS	19.9±0.8	12.0±0.6	353.4±22.2	382.1±17.4	13.1±1.0	6.9±0.3
PBS/G5	20.1±0.4	15.1±0.4	378.0±27.5	409.6±26.7	12.6±0.6	6.8±0.3
PBS/G10	21.1±0.4	16.2±0.3	405.1±22.4	524.6±21.7	10.8±0.7	6.3±0.4
PBS/S1	21.6±0.6	15.9±0.4	397.7±10.4	460.8±26.5	10.1±0.3.2	4.8±0.4
PBS/S2	11.3±0.6	9.9±0.2	308.9±32.2	336.1±29.2	6.7±0.2	3.7±0.1
PBS/S3	10.3±0.5	9.0±0.3	258.3±8.5	332.5±21.3	6.1±0.3	3.2±0.2
PBS/G5/S1	23.3±0.8	17.6±0.5	442.6±24.6	558.8±32.0	16.3±0.4	9.4±0.3
PBS/G5/S2	16.2±0.3	13.2±0.8	381.7±5.7	385.1±11.0	9.9±0	5.1±0.2
PBS/G5/S3	16.0±0.4	13.0±0.2	332.3±18.7	345.5±14.4	7.2±0.1	4.4±0.3
PBS/G10/S1	24.8±0.5	21.0±0.3	494.5±34.3	699.8±60.6	11.1±0.5	5.3±0.4
PBS/G10/S2	23.5±0.6	17.1±0.2	461.6±20.2	634.2±33.8	9.0±0.4	4.7±0.2
PBS/G10/S3	22.9±0.3	15.6±0.5	429.8±22.2	553.1±44.7	6.8±0.3	4.1±0.2

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์ม พบว่าความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักรสูงกว่าในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรในทุกตัวอย่าง เนื่องจากฟิล์มในทิศทางตามแนวเครื่องจักรสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวขนานกับทิศทางการดึง ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์จะเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalence bond) ขณะที่ฟิล์มในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวตั้งฉากกับทิศทางการดึง ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์จะเชื่อมกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ดังนั้นการดึงฟิล์มในทิศทางตามแนวเครื่องจักรจึงใช้แรงมากกว่าในการดึงฟิล์มในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร [29]

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

sample	tear strength (N/mm^2)	
	MD	TD
PBS	9.9±0.3	17.9±0.3
PBS/G5	10.1±0.3	20.9±0.4
PBS/G10	10.2±0.2	24.6±0.6
PBS/S1	11.9±0.2	26.3±0.7
PBS/S2	8.0±0.1	11.4±0.4
PBS/S3	7.0±0.3	10.1±0.2
PBS/G5/S1	14.9±0.3	30.5±0.7
PBS/G5/S2	9.9±0.3	14.7±0.5
PBS/G5/S3	9.3±0.1	13.5±0.4
PBS/G10/S1	18.1±0.4	34.3±0.5
PBS/G10/S2	12.7±0.3	30.2±0.4
PBS/G10/S3	11.5±0.1	26.2±0.7

เมื่อพิจารณาความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์ม พบว่าความทนแรงฉีกขาดในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรสูงกว่าในทิศทางตามแนวเครื่องจักรในทุกตัวอย่าง เนื่องจากฟิล์มในทิศทางตามแนวเครื่องจักรสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวขนานกับทิศทางการฉีกขาด ดังนั้นเมื่อมีการฉีกขาดจึงเกิดการฉีกขาดได้ง่าย ส่งผลให้ความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักรมีค่าน้อยกว่าความทนแรงฉีกขาดในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวตั้งฉากกับทิศทางการฉีกขาด

4.3.4 การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิต

sample	water vapor transmission rate ($g/m^2/day$)	oxygen gas transmission rate ($cm^3/m^2/day$)
PBS	93.6	172.0
PBS/G5	72.5	117.0
PBS/G10	74.1	121.0
PBS/S1	79.2	145.0
PBS/S2	110.0	229.0
PBS/S3	112.0	234.0
PBS/G5/S1	76.3	124.0
PBS/G5/S2	90.7	168.0
PBS/G5/S3	99.7	184.0
PBS/G10/S1	53.3	116.0
PBS/G10/S2	80.7	147.0
PBS/G10/S3	82.9	151.0

จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมเพียงสารเสริมสภาพเข้ากันได้มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น จึงทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่ไอน้ำและก๊าซออกซิเจนสามารถผ่านได้มีน้อย ดังนั้นไอน้ำและก๊าซออกซิเจนจึงผ่านได้น้อยลง [52]

เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกา ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมซิลิกามากขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกของฟิล์มคอมพอสิตลดลง ดังนั้นไอน้ำและก๊าซออกซิเจนจึงสามารถผ่านฟิล์มได้ง่ายขึ้น

สำหรับฟิล์มคอมพอสิตที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนน้อยกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกับซิลิกาให้ดีขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ดี ปริมาณผลึกจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นไอน้ำและก๊าซออกซิเจนจึงผ่านได้น้อยลง

นอกจากปัจจัยเรื่องปริมาณผลึกแล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนในฟิล์มคอมพอสิต คือ การกระจายตัวของซิลิกาในฟิล์มคอมพอสิต [53] กล่าวคือ เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น สามารถอธิบายได้จากภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.6 จากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนจึงต้องผ่านเส้นทางคดเคี้ยว (tortuous parthway) [54] เป็นการเพิ่มระยะทางในการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนจึงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาเป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนกลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกานั้น

มีการเกาะกลุ่มกัน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่ ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือจุดบกพร่องในฟิล์มคอมพอสิต จึงทำให้ไอน้ำและก๊าซออกซิเจนซึมผ่านได้ง่ายขึ้น [55]

สำหรับฟิล์มที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและซิลิกาดีขึ้น ทำให้ซิลิกาเกาะกลุ่มกันน้อยลง เป็นผลให้ซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนจึงลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนต เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ โดยนำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกามาเตรียมเป็นฟิล์มคอมพอสิตและใช้พอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติมเสริมแรง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สามารถเตรียมไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์บนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพื่อใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ อัตราส่วนการเตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณ 10 phr และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 2 phr

5.1.2 เมื่อนำพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกามาเตรียมเป็นฟิล์มคอมพอสิต พบว่าปริมาณซิลิการ้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มความทนแรงดึง ยังส์มอดุลัส และความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มคอมพอสิต ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง แต่เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น พบว่าสมบัติเชิงกลทั้งหมดลดต่ำลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์

5.1.3 เมื่อนำฟิล์มคอมพอสิตมาเติมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าสมบัติเชิงกลทั้งความทนแรงดึง ยังส์มอดุลัส ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความทนแรงฉีกขาด มีค่าสูงกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

5.1.4 ฟิล์มคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรมีค่าความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงกว่าฟิล์มในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร แต่เมื่อพิจารณาความทนแรงฉีกขาด พบว่าความทนแรงฉีกขาดในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรสูงกว่าความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

5.1.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าการเติมซิลิกาส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมซิลิกาและสารเสริมสภาพเข้ากันได้ส่งผลให้ปริมาณผลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

5.1.6 ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน พบว่าการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา และเมื่อมีการใส่สารเสริมสภาพเข้ากันได้ พบว่าค่าการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มคอมพอสิตลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

5.1.7 อัตราส่วนในการเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ซิลิกาคอมพอสิตที่ให้สมบัติที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ คือ การใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้และซิลิกาในปริมาณร้อยละ 5 และ 1 โดยน้ำหนักตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวเติมเสริมแรงที่มาจากธรรมชาติ เช่น แป้ง เซลลูโลส ซิลิกาจากแกลบมาเสริมแรงในพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิบิวทิลีนซักซิเนต พอลิแล็กทิกแอซิด เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายมากขึ้น

5.2.2 ศึกษาการดัดแปรซิลิกาด้วยวิธีการอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงให้กับซิลิกามากยิ่งขึ้น

Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

[1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2007. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html [1 July 2015]

[2] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) 2010. Available from: http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf [20 July 2015]

[3] สถาบันพลาสติก. ไบโอพลาสติก พอลิเมอร์แห่งอนาคต 2013. Available from: http://www.thaiplastics.org/content_attachment/attach/plastics_foresight_vol.8_.pdf [1 July 2015]

[4] Wikipedia®. Polybutylene succinate 2015. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene_succinate [20 July 2015]

[5] GreenWay. Starch | Product life cycle Available from: http://www.greenwaylink.com/product-life-cycle/life-cycle-starch/ [20 July 2015]

[6] หฤทภัค กีรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, และ อภิรัตน์ เลาห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร มก . 22(70) (พฤศจิกายน 2009 - มกราคม 2010).

[7] อรอุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2003.

[8] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. วัสดุที่เรียกว่า "คอมโพสิต (composites)" คือวัสดุประเภทใด 2013. Available from: https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-10-29-04-40-02/169-วัสดุที่เรียกว่าคอมพอสิต-composites-คือวัสดุประเภทใด [25 July 2015]

[9] Wikipedia®. Precipitated silica 2015. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Precipitated_silica [1 August 2015]

[10] Wikipedia®. Fumed silica 2015. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Fumed_silica [1 August 2015]

[11] Wen, X., et al. Thermomechanical and optical properties of biodegradable poly (L-lactide)/silica nanocomposites by melt compounding. Journal of Applied Polymer Science 114(6) (2009): 3379-3388.

[12] Avella, M., et al. Poly (ε-caprolactone)-based nanocomposites: Influence of compatibilization on properties of poly (ε-caprolactone)–silica nanocomposites. Composites Science and Technology 66(7) (2006): 886-894.

[13] ชาริณี วิโนทพรรษ์. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน / แป้ง / แป้งดัดแแปร. ปริญญานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2005.

[14] Diop, M.F. and Torkelson, J.M. Maleic anhydride functionalization of polypropylene with suppressed molecular weight reduction via solid-state shear pulverization. Polymer 54(16) (2013): 4143-4154.

[15] Ultracki, L.A. Polymer Blends Handbook. Vol. 1. Dordrecht: Kluwer Academic 2002.

[16] Wikipedia®. Glycidyl methacrylate 2015. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Glycidyl_methacrylate [17 August 2015]

[17] Reis, A.V., et al. Reaction of glycidyl methacrylate at the hydroxyl and carboxylic groups of poly (vinyl alcohol) and poly (acrylic acid): is this reaction mechanism still unclear? The Journal of organic chemistry 74(10) (2009): 3750-3757.

[18] Li, Q., Wang, D.-a., and Elisseeff, J.H. Heterogeneous-phase reaction of glycidyl methacrylate and chondroitin sulfate: mechanism of ring-opening-transesterification competition. Macromolecules 36(7) (2003): 2556-2562.

[19] Al-Malaika, S. and Kong, W. Reactive processing of polymers: effect of in situ compatibilisation on characteristics of blends of polyethylene terephthalate and ethylene-propylene rubber. Polymer 46(1) (2005): 209-228.

[20] 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.

[21] Chuai, C.Z., Zhao, N., Li, S., and Sun, B.X. Study on PLA/PBS blends. Advanced Materials Research, 197 (2011): 1149-1152.

[22] Parvinzadeh, M., Moradian, S., Rashidi, A., and Yazdanshenas, M.-E. Surface characterization of polyethylene terephthalate/silica nanocomposites. Applied Surface Science 256(9) (2010): 2792-2802.

[23] ดรรชนี พัทธวรากร. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ (Polymer Processing Technology) 2013.

[24] อโนดาษ์ รัชเวทย์. พอลิเมอร์ (Polymer). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ดวงกมลพับลิชชิ่ง, 2009.

[25] Lab Procurement Services (LLC). Labcon - The Best Value in Pipet Tips 2015 Available from: http://www.labproservices.com/Blog/Client-Updates/Finding-a-Quality-Tip-Manufacturer [23 August 2015]

[26] บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด. ความสำคัญของ Extrusion Condition สำหรับงาน Extrusion Coating 2013. Available from: http://www.scgchemicals.co.th/th/service/commercial/technical-knowledge-library/1474/ [23 August 2015]

[27] Davis-Standard LLC. Twin-screw extruders Available from: http://www.plastics.com/extrusion-equipment/extrusion-whatis-pg2.html [23 August 2015]

[28] เจริญ นาคะสวรรค์. เทคโนโลยีพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 1999.

