

การเสริมแรงพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตด้วยซิลิกาจากแคลบโดยใช้ไกลซีดีลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีน
ซึกซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

นายอภิมุข ลาภทิพนนต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REINFORCEMENT OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) WITH RICE HUSK SILICA USING
GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AS COMPATIBILIZER

Mr. Apimook Laptippamon



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเสริมแรงพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยซิลิกาจากแคลบโดย
ใช้ไกลซีดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็น
สารเสริมสภาพเข้ากันได้

โดย

นายอภิมุข ลาภทิพมนต์

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธิ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

อภิมุข ลากทิพมณฑ : การเสริมแรงพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยซิลิกาจากแกลบโดยใช้ไกลซิดิลเมทาคริเลตกราฟต์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (REINFORCEMENT OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) WITH RICE HUSK SILICA USING GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AS COMPATIBILIZER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ประณัฐ โปธิยะราช, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อนำซิลิกาจากแกลบมาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงสำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและตรวจสอบสมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมขึ้น การทดลองเริ่มจากการเตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้โดยการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาตัดแปรในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตในปริมาณ 2.5 และ 10 ส่วนใน 100 ส่วนของเรซิน (phr) โดยใช้ไตรควิลเปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 phr เป็นตัวริเริ่ม พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ตัดแปรด้วยด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลต 2 phr และ ไตรควิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr มีปริมาณการกราฟต์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในช่วงตอนถัดไป จากนั้นเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยการผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและซิลิกาจากแกลบในปริมาณ 0.5 1 2 และ 3 phr ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยเตรียมคอมพอสิตที่ใช้ซิลิกาทางการค้าที่อัตราส่วนเท่ากันเพื่อเปรียบเทียบ รวมทั้งเตรียมคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เตรียมได้ ขึ้นรูปคอมพอสิตเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติกแล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อปริมาณซิลิกาจากแกลบในคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึง โมดูลัสของยัง ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าลดลง และเมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ลงในคอมพอสิตสมบัติเชิงกลมีค่าสูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาทางการค้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกัน โดยซิลิกาทางการค้าให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดีกว่าซิลิกาจากแกลบ ส่วนสมบัติทางความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5672403023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS:

APIMOOK LAPTIPPAMON: REINFORCEMENT OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) WITH RICE HUSK SILICA USING GLYCIDYL METHACRYLATE GRAFTED POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AS COMPATIBILIZER. ADVISOR: ASSOC. PROF.PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 96 pp.

This research aims to utilize rice husk silica as a reinforcing filler for poly(butylene succinate) and to investigate properties of the prepared composites. Initially, a compatibilizer was prepared by modifying poly(butylene succinate) or PBS with glycidyl methacrylate at 2.5 and 10 parts per hundred of resin (phr) along in the presence of dicumyl peroxide at 0.5, 1, 1.5 and 2.5 phr as an initiator using a twin screw extruder. It was found that PBS modified with glycidyl methacrylate and dicumyl peroxide at 2 and 1.5 phr, respectively, showed the optimum grafting degree and was subsequently used as the compatibilizer. Then, PBS composites were prepared by melt mixing of PBS with rice husk silica at 0.5, 1, 2 and 3 phr in a twin screw extruder. The composites with commercial silica at the same amount as well as those with the obtained compatibilizer were also prepared for comparison purpose. Specimens were processed from composite compounds by an injection molding machine and were consequently tested for their mechanical and thermal properties. The results indicate that when the amount of rice husk silica in the composites increased the tensile strength, Young's modulus, flexural strength and impact strength slight increased while the elongation at break decreased. These properties were enhanced when the compatibilizer was added due to the improvement of filler-matrix interaction by the compatibilizer. The composites with commercial silica showed similar improvement with some higher reinforcing efficiency. In addition, the thermal properties were not changed significantly.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โภธิยะราช อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งการให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ ความ
ช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ดูแลและเสียสละเวลาในการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้อง
สมบูรณ์เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ที่สละเวลามาเป็น
ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวิ ศรี
กุลกิจ และรองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และ
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำแนะนำต่างๆแก่ผู้วิจัย

นอกจากนี้ผู้ทำวิจัยต้องขอขอบพระคุณหน่วยงานต่างๆที่อนุเคราะห์สารเคมี ดัง
รายนามดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณบริษัทสยามซีลิกา จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุดิบในการทำงานวิจัยครั้งนี้สำหรับซี
ลิกาจากแกลบ

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ
เจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้ค่าปรึกษา และช่วยเหลือในการทำงานวิจัย
ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและคอยให้กำลังใจในการ
ทำงานวิจัยครั้งนี้ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	1
2.1 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	1
2.1.1 ความหมายของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	1
2.1.2 ประเภทของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	1
2.1.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS).....	1
2.1.3.1 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	1
2.1.3.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	2
2.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต	3
2.2.1 ความหมายของพอลิเมอร์คอมพอสิต	3
2.2.2 การแบ่งประเภทของคอมพอสิต.....	4
2.2.2.1 พอลิเมอร์คอมพอสิต	5
2.2.2.2 โลหะคอมพอสิต	5

2.2.2.3 เซรามิกคอมพอสิต	5
2.3 สารเสริมแรง	6
2.3.1 ซิลิกา (silica).....	6
2.3.2 ซิลิกาจากแกลบ (rice husk silica)	6
2.4 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลต.....	6
2.5 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก	8
2.5.1 กระบวนการอัดรีด	8
2.5.1.1 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder).....	8
2.5.1.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	10
2.5.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	15
3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานและแผนดำเนินการทดลอง.....	15
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	17
3.4.1 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA).....	17
3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของซิลิกา	24
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	26
3.4.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต	28
3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	33
4.1 ซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า.....	33

4.1.1 ขนาดอนุภาค.....	33
4.1.2 พื้นที่ผิว.....	33
4.1.3 โครงสร้างผลึก.....	33
4.1.4 โครงสร้างทางเคมี.....	34
4.1.5 สัณฐานวิทยา.....	35
4.2 พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตและพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	35
4.2.1 โครงสร้างทางเคมี.....	35
4.2.2 ปริมาณการกราฟต์.....	36
4.3 พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต.....	37
4.3.1 โครงสร้างทางเคมี.....	37
4.3.2 สัณฐานวิทยา.....	39
4.3.3 สมบัติเชิงกล.....	44
4.3.3.1 ความทนแรงดึง.....	44
4.3.3.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break).....	46
4.3.3.3 โมดูลัสยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยัง (Young's modulus).....	48
4.3.3.4 ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	50
4.3.3.5 ความทนแรงกระแทก (Impact strength).....	52
4.3.4 สมบัติทางความร้อน.....	54
4.3.4.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึก.....	54
4.3.4.2 การสลายตัวทางความร้อน.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59

5.2 ข้อเสนอแนะ	60
รายการอ้างอิง	61
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	81
ภาคผนวก ง	83
ภาคผนวก จ.....	84
ภาคผนวก ฉ.....	89
ภาคผนวก ช.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	96



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3. 1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	18
ตารางที่ 3. 2 สูตรการเตรียมพอลิบิวทิลีนคอมพาวนด์.....	20
ตารางที่ 4. 1 ขนาดอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า	33
ตารางที่ 4. 2 พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า.....	33
ตารางที่ 4. 3 ปริมาณการกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลตบนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	37
ตารางที่ 4. 4 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต.....	55
ตารางที่ 4. 5 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์.....	57

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	2
รูปที่ 2. 2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	2
รูปที่ 2. 3 การผลิตมอนอเมอร์ตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	3
รูปที่ 2. 4 ซึ่งแสดงลักษณะต่างๆของเฟสที่การกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์	4
รูปที่ 2. 5 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของ สารเสริมแรง.....	5
รูปที่ 2. 6 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลต	7
รูปที่ 2. 7 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลต	7
รูปที่ 2. 8 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder)	9
รูปที่ 2. 9 รูปแบบการปรับปรุงลักษณะของสกรู	9
รูปที่ 2. 10 เครื่องอัดรีดสกรูคู่	10
รูปที่ 2. 11 แสดงลักษณะการหมุนและการขบกันของเกลียว	11
รูปที่ 2. 12 กระบวนการฉีดขึ้นรูป	12
รูปที่ 3. 1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่	18
รูปที่ 3. 2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก	19
รูปที่ 3. 3 ตู้อบ	21
รูปที่ 3. 4 เครื่องฉีดพลาสติก	22
รูปที่ 3. 5 การละลายของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในคลอโรฟอร์ม	23
รูปที่ 3. 6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	24
รูปที่ 3. 7 เครื่องวิเคราะห์อนุภาค	25
รูปที่ 3. 8 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาค.....	25

รูปที่ 3. 9 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	26
รูปที่ 3. 10 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	27
รูปที่ 3. 11 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	28
รูปที่ 3. 12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
รูปที่ 3. 13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์	30
รูปที่ 3. 14 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ติดตั้งชุดทดสอบความทนแรงดัดโค้ง	31
รูปที่ 3. 15 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก.....	32
รูปที่ 4.1 เอกซ์เรย์ดีฟแฟรกโทแกรมของ (ก) ซิลิกาจากแกลบ และ (ข) ซิลิกาทางการค้า	34
รูปที่ 4.2 สันฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้า(ก) ซิลิกาจากแกลบ (ข) ซิลิกาทางการค้า	35
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกา พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต กราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต.....	36
รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการผสมและไม่ผสม สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 5 phr.....	38
รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการผสมและไม่ผสม สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 10 phr	38
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต (ก) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ (ข) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต 5 phr (ค) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ ไกลซีดีลเมทาคริเลต 10 phr.....	40
รูปที่ 4.7 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและ ซิลิกาทางการค้า ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	41
รูปที่ 4. 8 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและ ซิลิกาทางการค้าที่มีการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 5 phr ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ...	42
รูปที่ 4. 9 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและ ซิลิกาทางการค้าที่มีการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 10 phr ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน .	44
รูปที่ 4. 10 ทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกทางชีวภาพกำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถสังเคราะห์หรือผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ อีกทั้งโดยทั่วไปแล้วพลาสติกทางชีวภาพมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกชีวภาพอีกชนิดหนึ่งที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์และผลิตขึ้นในปัจจุบัน โดยมีความอ่อนตัวกว่าพลาสติกทางชีวภาพเชิงพาณิชย์ชนิดอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิแล็กติกแอซิด ปัจจุบันมีการนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และวัสดุแบบใช้แล้วทิ้ง เช่น ช้อนส้อม พลาสติกคลุมหน้าดิน เป็นต้น แต่ความอ่อนนุ่มและราคาต้นทุนที่สูงกว่ายังคงเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานให้กว้างขวางขึ้น ทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยเทคนิคการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม หรือพอลิเมอร์คอมพอสิต การใช้นุภาคอนินทรีย์เป็นตัวเติมเสริมแรงสำหรับพลาสติกเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะตัวเติมอนินทรีย์มักมีมอดูลัสที่สูงกว่าทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงกว่าพอลิเมอร์หรือพลาสติกดั้งเดิม

แคลบเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรชนิดหนึ่งที่มีมากในประเทศไทย เนื่องจากการปลูกข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศนั่นเอง แคลบถูกนำมาใช้ประโยชน์หลากหลายที่สำคัญได้แก่ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล และนำมาผลิตอิฐ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแคลบพบว่าแคลบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ ที่สามารถเตรียมซิลิกาจากแคลบให้ได้ความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 95 - 96% จึงมีความสนใจในการนำซิลิกาจากแคลบมาทำเป็นตัวเติมเสริมแรงอันจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแคลบอีกทางหนึ่งด้วย โดยทางทฤษฎีแล้วการเสริมแรงพลาสติกด้วยซิลิกาจะสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง และมอดูลัสของคอมพอสิต นอกจากนี้หากใช้ในปริมาณมากยังเป็นการลดปริมาณของพลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ในระบบอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในนำซิลิกาจากแคลบมาเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยคาดหวังว่าคอมพอสิตที่เตรียมขึ้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่ได้ใช้ตัวเติมเสริมแรง นอกจากนี้จะเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาจากแคลบกับซิลิกาทางการค้า เพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าให้กับแคลบซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนของซิลิกาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิต

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอสิตในการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบที่มีสมบัติดีขึ้น



บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.1.1 ความหมายของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) คือ พลาสติกที่พัฒนาให้มีโครงสร้างทางเคมีซึ่งสามารถย่อยสลายโดยการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายใต้ภาวะที่เหมาะสม การย่อยสลายทางชีวภาพดังกล่าวสามารถประเมินด้วยวิธีทดสอบมาตรฐาน [1]

2.1.2 ประเภทของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ สามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ได้เป็น 2 ประเภท

1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastic) ซึ่งผลิตมาจากน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol) หรือ PVA) พอลิคาร์โพรแลคโตน (polycaprolactone หรือ PLC) พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate หรือ PBAT)

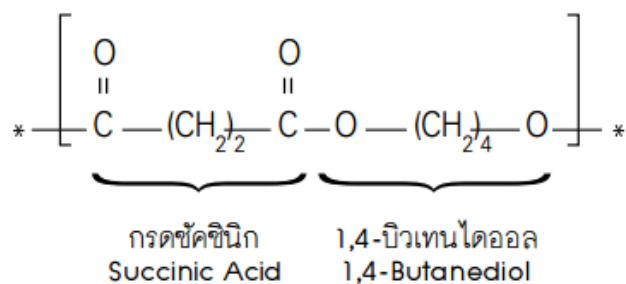
2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio-based biodegradable plastic) ใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติหรือสามารถหามาทดแทนใหม่ได้ ตัวอย่างเช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate หรือ PBS) พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid) หรือ PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (polyhydroxyalkanoates หรือ PHAs) และพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate) [1, 2]

2.1.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS)

2.1.3.1 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงดังแสดงในรูปที่ 2.1 เม็ดพลาสติกมีสีขาวขุ่น และมีโครงสร้างแบบกึ่งออสัณฐาน (semicrystalline) มีความหนาแน่น 1.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, Tg) ประมาณ -33 ถึง -37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 112 – 116

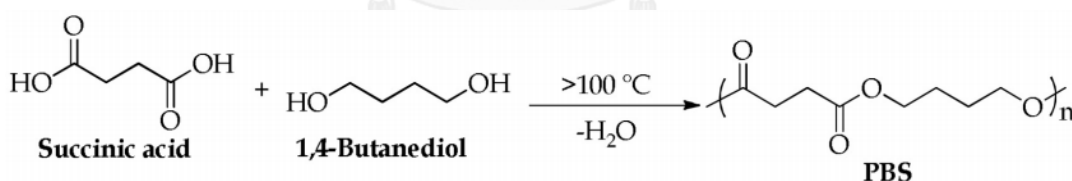
องศาเซลเซียส สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ มีความยืดหยุ่น สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย [3, 4]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [4]

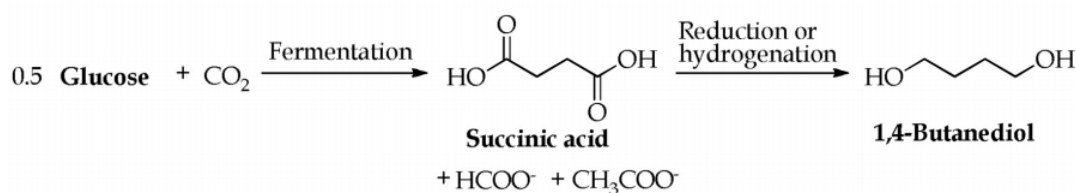
2.1.3.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ที่สังเคราะห์จากกรดซัคซินิก (succinic acid) กับ 1,4 บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

กรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออลซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยมอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถสังเคราะห์ได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและจากวัตถุดิบธรรมชาติ สำหรับการผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น อ้อย แป้ง และมันสำปะหลัง เริ่มจากการหมักแป้งกับน้ำตาลได้เป็นกรดซัคซินิก จากนั้นกรดซัคซินิกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อนจะทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันหรือปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น 1,4-บิวเทนไดออล ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนการผลิตจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีเริ่มจากก๊าซบิวเทนจะถูกเปลี่ยนให้มาเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ แล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นกรดซัคซินิกกับ 1,4-บิวเทนไดออล



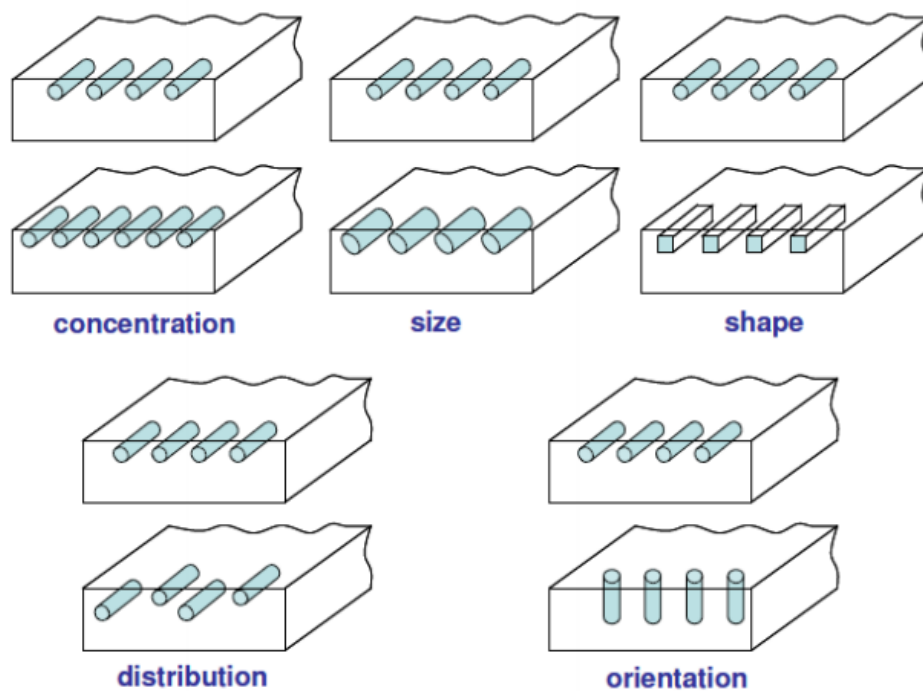
รูปที่ 2.3 การผลิตมอนอเมอร์ตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

2.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต

2.2.1 ความหมายของพอลิเมอร์คอมพอสิต

คอมพอสิต (composite) หมายถึง การนำวัสดุมากกว่า 1 ชนิดมาผสมรวมเข้าด้วยกันแต่ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งคอมพอสิตที่ได้มีสมบัติที่เกิดขึ้นร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบแล้วแต่ความเหมาะสมในการประยุกต์ในการใช้งาน โดยในคอมพอสิตนั้นจะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลักหรือเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) ส่วนวัสดุที่กระจายตัว (disperse) อยู่ในเนื้อหลักหรือเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงทำให้เกิดเป็นคอมพอสิต ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมแรงให้กับเมทริกซ์ทำให้คอมพอสิตมีสมบัติตามที่ต้องการ

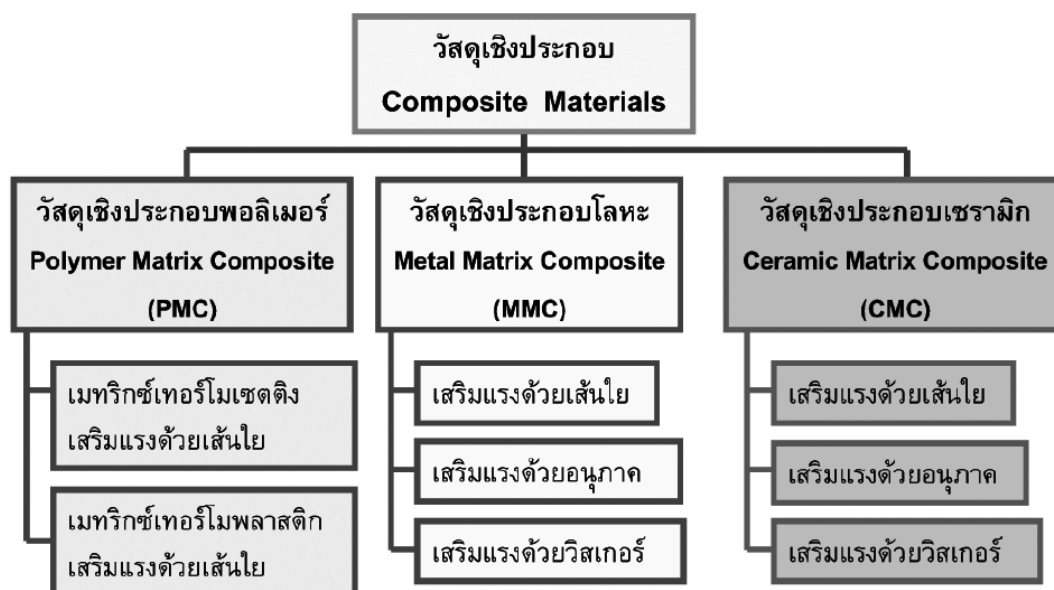
สมบัติของคอมพอสิตที่ได้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงลักษณะต่างๆ ของเฟสที่การกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของคอมพอสิตอีกทั้งถ้าเป็นคอมพอสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และสารเสริมแรงชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น ปริมาณ ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจายตัวหรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกัน จะทำให้สุดท้ายแล้วคอมพอสิตที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างกันด้วย [5]



รูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงลักษณะต่างๆของเฟสที่การกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์

2.2.2 การแบ่งประเภทของคอมพอสิต

คอมพอสิตสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามประเภทของสารเสริมแรง คือ พอลิเมอร์คอมพอสิต (polymer matrix composite, PMC) โลหะคอมพอสิต (metal matrix composite, MMC) และเซรามิกคอมพอสิต (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) และ whisker (whisker) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง[6]

2.2.2.1 พอลิเมอร์คอมพอสิต คือคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิตมักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix)

2.2.2.2 โลหะคอมพอสิต พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม

2.2.2.3 เซรามิกคอมพอสิต การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้คอมพอสิตที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อคอมพอสิตได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสารเสริมแรง เนื่องจากสมบัติที่เรียกว่าความเหนียวแบบเทียม (pseudoductile) สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะ และแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้น การใส่สารเสริมแรงเข้าไปจะทำให้เซรามิกคอมพอสิตที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงอาจอยู่ในรูปอนุภาค เส้นใยหรือวิสเกอร์ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์

และคาร์บอน เป็นต้น และสำหรับเมทริกซ์เซรามิก ได้แก่ ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น [6]

2.3 สารเสริมแรง

สารเสริมแรงในคอมพอสิตสามารถถูกจำแนกตามลักษณะเป็นอนุภาค เส้นใย และวิสเกอร์ อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง เช่น เขม่าดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้นและถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกสารเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใยซึ่งอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็น เส้นใยยาว (long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (short fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000

2.3.1 ซิลิกา (silica)