[29] สุภาวิณี เสรีลัดดานนท์. การเตรียมและสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเสริมแรงด้วยซิลิกา. ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณีมหาวิทยาลัย, 2013.

[30] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. บทที่ 2 การจำแนกและการจัดกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติก Available from: http://www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/plastic/chapter1-2.pdf [23 August 2015]

[31] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิล์ม. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2003.

[32] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. Plastic film/ฟิล์มพลาสติก Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3633/plastic-film-ฟิล์มพลาสติก [27 August 2015]

[33] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สาระน่ารู้ : บรรจุภัณฑ์ฉลาด : นวัตกรรมยืดอายุผักผลไม้ 2013. Available from: https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/84- [27 August 2015]

[34] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. Active packaging / บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1887/active-packaging [27 August 2015]

[35] Han, S.-I., Lim, J.S., Kim, D.K., Kim, M.N., and Im, S.S. In situ polymerized poly (butylene succinate)/silica nanocomposites: physical properties and biodegradation. Polymer Degradation and Stability 93(5) (2008): 889-895.

[36] Jacquel, N., Saint-Loup, R., Pascault, J.P., Rousseau, A., and Fenouillot, F. Structure-properties relationship of in situ synthesized poly(butylene succinate)/silica nanocomposites: Application in extrusion blowing of films. Macromolecular Materials and Engineering 299(8) (2014): 977-989.

[37] Bian, J., et al. Nonisothermal crystallization behavior and mechanical properties of poly (butylene succinate)/silica nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science 116(2) (2010): 902-912.

[38] Khankrua, R., Pivsa-Art, S., Hiroyuki, H., and Suttiruengwong, S. Thermal and mechanical properties of biodegradable polyester/silica nanocomposites. Energy Procedia 34 (2013): 705-713.

[39] Mani, R., Bhattacharya, M., and Tang, J. Functionalization of polyesters with maleic anhydride by reactive extrusion. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry 37(11) (1999): 1693-1702.

[40] Xiuju, Z., Juncai, S., Huajun, Y., Zhidan, L., and Shaozao, T. Mechanical properties, morphology, thermal performance, crystallization behavior, and kinetics of PP/microcrystal cellulose composites compatibilized by two different compatibilizers. Journal of Thermoplastic Composite Materials 24(6) (2011): 735-754.

[41] Aggarwal, P.K., Chauhan, S., Raghu, N., Karmarkar, S., and Shashidhar, G. Mechanical properties of bio-fibers-reinforced high-density polyethylene composites: effect of coupling agents and bio-fillers. Journal of Reinforced Plastics and Composites 32(22) (2013): 1722-1732.

[42] Feng, Y., Hu, Y., Yin, J., Zhao, G., and Jiang, W. High impact poly (lactic acid)/poly (ethylene octene) blends prepared by reactive blending. Polymer Engineering & Science 53(2) (2013): 389-396.

[43] Phua, Y., Chow, W., and Ishak, Z.M. Reactive processing of maleic anhydride-grafted poly (butylene succinate) and the compatibilizing effect on poly (butylene succinate) nanocomposites. Express Polymer Letters 7(4) (2013): 340-354.

[44] Andreasson E., Mehmood N., and Kao-Walter S. Trouser tear tests of two thin polymer films 2013. Available from: http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/icf13/paper/viewFile/11465/10844 [1 September 2015]

[45] MOCON Inc. Water vapor measurement instrument 2013. Available from: http://www.packworld.com/machinery/inspection/mocon-inc-water-vapor-measurement-instrument [1 September 2015]

[46] Systech Instruments Ltd. Modular systems for precision oxygen analysis of packaging film barriers Available from: http://www.systechillinois.com/media/e321c1d7/8000.pdf [3 September 2015]

[47] Music, S., Filipović-Vincekovic, N., and Sekovanic, L. Precipitation of amorphous SiO_2 particles and their properties. Brazilian Journal of Chemical Engineering 28(1) (2011): 89-94.

[48] สิทธิพงษ์ อำนวยพาณิชย์. กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน. วารสารวิจัย มข. 2004: มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 82-96.

[49] Phua, Y., Chow, W., and Mohd Ishak, Z. Organomodification of montmorillonite and its effects on the properties of poly (butylene succinate) nanocomposites. Polymer Engineering & Science 53(9) (2013): 1947-1957.

[50] Xu, W., Liang, G., Wang, W., Tang, S., He, P., and Pan, W.P. Poly (propylene)–poly (propylene)-grafted maleic anhydride–organic montmorillonite (PP–PP-g-

MAH–Org-MMT) nanocomposites. II. Nonisothermal crystallization kinetics. Journal of Applied Polymer Science 88(14) (2003): 3093-3099.

[51] Praphulla. Studies on reactive blends of poly (hydroxybutyrate-co-valerate) and poly (butylene succinate) bioplastics. Master's Thesis, Department of Applied Science, Faculty of Engineering University of Guelph, Canada, 2012.

[52] Mittal, V. Crystallinity, mechanical property and oxygen permeability of polypropylene Effect of processing conditions, nucleating agent and compatibilizer. Journal of Thermoplastic Composite Materials 26(10) (2013): 1407-1423.

[53] Paula Wood-Adams. GCH 6101-Polymer – Diffusion Available from: http://users.encs.concordia.ca/~woodadam/GCH6101/Diffusion%20and%20permeability%20in%20polymers.pdf [25 November 2015]

[54] Zenkiewicz, M., Richert, J., and Rozanski, A. Effect of blow moulding ratio on barrier properties of polylactide nanocomposite films. Polymer Testing 29(2) (2010): 251-257.

[55] ฉัตรเกล้า มะชะศร และ ดร.สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม. ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีน-เถ้าแกลบที่ก๊าซซึมผ่านได้. *Graduate Research Conference*. 2013: Khon Kaen University. 215-220.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ขนาดอนุภาคซิลิกา

ตาราง ก-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิกา

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณ (%)	ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณ (%)
0.011	0	0.196	0
0.012	0	0.225	0
0.014	0	0.258	0
0.016	0	0.296	0
0.019	0	0.340	0
0.022	0	0.390	0
0.025	0	0.448	0
0.028	0	0.515	0
0.033	0	0.591	0
0.038	0	0.678	0
0.043	0	0.778	0
0.049	0	0.894	0
0.056	0	1.026	0.03
0.065	0	1.178	0.11
0.074	0	1.352	0.24
0.085	0	1.553	0.39
0.098	0	1.783	0.54
0.113	0	2.047	0.64
0.129	0	2.350	0.65
0.148	0	2.698	0.59
0.170	0	3.098	0.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณ (%)	ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณ (%)
3.557	0.52	195.450	0.35
4.084	0.8	224.407	0.19
4.689	1.47	257.653	0.08
5.383	2.56	295.826	0
6.181	4	339.653	0
7.097	5.55	389.974	0
8.148	6.95	447.750	0
9.355	7.86	514.086	0
10.741	8.16	590.249	0
12.333	7.87	677.697	0
14.160	7.19	778.100	0
16.257	6.39	893.379	0
18.666	5.59	1025.736	0
21.431	4.85	1177.702	0
24.606	4.17	1352.183	0
28.252	3.58	1552.514	0
32.437	3.04	1782.524	0
37.243	2.57	2046.612	0
42.760	2.16	2349.824	0
49.095	1.8	2697.959	0
56.369	1.51	3097.672	0
64.720	1.28	3556.603	0
74.308	1.11	4083.526	0
85.317	0.99	4688.515	0
97.957	0.91	5383.136	0
112.470	0.84	6180.667	0
129.132	0.76	7096.355	0
148.264	0.65	8147.706	0
170.230	0.51	9354.818	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

ตาราง ข-1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (0.031 M) ที่ใช้ในการไทเทรตไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 5 phr

ปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (phr)	ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ml)				
	average (g)	1	2	3	average
blank	1.03	40.5	40.3	40.0	40.3
1.0	1.05	39.1	39.5	39.9	39.5
1.5	1.00	35.5	36.6	37.1	36.4
2.0	0.97	34.3	32.5	31.7	32.8
2.5	1.04	33.5	32.4	32.8	32.9
3.0	1.02	34.3	32.5	31.7	32.8

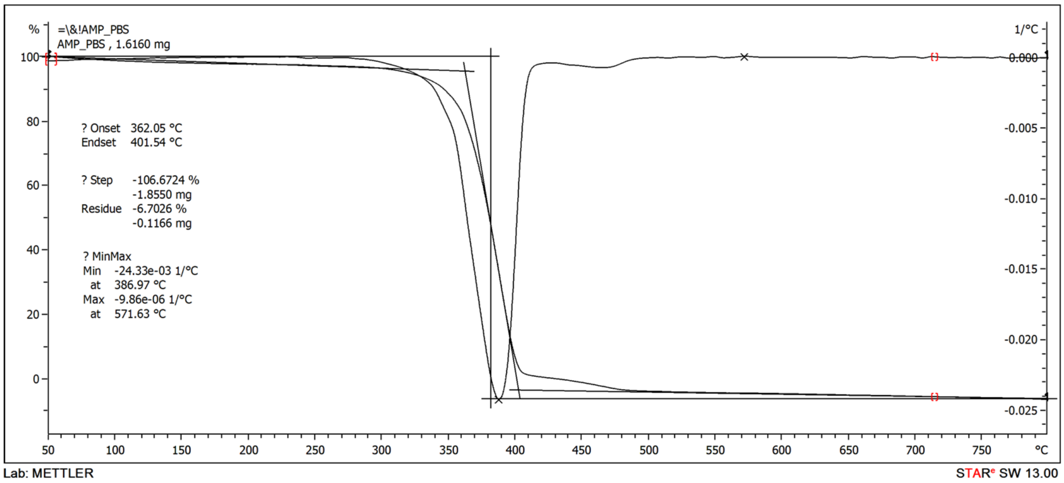
ตาราง ข-2 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (0.025 M) ที่ใช้ในการไทเทรตไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 10 phr

ปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (phr)	ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ml)				
	average (g)	1	2	3	average
blank	1.00	27.2	26.8	28.4	27.5
1.0	0.97	24.6	23.4	23.8	23.9
1.5	1.09	24.6	24.0	24.3	24.3
2.0	1.06	25.9	25.1	24.3	25.1
2.5	1.07	26.7	26.4	26.0	26.4
3.0	0.96	27.8	26.5	27.1	27.1

ภาคผนวก ค

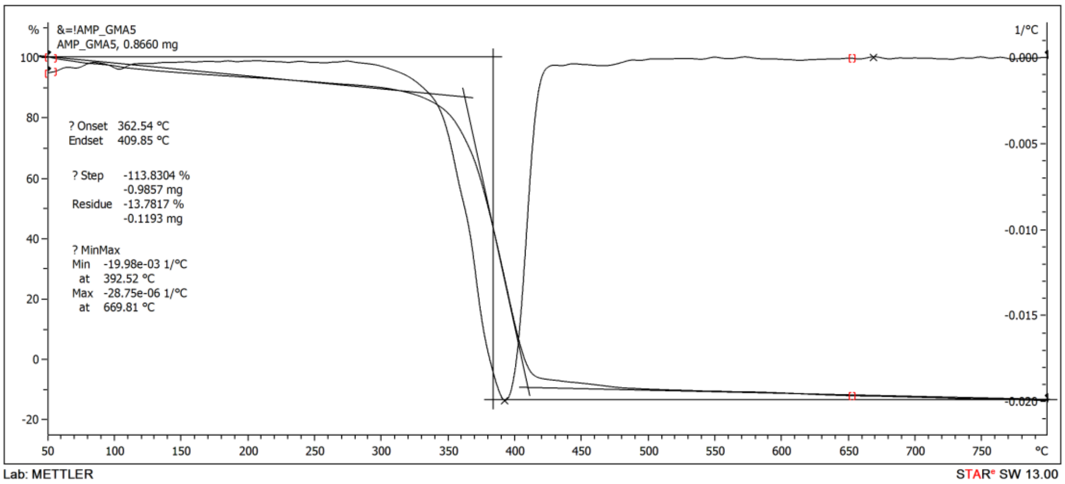
TGA Thermogram ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต

1. พอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์



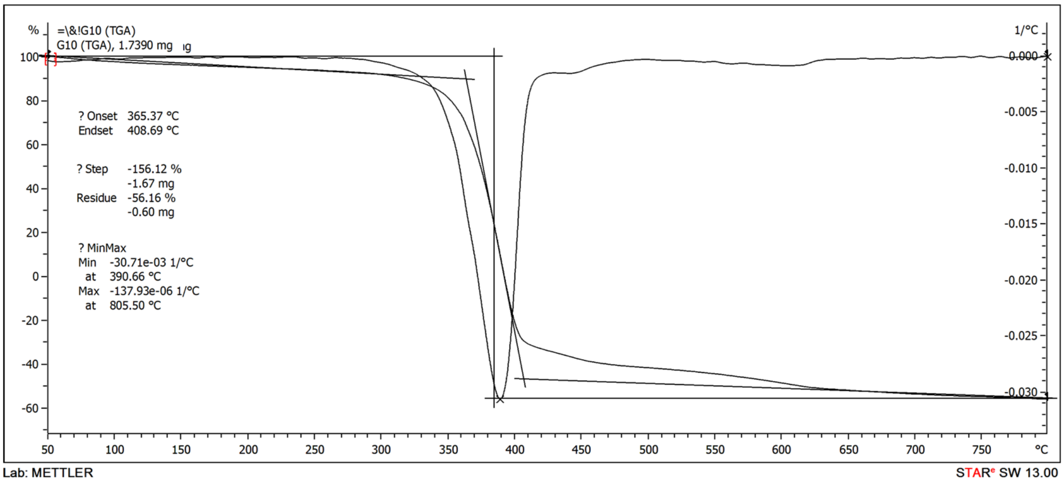
รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรมของ PBS

2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



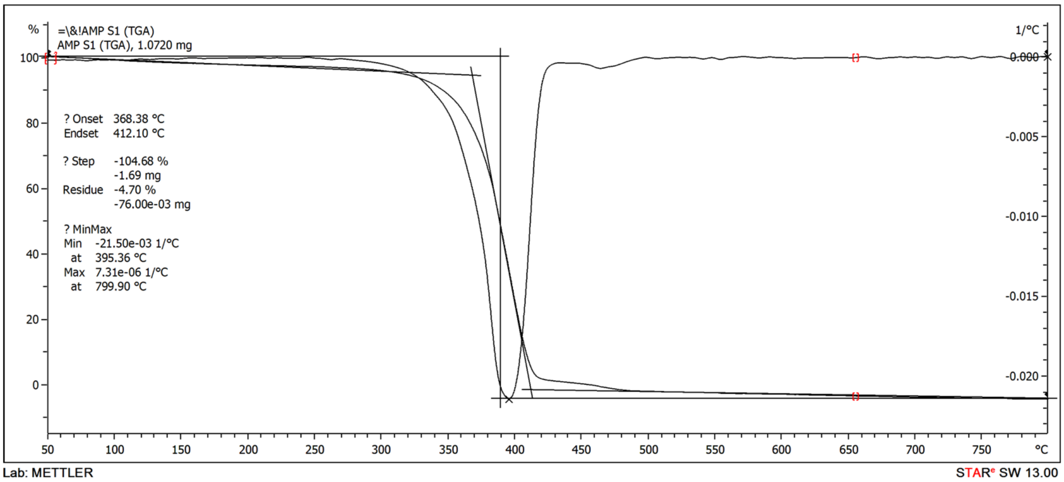
รูปที่ ค-2 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



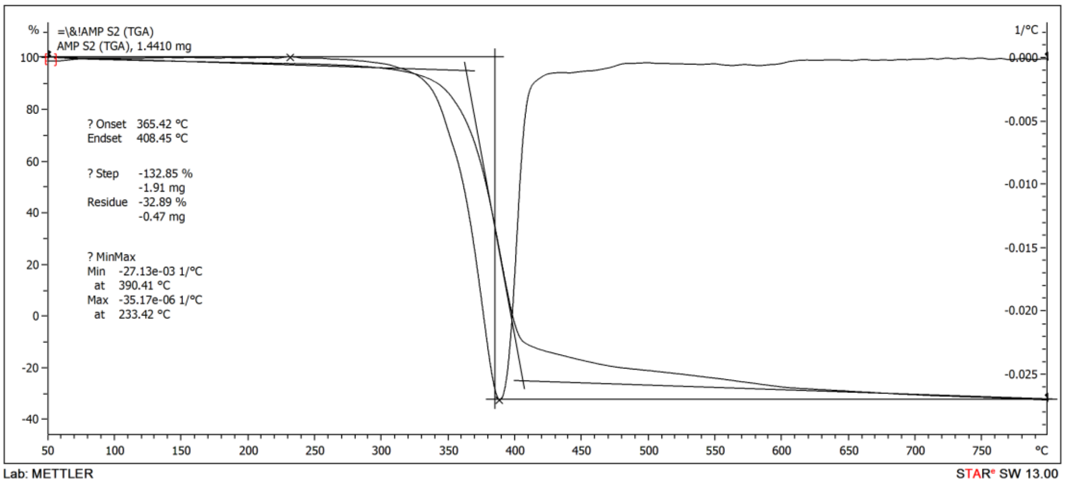
รูปที่ ค-3 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10

4. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



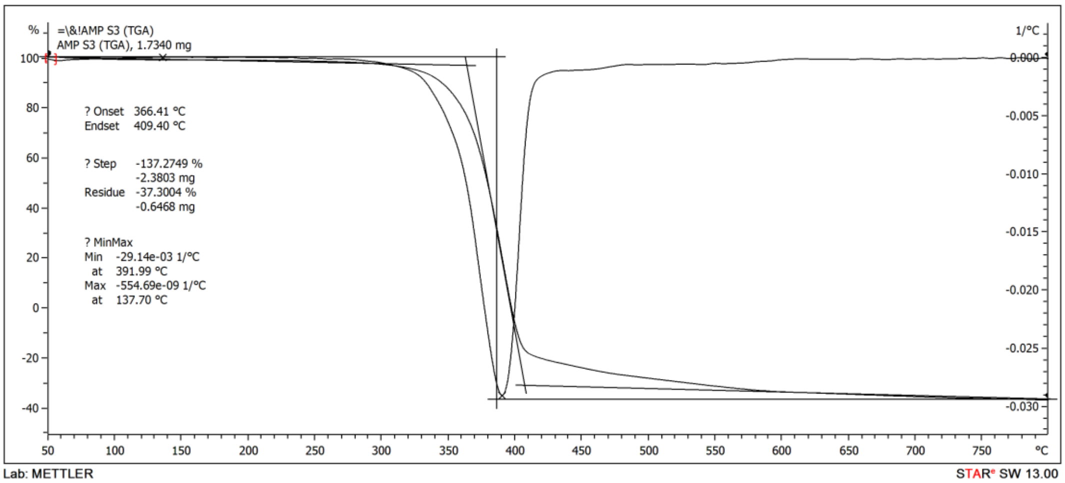
รูปที่ ค-4 เทอร์โมแกรมของ PBS/S1

5. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



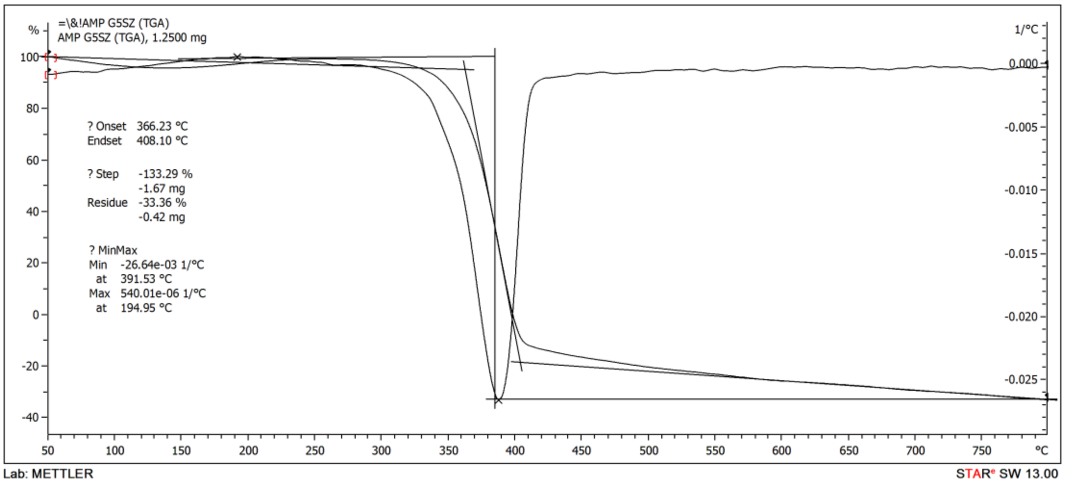
รูปที่ ค-5 เทอร์โมแกรมของ PBS/S2

6. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



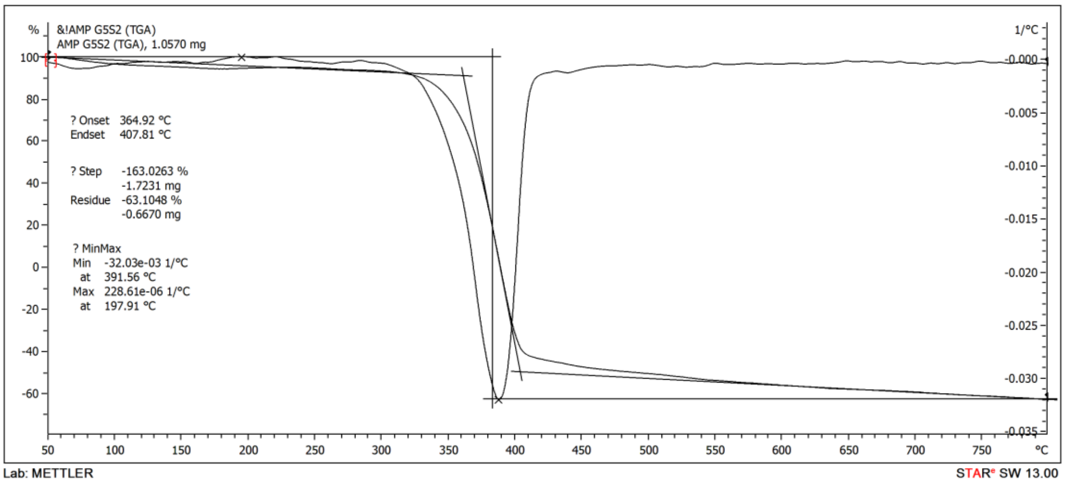
รูปที่ ค-6 เทอร์โมแกรมของ PBS/S3

7. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



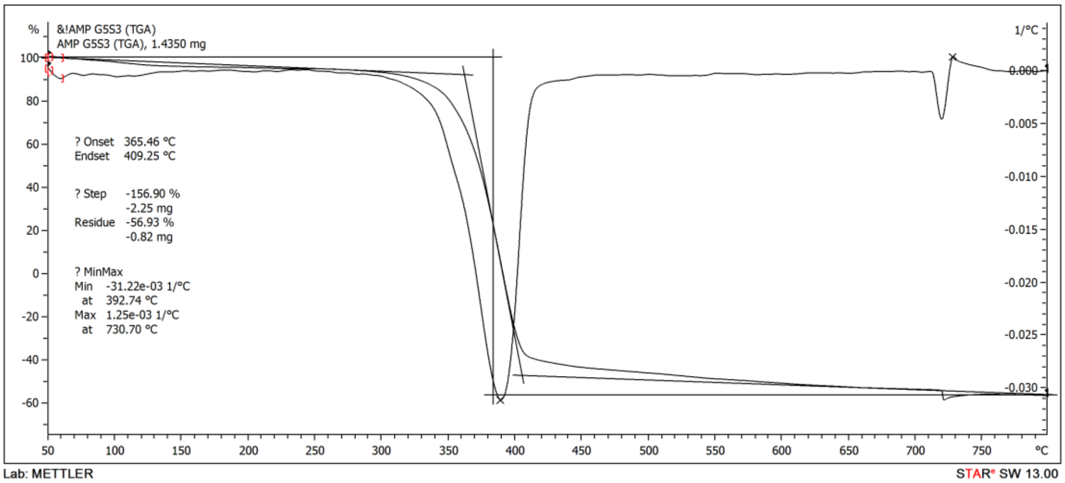
รูปที่ ค-7 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S1

8. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



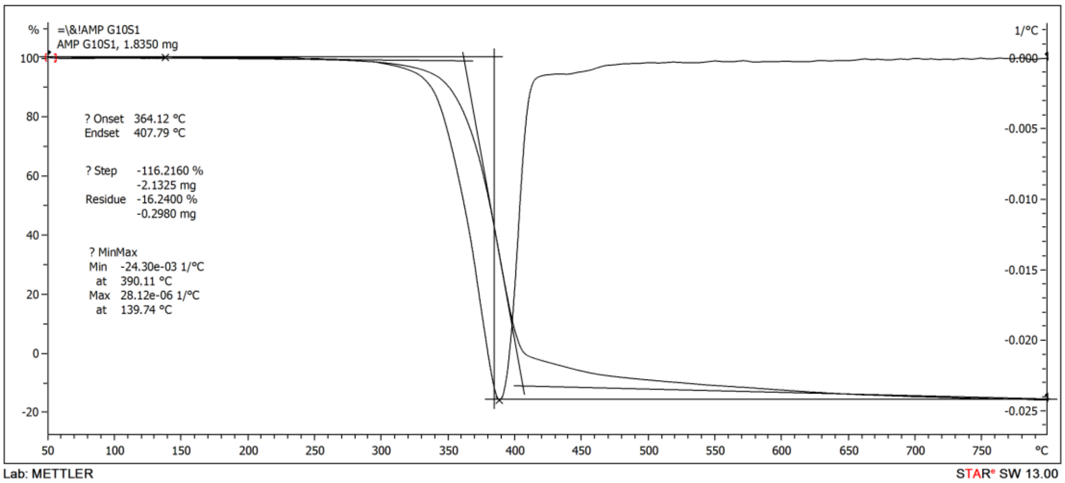
รูปที่ ค-8 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S2

9. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



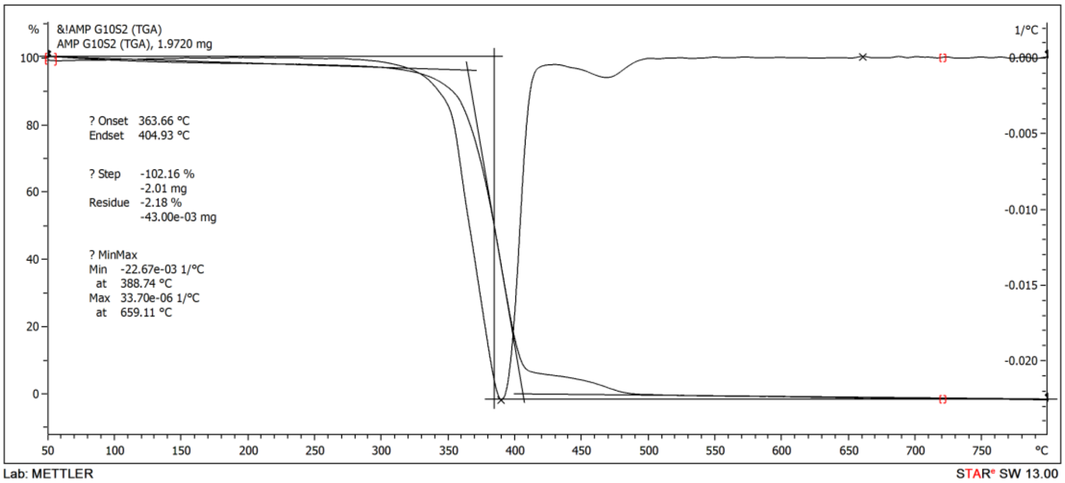
รูปที่ ค-9 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S3

10. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



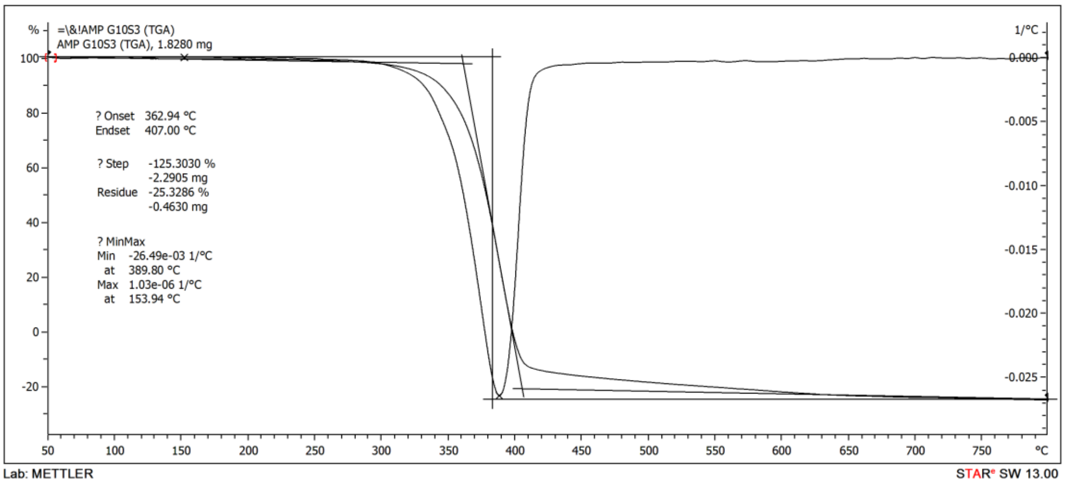
รูปที่ ค-10 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S1

11. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



รูปที่ ค-11 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S2

12. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

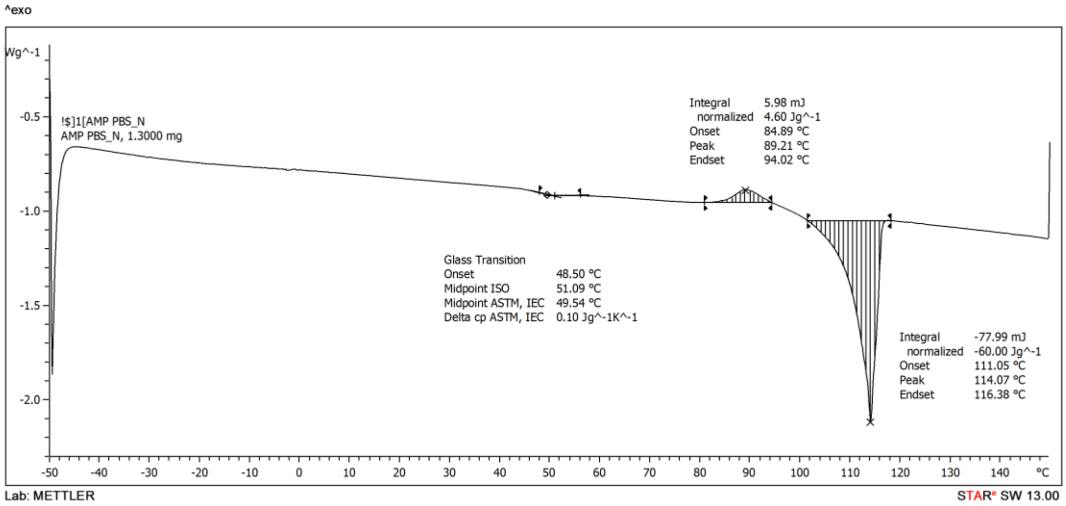


รูปที่ ค-12 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S3

ภาคผนวก ง

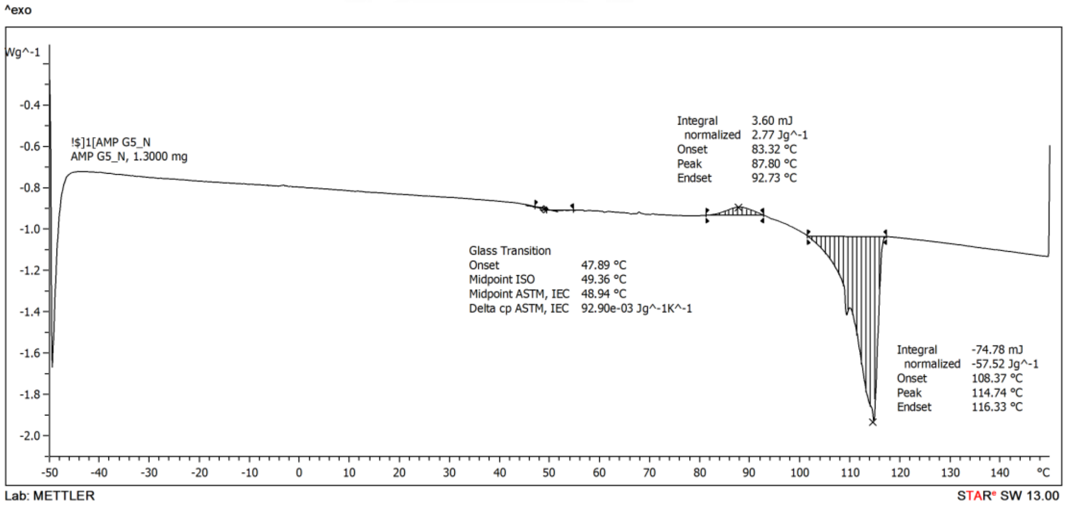
DSC Thermogram (first heat) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต

1. พอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์



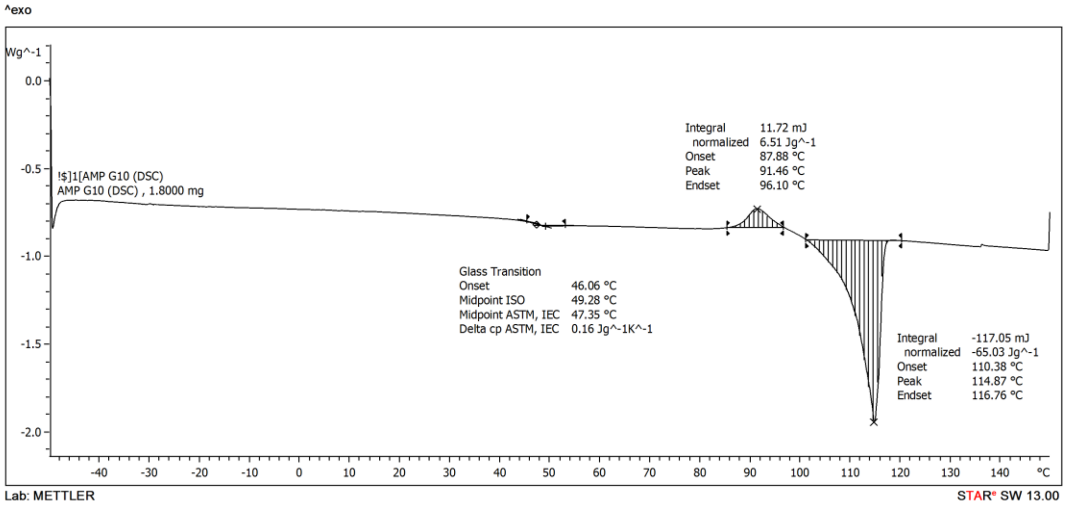
รูปที่ ง-1 เทอร์โมแกรมของ PBS

2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



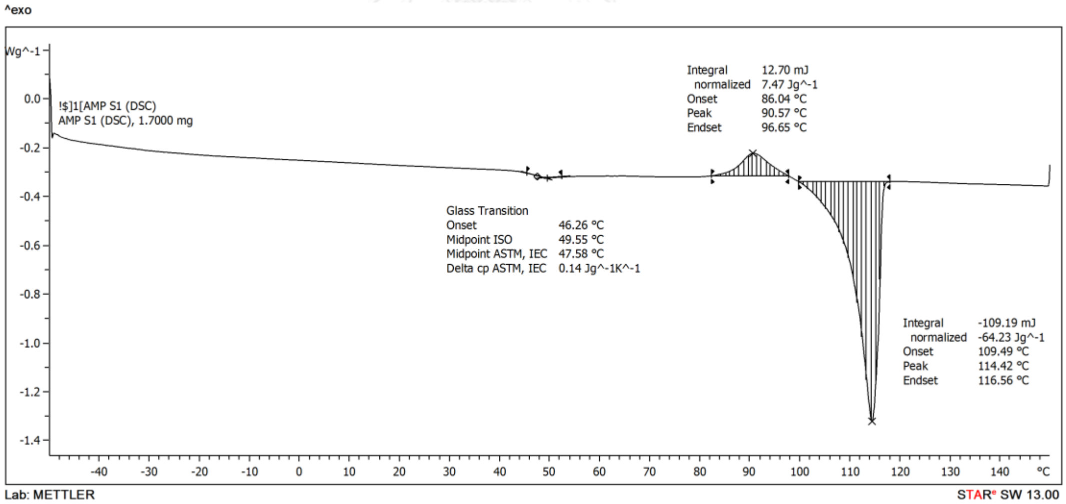
รูปที่ ง-2 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