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์มีสูตรทั่วไปทางเคมี SiO_2 โดยการจัดเรียงตัวของโครงสร้างพื้นฐาน tetrahedral ซึ่งซิลิกาธรรมชาติได้จากหลายแหล่งด้วยกัน ได้แก่ หินทราย (sand) ควอตซ์ (quartz) เพอร์ไลต์ (perlite) ไดอะตอมเซียสเอิร์ธ (diatomaceous earth) และขี้เถ้าแกลบ (rice husk ash)

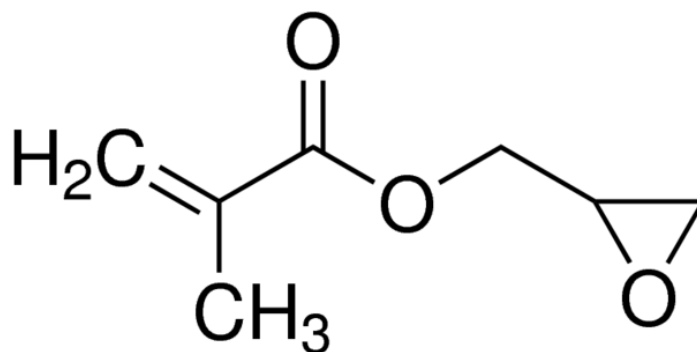
2.3.2 ซิลิกาจากแกลบ (rice husk silica)

ในผลิตข้าวเปลือกนั้นจะมีแกลบซึ่งเป็นสิ่งที่เหลือจากกระบวนการในอุตสาหกรรมดังกล่าว ในการผลิตข้าวหนึ่งครั้งจะให้แกลบในปริมาณมาก ซึ่งแกลบที่ได้สามารถนำไปทำประโยชน์ต่างได้มากมาย เช่น สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้ โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่ไอน้ำเพื่อนำไอน้ำที่ได้ไปปั่นกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้า แต่การนำแกลบมาเผาจะพบว่าร้อยละ 75 ของแกลบนั้นเป็นพวกสารอินทรีย์ที่สามารถสลายตัวทางความร้อนได้ ตัวอย่างเช่น น้ำตาล เซลลูโลส เป็นต้น ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 25 เป็น rice husk ash (RHA) หรือเรียกว่า ขี้เถ้าแกลบ ซึ่ง RHA นั้นจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบอยู่ถึงร้อยละ 85 – 95 [11,12]

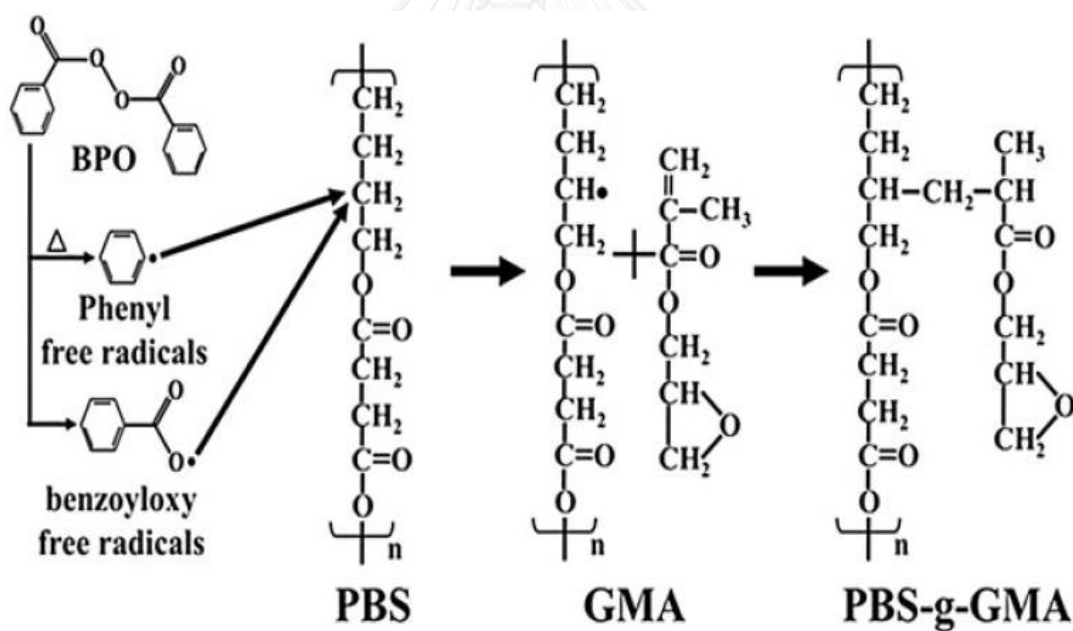
2.4 พอลิอีพอกซีเรซินเทอร์พลาซติกโกลซีดีลเมทาคริเลต

โกลซีดีลเมทาคริเลต หรือ 2,3-อีพ็อกซีโพรพิลเมทาคริเลต (2,3-epoxypropyl methacrylate) หรือ เมทาคริเลต 2,3-อีพ็อกซีเอสเทอร์ (methacrylic acid 2,3-epoxypropyl

ester) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $C_7H_{10}O_3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกซีกับหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไกลซิดิลเมทาคริเลต [7]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลต [8]

2.5 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก

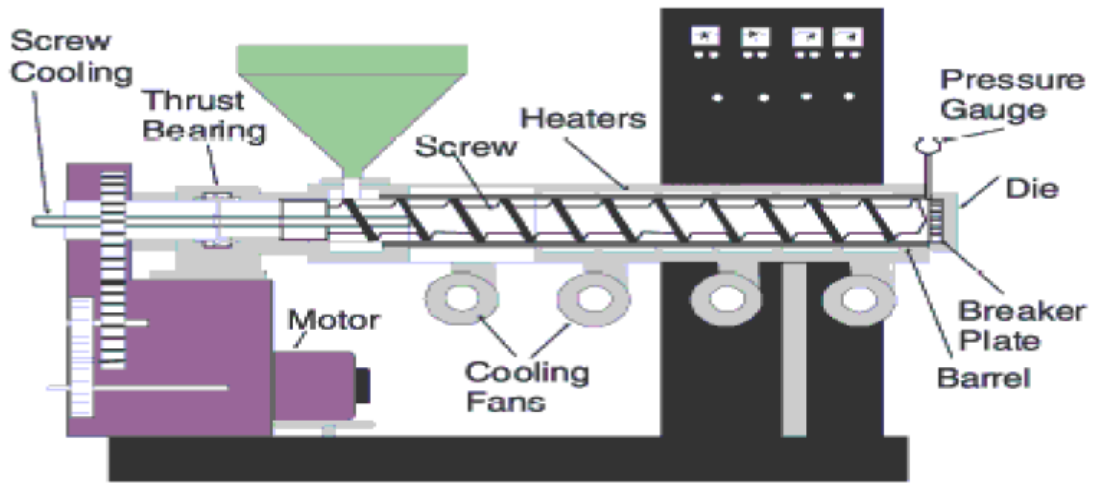
ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากปิโตรเลียมเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำมัน พลาสติก เป็นต้นซึ่งพลาสติกมีความจำต้องใช้ในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท ชิ้นงานพลาสติกจะถูกปรับปรุงและผ่านกระบวนการขึ้นรูปในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือก กระบวนการในการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกต้องคำนึงถึงชนิดของพลาสติก ลักษณะและสมบัติในการนำ ชิ้นงานพลาสติกไปใช้งานในด้านต่างๆ

2.5.1 กระบวนการอัดรีด

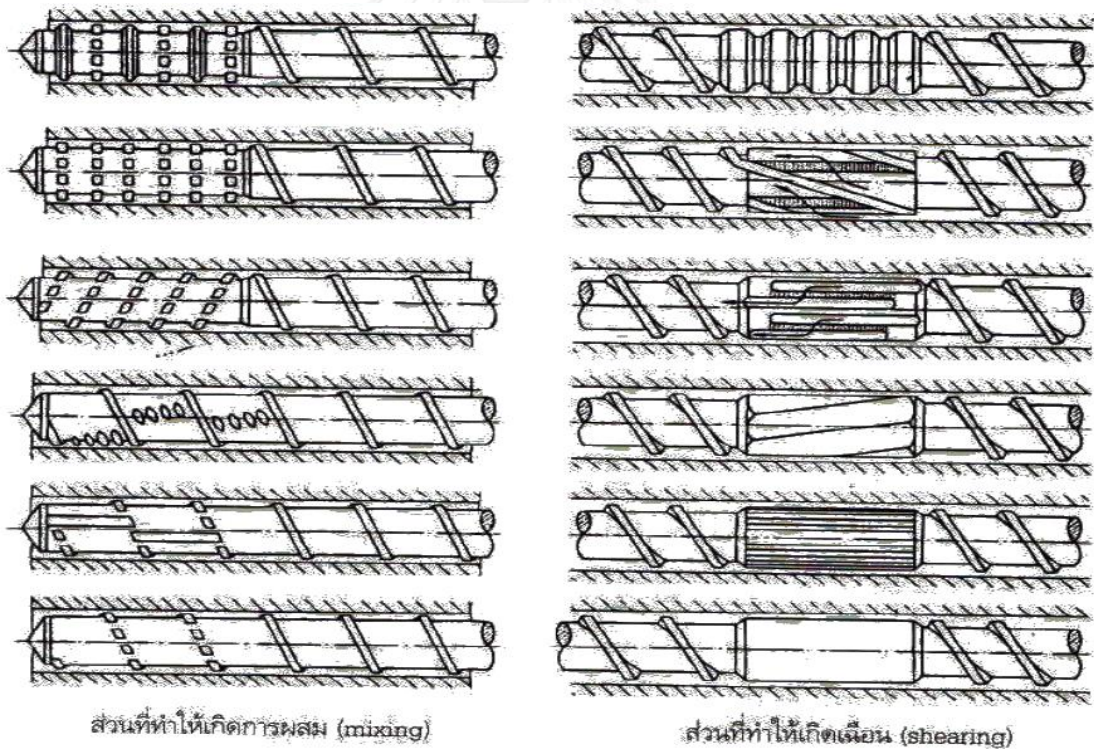
กระบวนการอัดรีด (extrusion process) เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับผสมสารเติม แต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติก หรือการทำคอมพาวนด์ (compounding) และเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานให้ เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นการคอมพาวนด์หรือชิ้นงานพลาสติกจะมี ลักษณะแบบต่อเนื่อง (continuous process) โดยกระบวนการอัดรีดหรือการคอมพาวนด์นั้นจะเริ่ม จากการนำพลาสติกมาใส่ลงในกรวยเติม (hopper) ซึ่งพลาสติกที่มีลักษณะเป็นเม็ด (pellet) จะ เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอกลอมซึ่งในส่วนนี้จะมีการให้ความร้อนจากภายนอกหรืออุปกรณ์ให้ความร้อน จากภายนอก แล้วการเสียดทานเนื่องจากการหมุนของสกรูจะทำให้เกิดความร้อนภายในเกิดขึ้นด้วย ซึ่งการผสมกันนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อสกรูหมุนเพราะจะเกิดแรงเฉือนภายในกระบอกลอม สุดท้าย พลาสติกหลอมจะไหลออกผ่านทางหัวตาย (die) ไปยังส่วนหน้าของเครื่องอัดรีด โดยรูปร่างของ พลาสติกหลอมเหลวจะถูกเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างต่างๆตามความต้องการแล้วทำให้ชิ้นงานหรือ พลาสติกหลอมเหลวที่ออกมาไหลผ่านหัวตายมีภาคตัดขวางที่คงที่ จากนั้นพลาสติกหลอมเหลวหรือ ชิ้นงานจะถูกทำการหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ กระบวนการอัดรีดนั้นมีหลากหลายรูปแบบ เช่น แผ่นพลาสติก ท่อ ฟิล์ม เป็นต้น

2.5.1.1 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวมักใช้สกรูแบบธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งทำให้ไม่สามารถผสมพลาสติกกับสารเติมแต่งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูแบบนี้มีไม่มากพอที่จะทำให้สารเติมแต่งเกิดการกระจายตัวได้ ดี ซึ่งการใช้เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวในการคอมพาวด์พลาสติกจึงต้องปรับปรุงลักษณะของสกรู โดยการเพิ่มส่วนที่เพิ่มแรงเฉือนของสกรูดังแสดงในรูปที่ 2.9 [9, 10]



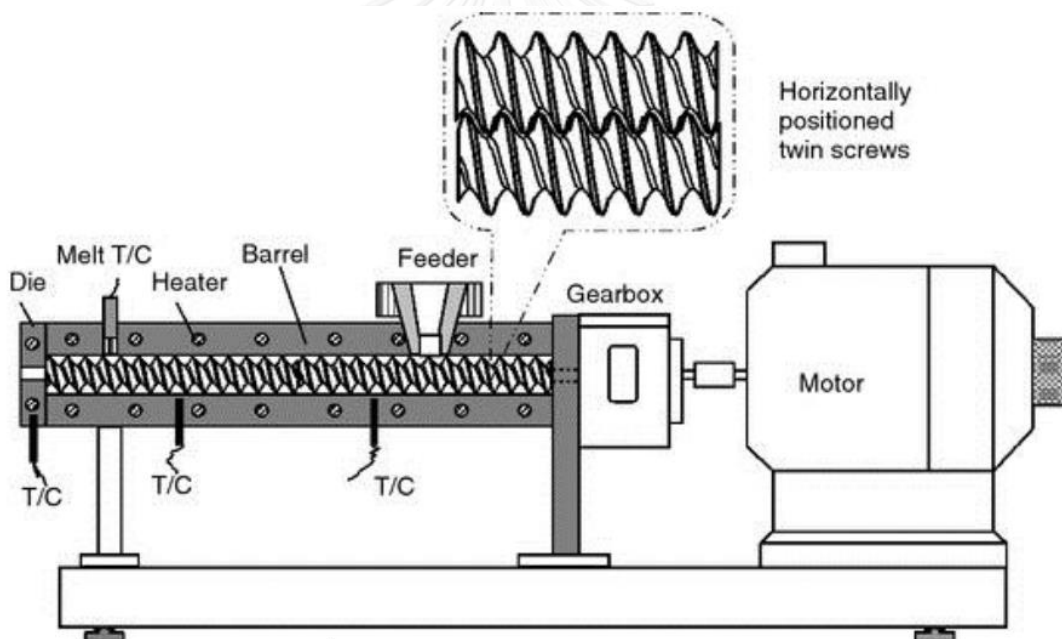
รูปที่ 2.8 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) [10]