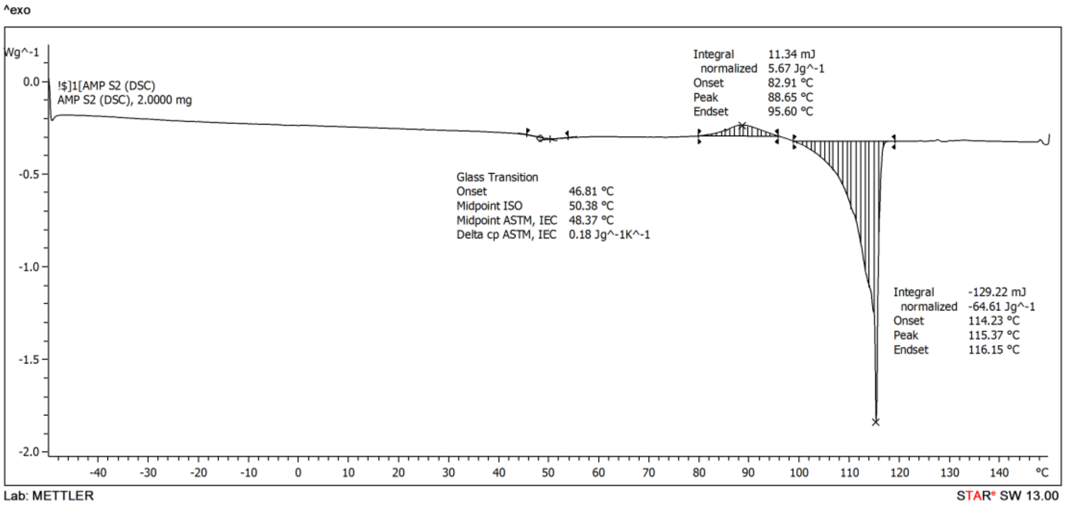
รูปที่ ง-3 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10

4. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



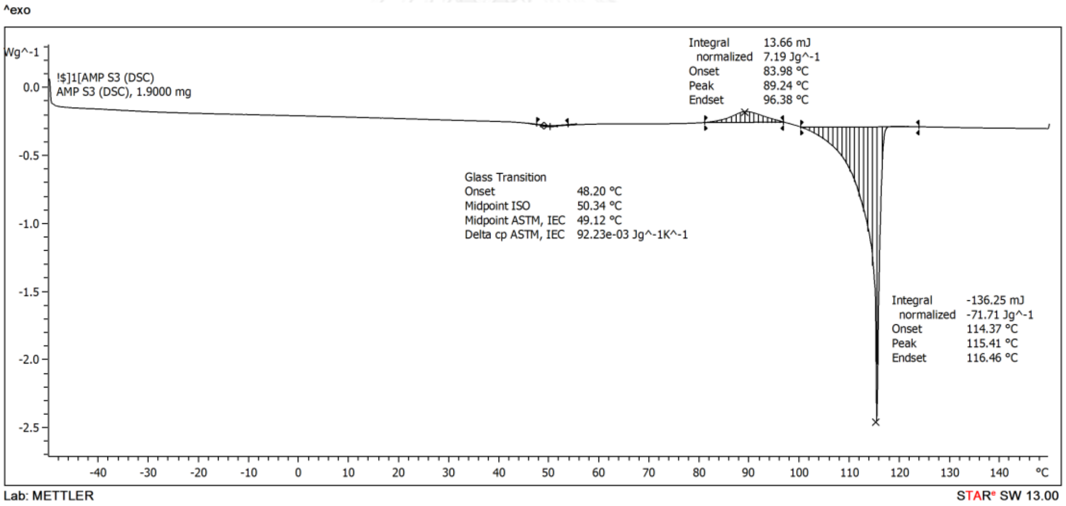
รูปที่ ง-4 เทอร์โมแกรมของ PBS/S1

5. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



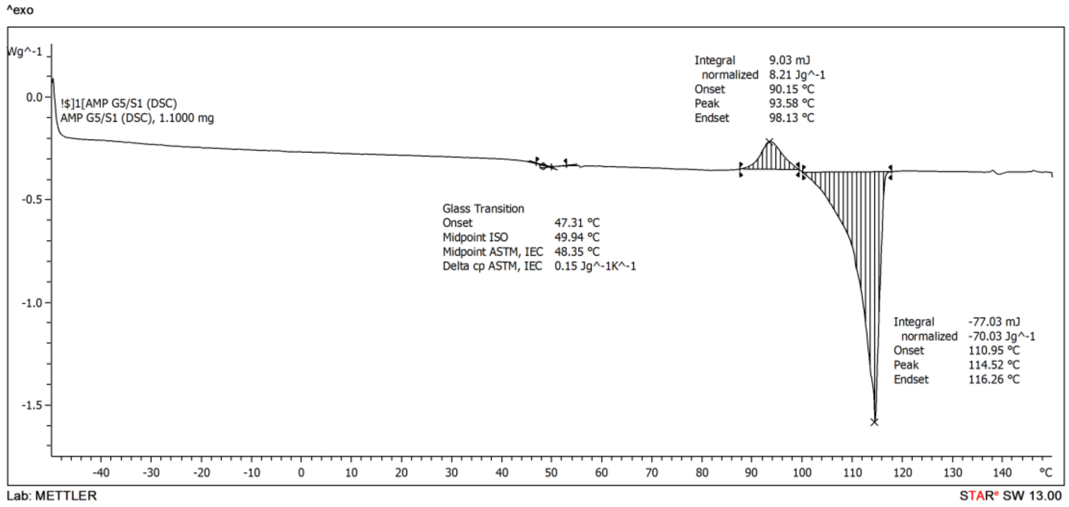
รูปที่ ง-5 เทอร์โมแกรมของ PBS/S2

6. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



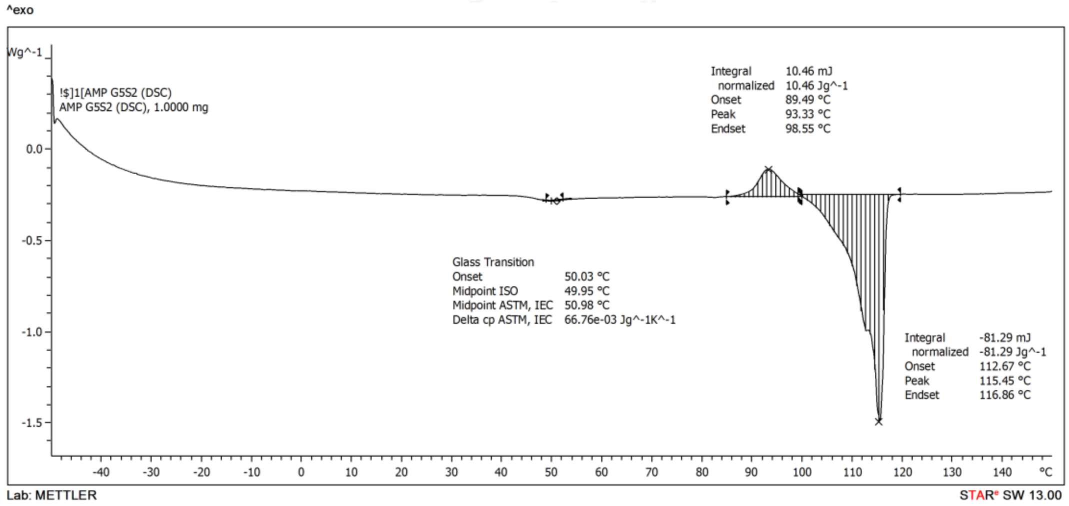
รูปที่ ง-6 เทอร์โมแกรมของ PBS/S3

7. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



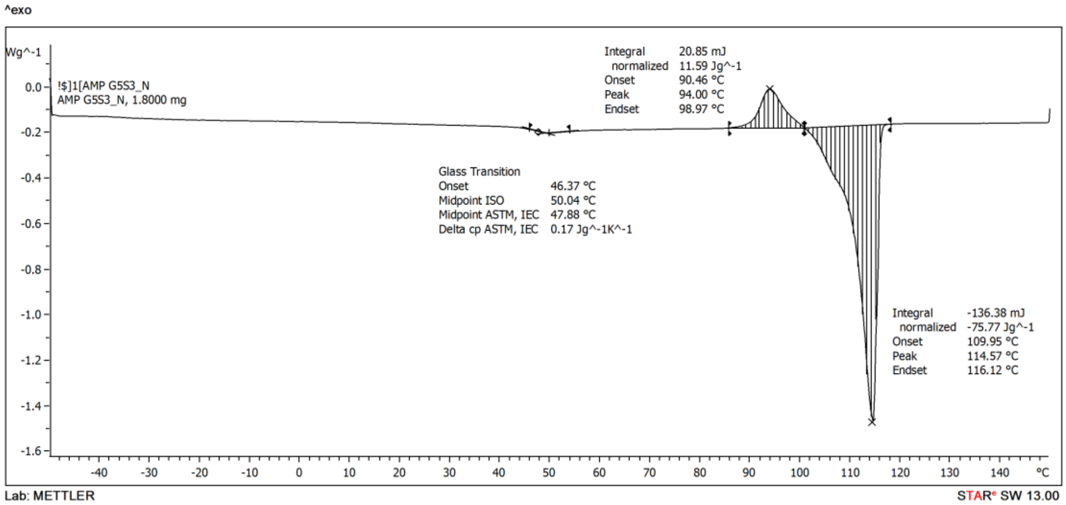
รูปที่ ง-7 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S1

8. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



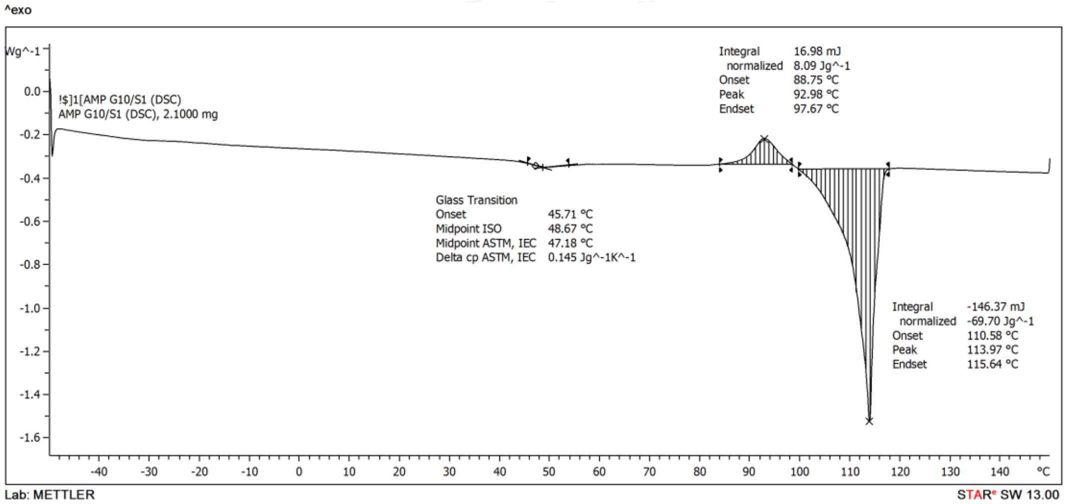
รูปที่ ง-8 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S2

9. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



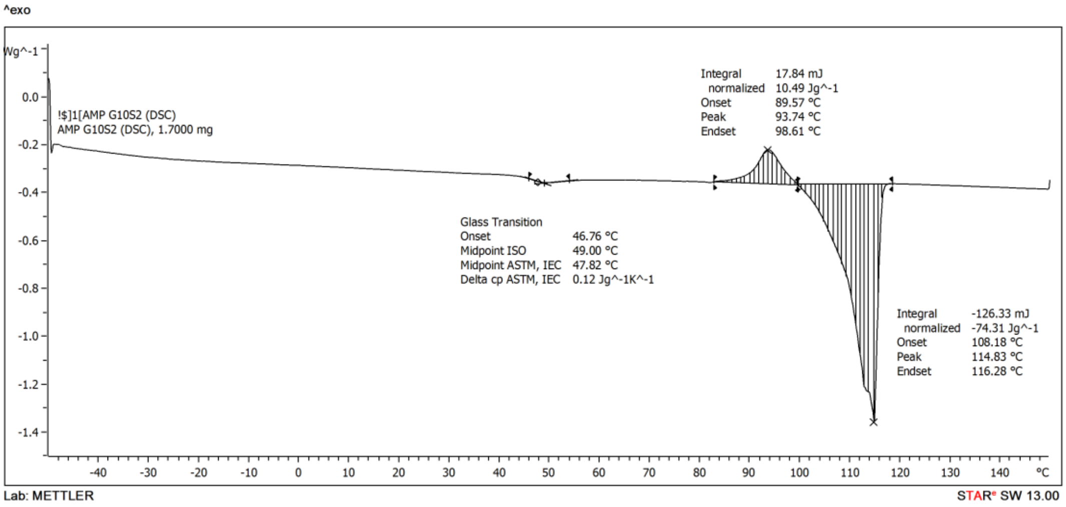
รูปที่ ง-9 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S3

10. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



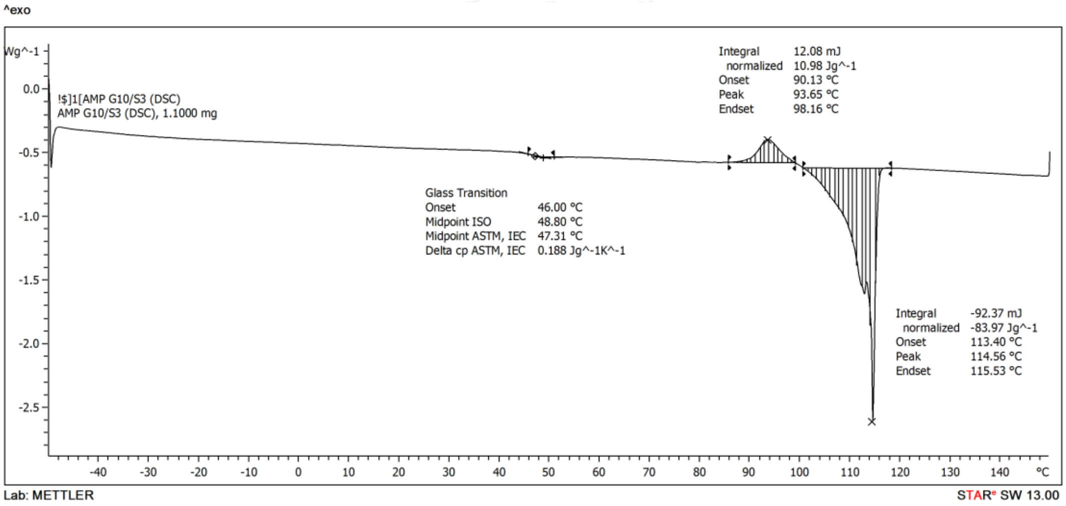
รูปที่ ง-10 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S1

11. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



รูปที่ ง-11 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S2

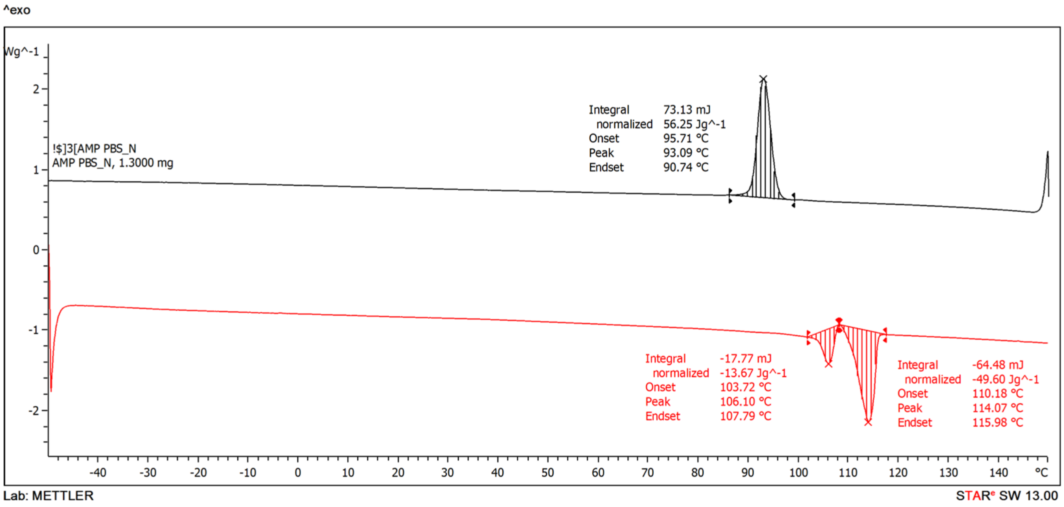
12. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



รูปที่ ง-12 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S3

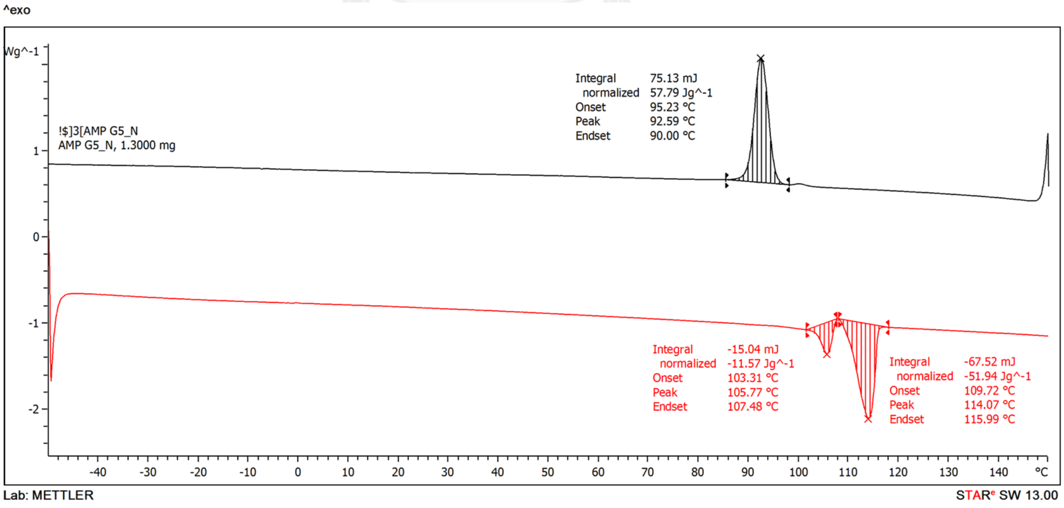
DSC Thermogram (second heat) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต

1. พอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์



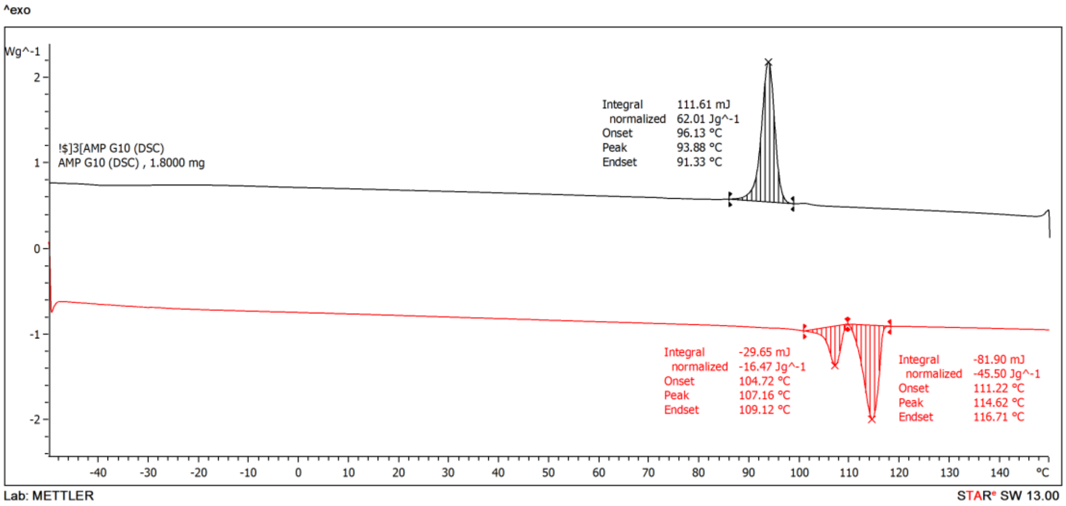
รูปที่ ง-13 เทอร์โมแกรมของ PBS

2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



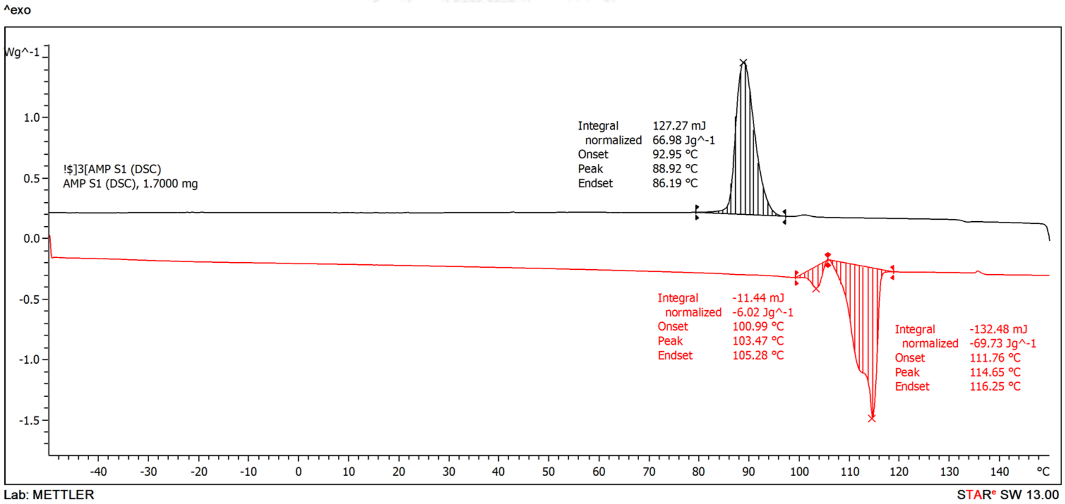
รูปที่ ง-14 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