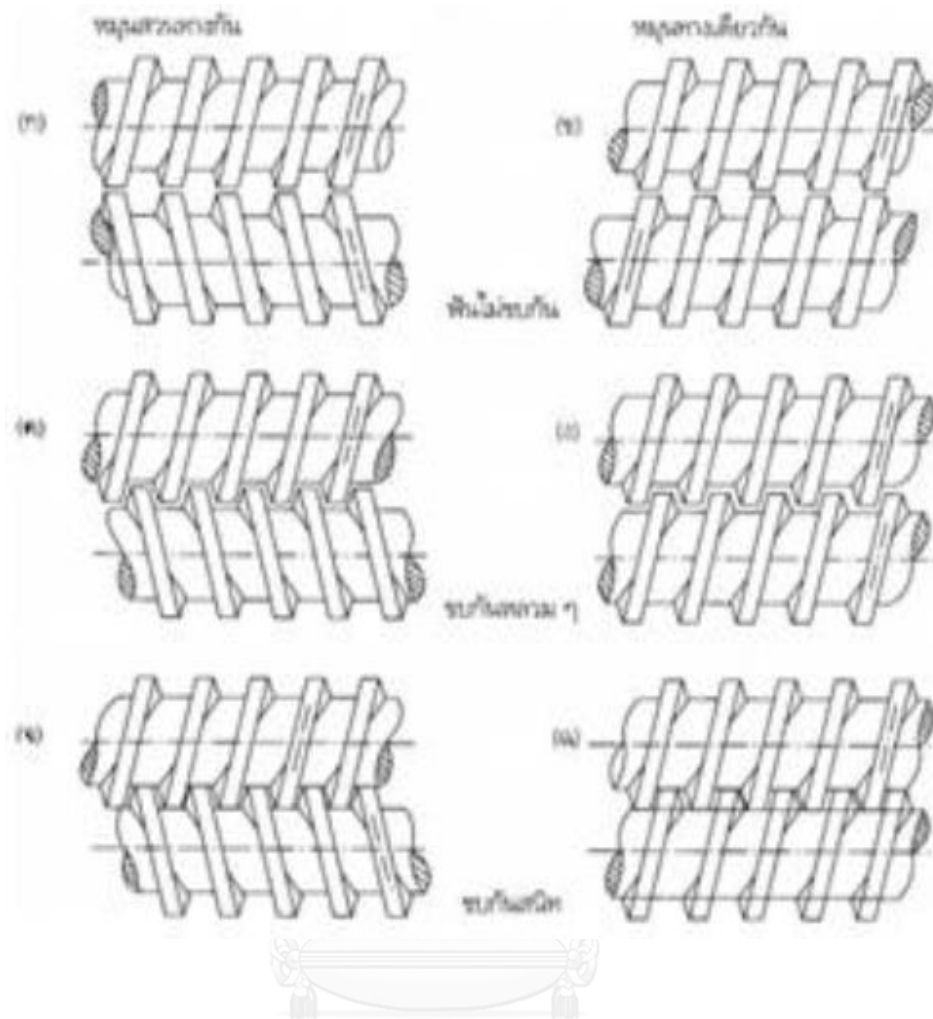
รูปที่ 2.9 รูปแบบการปรับปรุงลักษณะของสกรู [10]

2.5.1.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่

เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีประสิทธิภาพในการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า ทำให้มีการปรับปรุงในการควบคุมอุณหภูมิได้ดีขึ้น โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่มี 2 แบบ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating screw) และการหมุนสวนทางกัน (counter-rotating screw) นอกจากนี้ยังแบ่งตามลักษณะการขบกันของฟันเฟืองคือ แบบฟันเกลียวขบกัน (intermeshing) โดยเมื่อสกรูตัวหนึ่งหมุนจะทำให้สกรูอีกอันหมุนด้วยและแบบไม่ขบกัน (non-intermeshing) ซึ่งเมื่อมีการขบกันของสกรูมาก จะทำให้มีประสิทธิภาพในการขับดันพอลิเมอร์หลอมเหลวมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการผสมจะลดลง ดังนั้นในการผสมจะใช้สกรูขบกันที่ขบกันต่ำและมีความเร็วในการหมุนสกรูที่มาก ในการทำคอมพอสิตมักใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุนของสกรูคู่แบบหมุนไปในทิศทางเดียวกัน [9, 10]



รูปที่ 2.10 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ [10]

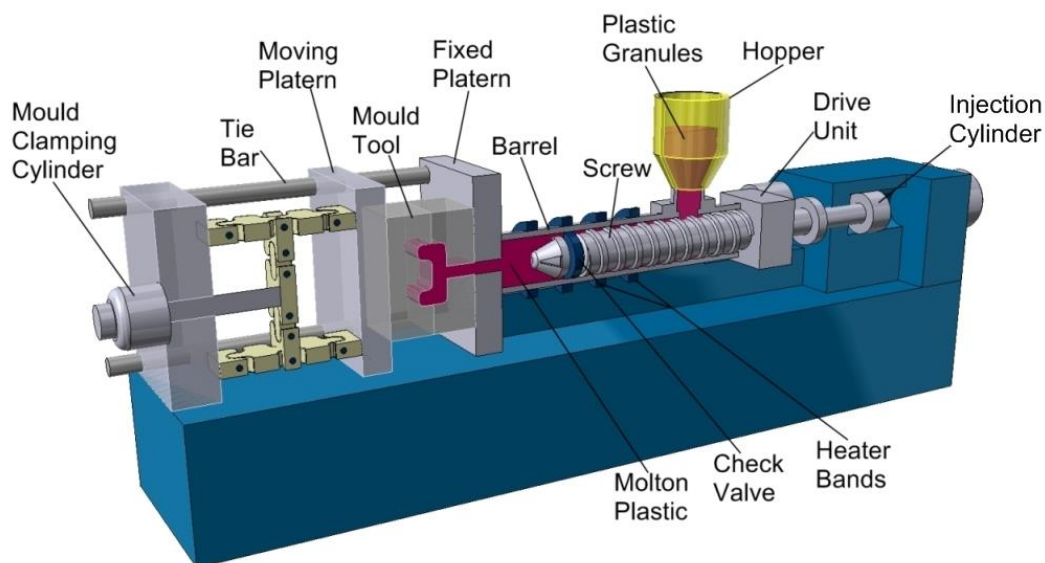


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการหมุนและการขบกันของเกลียว [10]

2.5.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding process) เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหรือเป็นผงเติมลงในกรวยเติม (hopper) จากนั้นเม็ดพลาสติกหรือผงเหล่านั้นจากถูกสกรูส่งไปยังด้านหน้าของกระบอกสูบ ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนจากภายนอก (heater) ทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลว จากนั้นจะเคลื่อนสกรูให้ดันพลาสติกให้ผ่านหัวนอซเซิล (nozzle) เข้าสู่แม่แบบ (mold) ซึ่งปิดอยู่ โดยแม่แบบจะมีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็น เพื่อทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิลดลงและแข็งตัว ทำให้สามารถถอดออกจากแม่แบบหรือแม่แบบได้ในระยะเวลาสั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการฉีดขึ้นรูป [10]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างกรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-Butanediol) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น tetra-*n*-butyl-titanate และ tetra-isopropyl titanate นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางชีวภาพเช่นเดียวกับกรดแล็กติก จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถสร้างกรดซัคซินิกได้ เช่น แบคทีเรียในลำไส้ แบคทีเรียรูเมน เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ แป้งข้าวโพด หางนม กากน้ำตาล เป็นต้น

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป อีกทั้งยังมีความอ่อนนิ่มที่ต่ำกว่าพอลิแล็กติกแอซิด โดยส่วนมากนิยมขึ้นรูปผ่านกระบวนการฉีด การอัดรีด การรีดเป่าฟิล์ม รวมถึงการรีดหล่อฟิล์มด้วย ผลิตรัศมีที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี [11-13] แต่ยังคงต้องปรับปรุงสมบัติให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงมีการวิจัยเพื่อพยายามปรับปรุงข้อเสียของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้เหมาะสม และสามารถใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น เช่น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับสารเสริมแรง เป็นต้น

Sang และคณะ [14] เตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิลิกาด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน จากการใช้ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ในการทดสอบพบว่าเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างหมู่ซิลานอลกับหมู่คาร์บอนิลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งผลของกระบวนการขึ้นรูปจะใช้แรงเฉือนและอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก

โครงสร้างเกิดพันธะระหว่างซิลิกากับสายโซ่ของพอลิเมอร์แบบพันธะโควาเลนต์ การผสมซิลิกาในอัตราส่วนที่ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักของซิลิกาที่ผสมกับพอลิเมอร์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตให้ดีขึ้น โดยความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตกับอนุภาคของซิลิกา

ต่อมา Alexandors และคณะ [15] ทำการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาด้วยวิธีแบบอินซิทู ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในโพลิเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตพบว่าเกิดการรวมตัวแบบอะโกเมอเรท (agglomerate) ทดสอบด้วย transmitted electron microscopy (TEM) ที่ใช้ปริมาณของอนุภาคซิลิกาที่สูง โดยหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตจะมีหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของอนุภาคซิลิกา ทั้งนี้แรงอันตรกิริยาจะส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของการเตรียมพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตคอมพอสิตที่ปริมาณซิลิกาน้อยๆ อนุภาคซิลิกาจะทำหน้าที่เป็นตัวต่อขยายสายโซ่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตเพิ่มขึ้น ซึ่งการใส่ซิลิกาในปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของกิ่งของโครงสร้างและทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งซิลิกายังสามารถเป็นสารก่อผลึกทำให้การเกิดผลึกมีค่าสูงขึ้น แต่การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตคอมพอสิตจะลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนความทนแรงดึงกับโมดูลัสของยังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกา ส่วนความสามารถในการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตคอมพอสิตมีค่าลดลงเทียบกับพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตบริสุทธิ์

Michelina และคณะ [16] ทดลองผสมพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตกับพอลิไทรเอทิลีนซักซิเนตแล้วพิสูจน์เอกลักษณ์ของโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น พบว่าการใช้ไทเทเนียมเททระบิวทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โคพอลิเมอร์แบบบล็อกหรือแบบสุ่ม โดยความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลงเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น หลังจากหลอมเหลวแล้วลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว โคพอลิเมอร์ทั้งหมดจะมีสัณฐานแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ยกเว้นในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม อีกทั้งความเป็นผลึกยังสามารถลดความยาวของการเกิดโคพอลิเมอร์แบบบล็อกได้

Chen และคณะ [17] ทำการศึกษาผลของการเสริมแรงพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตด้วยชนิดของซิลิกาที่มีความแตกต่างกัน เช่น ซิลิกาที่มีการโมดิฟายกับอีพอกไซด์คลอโรไฮโดรเจนและซิลิกาที่ไม่มีการโมดิฟาย โดยขนาดของอนุภาคซิลิกา พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกาและแรงอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตกับอนุภาคซิลิกาจะส่งผลต่อพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตคอมพอสิต ซึ่งอนุภาคของซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวมากที่อยู่ในเฟสของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตจึงทำให้มีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของการเกิดการเชื่อมขวางทางกายภาพจึงทำให้มีโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เนื่องด้วยสภาพความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของเฟสของพอลิเมอร์ที่ลื่นซักซิเนตกับอนุภาคซิลิกา จึงทำการปรับปรุงให้แรงอันตรกิริ

ยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคของซิลิกาดีขึ้น จึงใช้ซิลิกาที่มีการโมดิฟายกับอ็อกตาเดซิลไตรคลอโรโซเลนเพื่อปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาให้มีสภาพขั้วที่ดีขึ้น จึงทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับซิลิกาที่มีกาโมดิฟายนั้นมีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงมากขึ้น ทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีขึ้น

พอลิเอทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาซึ่ง Alexandors และคณะ[12] เตรียมด้วยวิธีแบบอินซิituที่มีปริมาณซิลิกาที่แตกต่างกัน โดยที่ปลายสายโซ่ของพอลิเอทิลีนซัคซิเนตจะมีหมู่ไฮดรอกซิลจึงทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา ซึ่งอันตักิริยาจะส่งผลดีต่อน้ำหนักของโมเลกุลกับสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนคอมพอสิต การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในเฟสของพอลิเอทิลีนคอมพอสิตทดสอบโดยใช้ transmitted electron microscopy (TEM) ทำให้การใช้ซิลิกาในปริมาณมากบางส่วนจะเกิดการรวมตัวแบบอะกรีเกรท (aggregates)

Li กับ Wu และคณะ [18-20] เสริมแรงพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยฮอโลวไซต์นาโนทิวบ์ (hollowsite nanotube) ฮอโลวแกรสไมโครสเฟียร์ (hollow glass microsphere) อนุภาคของสารเสริมแรงที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกมากขึ้น เป็นผลให้สมบัติเชิงกลเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น จึงสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานและแผนดำเนินการทดลอง

- 3.1.1 สืบค้นข้อมูลทางวิชาการและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนงานของการวิจัย
- 3.1.3 จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง
- 3.1.4 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลอซีดีลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA)
- 3.1.5 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์
- 3.1.6 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของซิลิกา
- 3.1.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์
- 3.1.8 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์
- 3.1.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์

3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เกรด AZ71TN จากบริษัท Mitsubishi Chemical Corporation (MCC) ประเทศญี่ปุ่น มีลักษณะเป็นเม็ดขาวขุ่น
- 3.2.2 Glycidyl methacrylate, GMA เกรด AR จากบริษัท Sigma-Aldrich (ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี
- 3.2.3 Dicumyl peroxide, DCP เกรด AR จากบริษัท Sigma-Aldrich (ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีลักษณะเป็นเกล็ด มีขนาดเล็ก สีขาวขุ่น
- 3.2.4 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เกรด AR จากบริษัท Lab scan (ประเทศไทย) มีลักษณะของเหลวใสไม่มีสี
- 3.2.5 คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เกรด AR จากบริษัท Lab scan (ประเทศไทย) มีลักษณะของเหลวใสไม่มีสี
- 3.2.6 ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) เกรด AR จากบริษัท Lab scan (ประเทศไทย) มีลักษณะของเหลวใสไม่มีสี

3.2.7 ซิลิกาจากแกลบ (rice husk silica) จากบริษัทสยามซิลิกา จำกัด (ประเทศไทย)

3.2.8 ซิลิกาทางการค้า (commercial silica) จากบริษัท Envonik United Silica Ind จำกัด (ประเทศเยอรมัน)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ตู้อบ (opper dryers) ของ SHINI® plastic technologies รุ่น SHD-100T

3.3.2 ตู้อบ (ot air oven) ของ Memmert รุ่น UNB 400

3.3.3 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28

3.3.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (pelletizer cutting machine) ของ Lab tech engineering company รุ่น LZ-120/VS

3.3.5 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyser, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851

3.3.6 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของ Mettler Toledo รุ่น DSC1

3.3.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) ของ BRUKER axs รุ่น D8

3.3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV

3.3.9 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาค BET surface area ของ Microtrac (ประเทศญี่ปุ่น) รุ่น BELSORP-mini II

3.3.10 เครื่องฉีดพลาสติก (injection molding) ของ Battenfeld (ประเทศออสเตรเลีย) รุ่น BA 250 CDC 40 Ton

3.3.11 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) ของ Thermo scientific รุ่น Nicolet 6700

3.3.12 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K

3.3.13 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR500

3.3.14 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact-pendulum tester) ของ GOTECH รุ่น GT-7045-MD

3.3.15 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง (analytical balance) ของ Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT

3.3.16 หม้อบด (ball mill) ขนาด 1 กิโลกรัม

3.3.17 ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 100 เมช

3.3.18 เครื่องกวนให้ความร้อน (hot plate stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ของ IKA รุ่น C-MAG HS7

3.3.19 คอนเดนเซอร์ (condenser)

3.3.20 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ขนาด 5 เซนติเมตร

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต (PBS-g-GMA) [8]

3.4.1.1 เริ่มจากการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แล้วนำมาผสมกับไกลซีดีลเมทาคริเลตในอัตราส่วน 2 phr แล้วใช้ไดควิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา คนผสมสารให้ทั่วถึงกัน

3.4.1.2 หลังจากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับไกลซีดีลเมทาคริเลตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่

ตารางที่ 3. 1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลต

โซน (Zone)	อุณหภูมิ (temperature °C)
Feed	100
1	115
2	120
3	124
Die	128
ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	45

3.4.1.3 นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลต มาตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก

3.4.1.4 นำซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้ามาบดด้วยหม้อบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.1.5 นำซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่ผ่านการบดแล้วมาทำการ sieve ซึ่งใช้ sieve ที่มีขนาด 100 เมช โดยจะได้ซิลิกาที่นำไปเตรียมพอลิบิวทิลีนคอมพอสิตต่อไป

3.4.2 การเตรียมพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตคอมพอสิต โดยศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