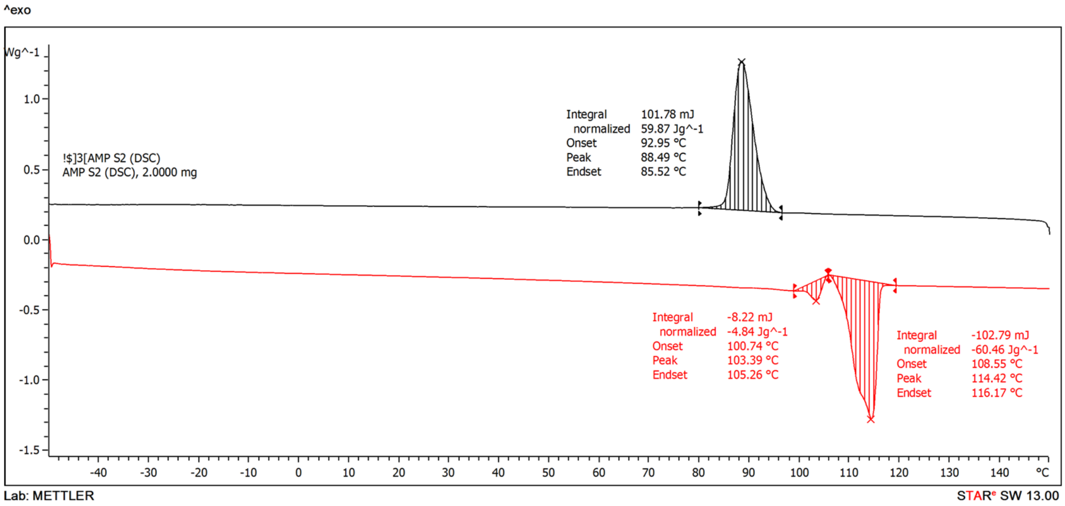
รูปที่ ง-15 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10

4. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



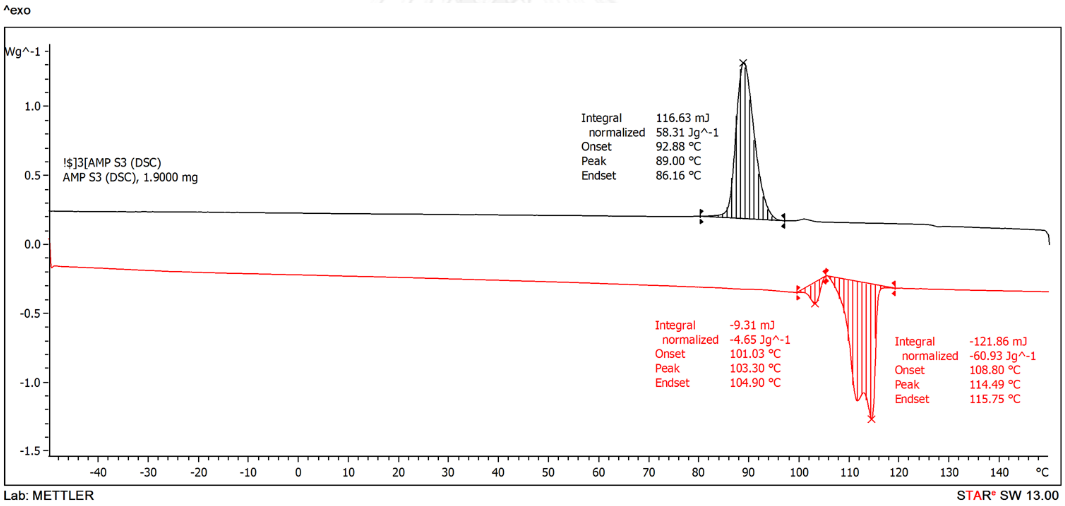
รูปที่ ง-16 เทอร์โมแกรมของ PBS/S1

5. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



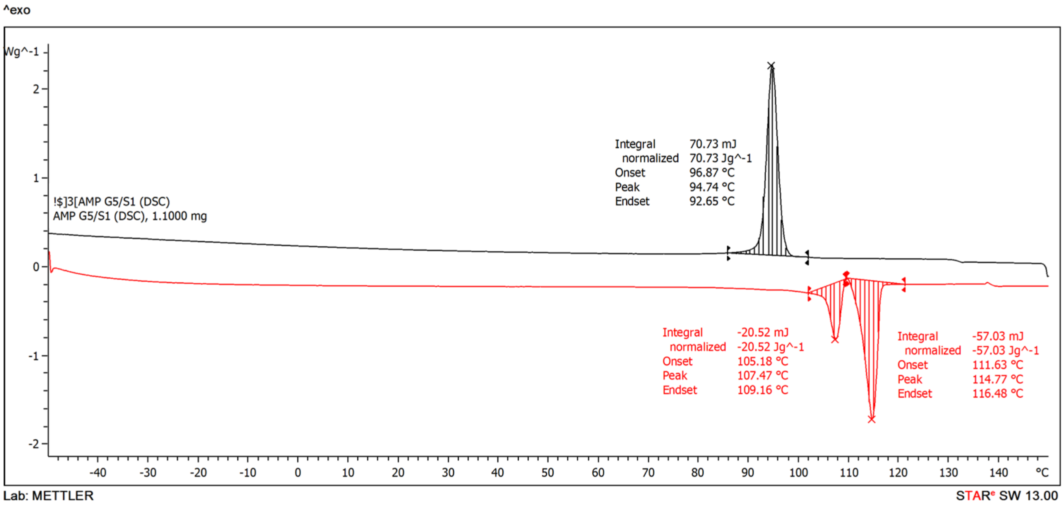
รูปที่ ง-17 เทอร์โมแกรมของ PBS/S2

6. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



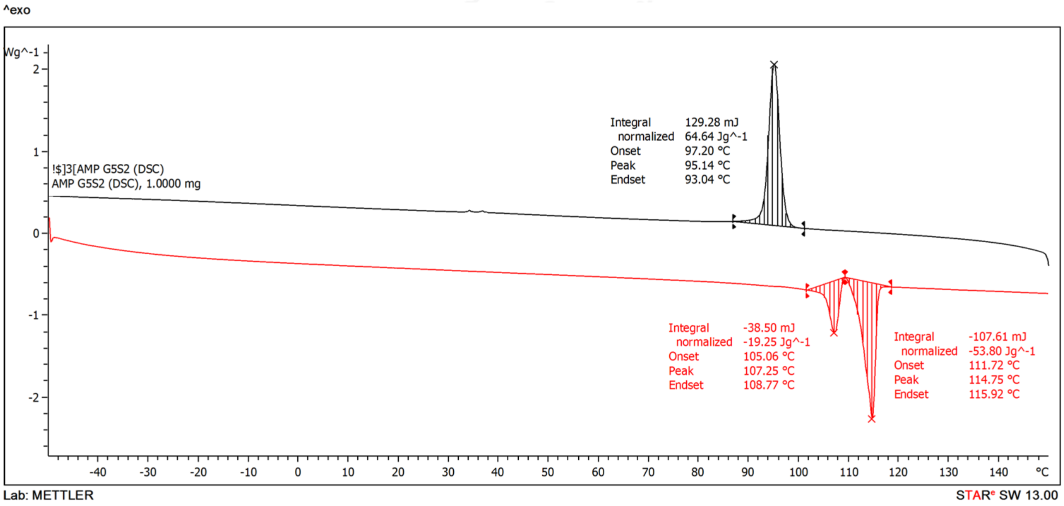
รูปที่ ง-18 เทอร์โมแกรมของ PBS/S3

7. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



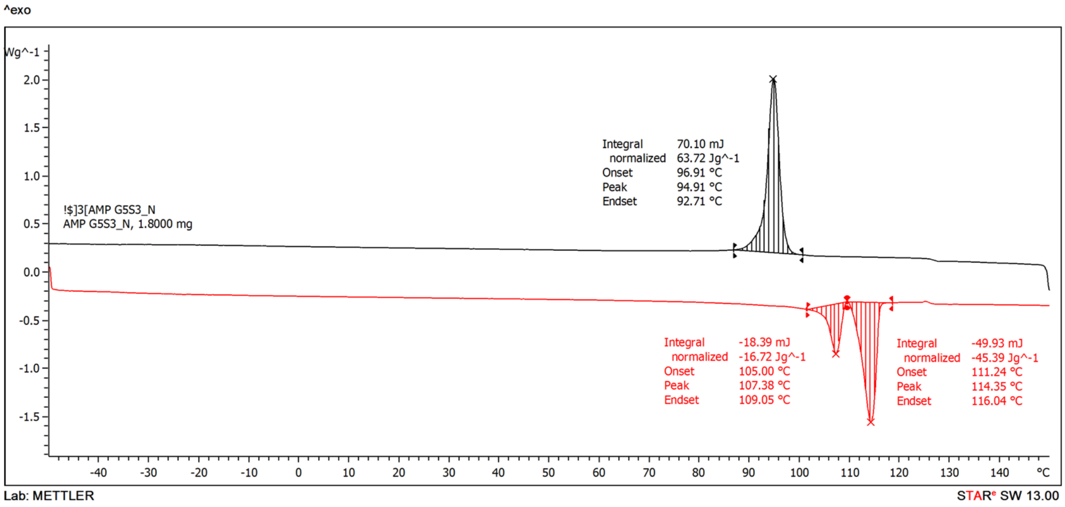
รูปที่ ง-19 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S1

8. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



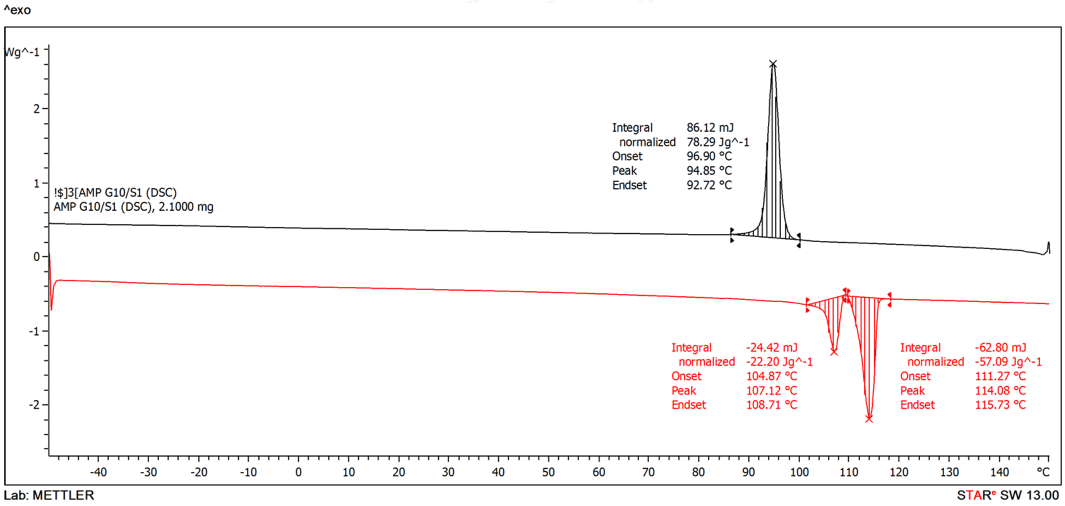
รูปที่ ง-20 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S2

9. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



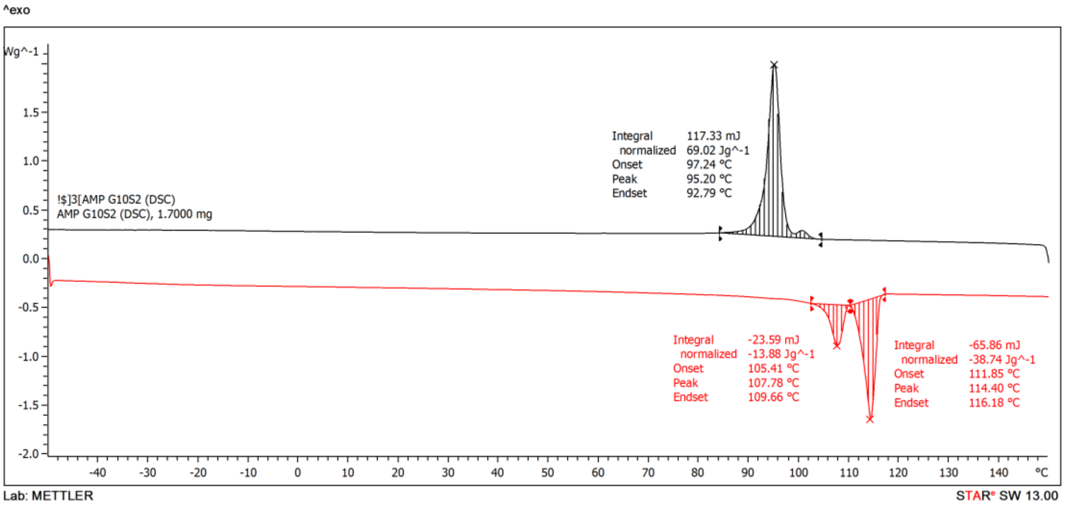
รูปที่ ง-21 เทอร์โมแกรมของ PBS/G5/S3

10. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



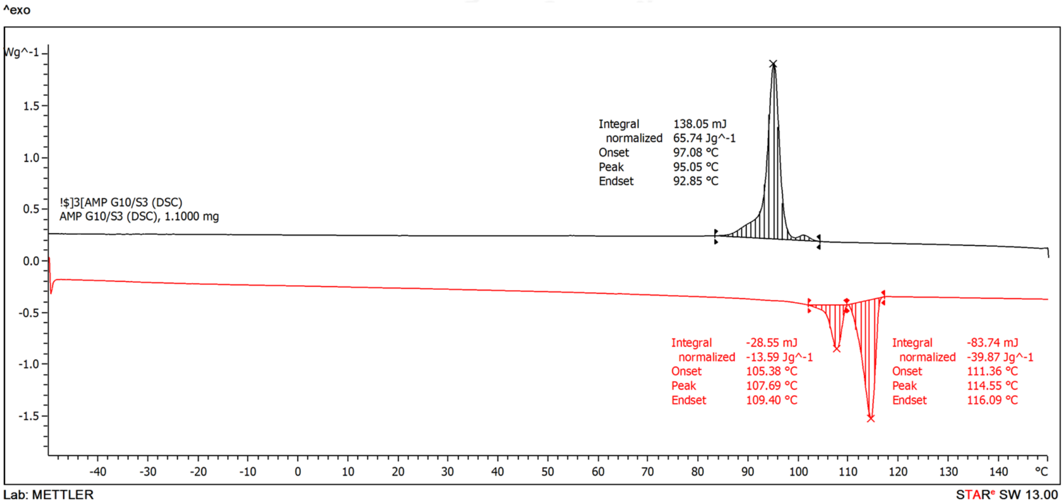
รูปที่ ง-22 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S1

11. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



รูปที่ ง-23 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S2

12. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยมีพอลิบิวทิลีนซักซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้



รูปที่ ง-24 เทอร์โมแกรมของ PBS/G10/S3

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต

ตาราง จ-1 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

sample	ความทนแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	20.0	19.0	19.5	20.1	21.1	19.9	0.8
PBS/G5	19.6	19.7	20.3	20.4	20.6	20.1	0.4
PBS/G10	20.4	21.5	21.3	21.2	21.3	21.1	0.4
PBS/S1	21.9	22.0	22.2	21.0	20.9	21.6	0.6
PBS/S2	10.6	11.0	12.0	11.8	11.0	11.3	0.6
PBS/S3	10.5	10.1	9.5	10.8	10.5	10.3	0.5
PBS/G5/S1	23.2	23.6	22.6	24.6	22.5	23.3	0.8
PBS/G5/S2	16.0	16.0	16.1	16.0	16.6	16.2	0.3
PBS/G5/S3	16.1	15.5	16.1	15.8	16.7	16.0	0.4
PBS/G10/S1	24.4	24.4	25.3	25.3	24.8	24.8	0.5
PBS/G10/S2	22.7	23.3	23.2	23.9	24.2	23.5	0.6
PBS/G10/S3	23.5	22.8	22.8	22.7	22.7	22.9	0.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-2 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

sample	ความทนแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	12.0	11.8	13.0	11.4	11.9	12.0	0.6
PBS/G5	14.8	14.8	15.6	15.0	15.4	15.1	0.4
PBS/G10	15.8	16.2	16.7	16.2	16.3	16.2	0.3
PBS/S1	15.8	15.9	16.5	15.5	15.4	15.8	0.4
PBS/S2	10.2	9.9	9,7	9..8	10.0	9.9	0.2
PBS/S3	9.2	9.1	8.5	9.0	9.1	9.0	0.3
PBS/G5/S1	17.7	17.7	18.2	17.4	16.9	17.6	0.5
PBS/G5/S2	13.5	13.1	13.1	14.4	12.2	13.2	0.8
PBS/G5/S3	13.1	12.7	12.9	13.4	13.0	13.0	0.2
PBS/G10/S1	20.9	21.2	21.3	20.6	21.0	21.0	0.3
PBS/G10/S2	16.9	17.5	16.8	17.1	17.3	17.1	0.2
PBS/G10/S3	15.5	14.9	15.4	16.1	16.0	15.6	0.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-3 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

sample	ยังส์มอดุลัส (MPa)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	361.7	367.1	370.3	352.3	315.6	353.4	22.2
PBS/G5	375.6	348.9	358.6	387.4	419.2	378.0	27.5
PBS/G10	431.2	430.7	398.0	391.3	374.6	405.1	22.4
PBS/S1	394.6	395.8	382.9	407.3	408.0	397.7	10.4
PBS/S2	276.1	309.9	347.0	339.9	277.5	308.9	32.2
PBS/S3	263.0	270.4	251.5	256.8	249.9	258.3	8.5
PBS/G5/S1	412.7	465.6	429.9	434.7	470.3	442.6	24.6
PBS/G5/S2	375.0	379.2	382.4	381.2	390.6	381.7	5.7
PBS/G5/S3	340.5	328.7	317.2	360.3	314.7	332.3	18.7
PBS/G10/S1	493.2	525.6	445.5	480.2	528.1	494.5	34.3
PBS/G10/S2	465.6	429.2	456.9	478.9	477.2	461.6	20.2
PBS/G10/S3	449.9	455.5	425.2	405.1	413.3	429.8	22.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-4 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

sample	ยังส์มอดุลัส (MPa)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	366.1	371.0	377.9	384.8	410.5	382.1	17.4
PBS/G5	386.8	382.0	406.4	428.9	443.9	409.6	26.7
PBS/G10	556.8	535.5	517.2	502.8	510.7	524.6	21.7
PBS/S1	441.5	491.1	469.7	476.0	426.0	460.8	26.5
PBS/S2	363.4	335.1	305.8	308.7	367.5	336.1	29.2
PBS/S3	331.2	313.4	312.4	342.1	363.3	332.5	21.3
PBS/G5/S1	567.2	583.3	592.6	521.1	529.5	558.8	32.0
PBS/G5/S2	388.4	386.3	399.4	382.2	369.0	385.1	11.0
PBS/G5/S3	326.1	333.9	356.3	354.3	356.7	345.5	14.4
PBS/G10/S1	768.1	641.7	644.8	758.5	686.0	699.8	60.6
PBS/G10/S2	668.5	595.0	592.2	648.9	666.3	634.2	33.8
PBS/G10/S3	491.8	564.4	614.4	535.2	559.5	553.1	44.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-5 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

sample	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	12.8	13.5	11.6	14.2	13.2	13.1	1.0
PBS/G5	12.4	11.9	12.4	13.4	13.0	12.6	0.6
PBS/G10	10.7	9.7	10.5	11.6	11.4	10.8	0.7
PBS/S1	10.2	10.0	10.4	10.3	9.5	10.1	0.3
PBS/S2	7.0	6.9	6.5	6.6	6.5	6.7	0.2
PBS/S3	6.3	5.8	6.1	6.4	6.1	6.1	0.3
PBS/G5/S1	16.5	15.8	16.5	16.1	16.7	16.3	0.4
PBS/G5/S2	9.8	10.2	9.9	9.8	9.7	9.9	0.2
PBS/G5/S3	7.4	7.0	7.2	7.2	7.1	7.2	0.1
PBS/G10/S1	10.7	11.0	12.0	11.2	10.8	11.1	0.5
PBS/G10/S2	9.5	8.8	8.7	9.3	8.8	9.0	0.4
PBS/G10/S3	7.0	6.9	6.9	6.8	6.4	6.8	0.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-6 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

sample	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	6.6	6.7	7.2	6.9	6.9	6.9	0.3
PBS/G5	7.0	6.9	6.9	6.8	6.4	6.8	0.3
PBS/G10	6.6	6.6	6.5	6.0	5.8	6.3	0.4
PBS/S1	4.5	4.9	4.4	5.5	4.6	4.8	0.4
PBS/S2	3.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.7	0.1
PBS/S3	2.8	3.2	3.4	3.3	3.4	3.2	0.2
PBS/G5/S1	9.5	8.9	9.3	9.3	9.8	9.4	0.3
PBS/G5/S2	4.8	5.1	5.3	5.2	5.2	5.1	0.2
PBS/G5/S3	4.1	4.1	4.4	4.6	4.6	4.4	0.3
PBS/G10/S1	5.0	5.1	5.2	5.2	5.9	5.3	0.4
PBS/G10/S2	5.0	4.7	4.9	4.7	4.5	4.7	0.2
PBS/G10/S3	4.0	4.3	4.3	4.2	3.8	4.1	0.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-7 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

sample	ความทนแรงฉีกขาด (N/mm^2)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	10.0	9.6	10.1	9.7	10.1	9.9	0.3
PBS/G5	9.7	10.1	10.2	10.5	10.2	10.1	0.3
PBS/G10	10.0	10.1	10.4	10.3	10.4	10.2	0.2
PBS/S1	11.7	12.0	12.1	11.8	12.0	11.9	0.2
PBS/S2	7.8	8.1	8.0	8.0	8.0	8.0	0.1
PBS/S3	6.9	7.4	6.6	7.4	6.9	7.0	0.3
PBS/G5/S1	15.0	14.6	14.9	14.6	15.3	14.9	0.3
PBS/G5/S2	9.7	10.4	9.5	10.0	10.2	9.9	0.3
PBS/G5/S3	9.0	9.5	9.4	9.4	9.3	9.3	0.1
PBS/G10/S1	18.4	18.1	17.5	18.4	18.2	18.1	0.4
PBS/G10/S2	12.8	12.9	13.1	12.4	12.4	12.7	0.3
PBS/G10/S3	11.7	11.5	11.8	11.5	11.5	11.5	0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง จ-8 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

sample	ความทนแรงฉีกขาด (N/mm^2)						
	1	2	3	4	5	average	SD
PBS	18.1	17.9	17.8	17.5	18.2	17.9	0.3
PBS/G5	20.7	21.4	20.7	21.1	20.4	20.9	0.4
PBS/G10	24.8	24.7	24.9	25.2	23.6	24.6	0.6
PBS/S1	25.6	25.9	26.4	26.1	27.5	26.3	0.7
PBS/S2	11.8	11.8	11.4	11.2	10.9	11.4	0.4
PBS/S3	10.2	9.8	10.3	9.8	10.2	10.1	0.2
PBS/G5/S1	29.9	30.0	30.8	31.6	30.2	30.5	0.7
PBS/G5/S2	14.7	15.1	14.6	15.1	13.9	14.7	0.5
PBS/G5/S3	13.5	12.9	13.2	13.6	14.1	13.5	0.4
PBS/G10/S1	34.2	34.4	34.5	33.4	34.9	34.3	0.5
PBS/G10/S2	30.0	30.0	29.6	30.5	30.6	30.2	0.4
PBS/G10/S3	25.6	25.5	25.8	26.7	27.1	26.2	0.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนันทภรณ์ แสงวิรุณ เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2555 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2558

การเสนอผลงานวิจัย ดังนี้

S. Nanthaporn and P. Pranut. Mechanical Properties of Poly(butylene succinate) Films Reinforced with Silica. PCT-5 (International Polymer Conference of Thailand), Thailand, 2015.

S. Nanthaporn and P. Pranut. Thermal and Mechanical Properties of Poly(butylene succinate) Films Reinforced with Silica. ICMSET 2015 (International Conference on Material Science and Engineering Technology), Singapore, 2015.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University