3.4.2.1 ผลของอัตราส่วนของสารเสริมความเข้ากันได้ที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตกับสารเสริมความเข้ากันได้ในอัตราส่วน 0, 5, และ 10 phr (part per hundred resin)

3.4.2.2 ผลของอัตราส่วนและชนิดของของซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้าที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตกับซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้าในอัตราส่วน 0.5, 1, 2 และ 3 phr (part per hundred resin)

3.4.2.3 ผลของอัตราส่วนของซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้าที่มีการเติมสารเสริมความเข้ากันได้ที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากพอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตกับซิลิกาจากแกลบกับซี

ศึกษาการค้ำที่มีการเติมสารเสริมความเข้ากันได้ในอัตราส่วน 0.5, 1, 2 และ 3 phr (part per hundred resin)

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมพอลิอีพ็อกซีเรซินคอมพาวนด์

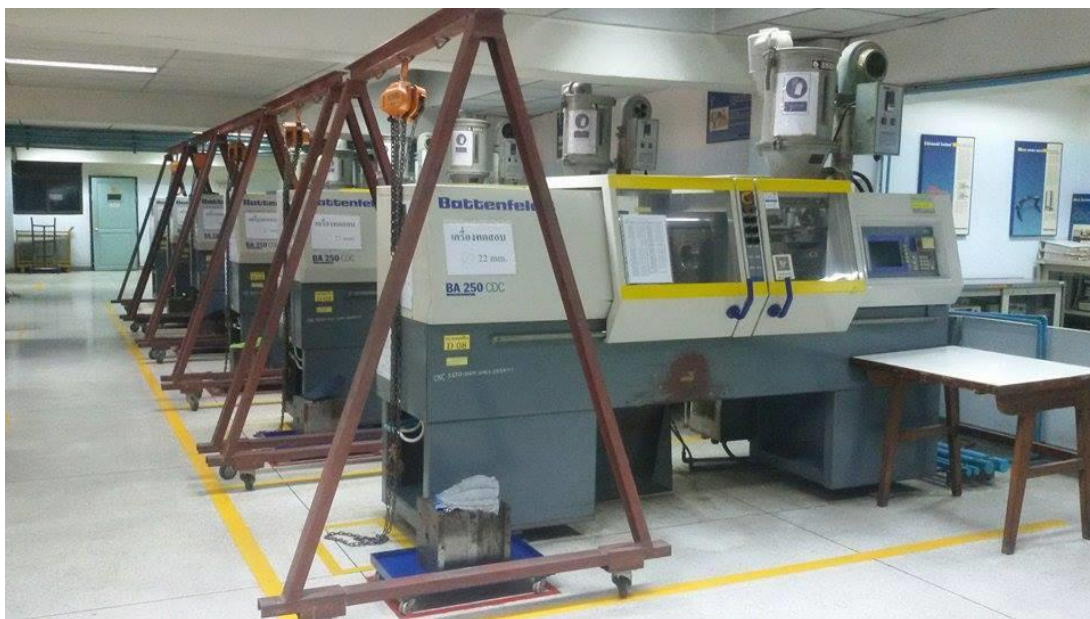
ชื่อสูตรคอมพอสิต	ปริมาณ PBS-g-GMA (phr)	ปริมาณ RH silica (phr)	ปริมาณ Silica 9000 GR (phr)
Neat PBS	-	-	-
PBS/RHS 0.5	-	0.5	-
PBS/RHS 1.0	-	1.0	-
PBS/RHS 2.0	-	2.0	-
PBS/RHS 3.0	-	3.0	-
PBS/com 0.5	-	-	0.5
PBS/com 1.0	-	-	1.0
PBS/com2.0	-	-	2.0
PBS/com 3.0	-	-	3.0
PBS/g5	5	-	-
PBS/g5/RHS 0.5	5	0.5	-
PBS/g5/RHS 1.0	5	1.0	-
PBS/g5/RHS 2.0	5	2.0	-
PBS/g5/RHS 3.0	5	3.0	-
PBS/g5/com 0.5	5	-	0.5
PBS/g5/com 1.0	5	-	1.0
PBS/g5/com 2.0	5	-	2.0
PBS/g5/com 3.0	5	-	3.0
PBS/g10	10	-	-

PBS/g10/RHS 0.5	10	0.5	-
PBS/g10/RHS 1.0	10	1.0	-
PBS/g10/RHS 2.0	10	2.0	-
PBS/g10/RHS 3.0	10	3.0	-
PBS/g10/com0.5	10	-	0.5
PBS/g10/c0m1.0	10	-	1.0
PBS/g 10/com2.0	10	-	2.0
PBS/g10/com 3.0	10	-	3.0

จากนั้นนำคอมพอสิตที่ได้อบด้วยตู้อบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทำภายใต้ อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับพอลิบิวทิลีนซกซิเนตคอมพอสิต



รูปที่ 3.3 ตู้อบ



รูปที่ 3.4 เครื่องฉีกพลาสติก

3.4.2.4 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของไกลซีดีลเมทาคริเลต

3.4.2.4.1 ละลายเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลต 2 กรัม ในคลอโรฟอร์ม 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การละลายของพอลิวิวทิลีนซัคซิเนตในคลอโรฟอร์ม

3.4.2.4.2 ใส่กรดไฮโดรคลอริกในไดเอทิลอีเทอร์ 0.5 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ นำปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เมื่อถึงจุดยุติมาคำนวณดังนี้[21]

$$G = \frac{142.15 \times (V_0 - V) \times c}{1000 \times m} \times 100\%$$

โดยให้ V_0 แทนปริมาตรของ KOH/CH₃OH เริ่มต้น

V แทนปริมาตรสุดท้าย

C แทนความเข้มข้นของสารละลาย KOH/CH₃OH

M แทนน้ำหนักของตัวอย่าง

3.4.2.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิวิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อวิเคราะห์หาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลต โดยใช้การทดสอบในโหมด ATR ซึ่งใช้ความถี่ในช่วงคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$

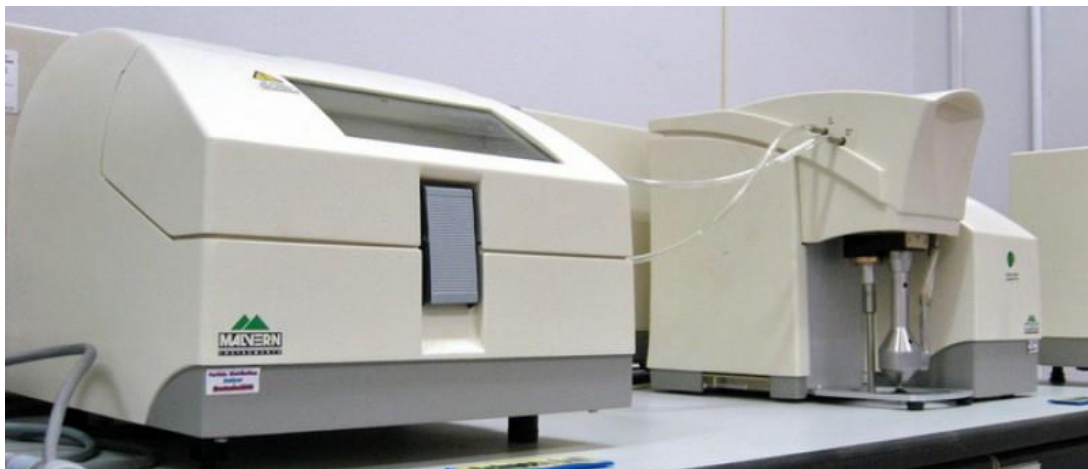


รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของซิลิกา

3.4.3.1 การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคซิลิกา ด้วยเครื่อง particle size analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ ซึ่งลำแสงจะถูกขยายขนาดแล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหของแสงแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงแสงจึงสามารถทำให้คำนวณหาขนาดอนุภาคได้



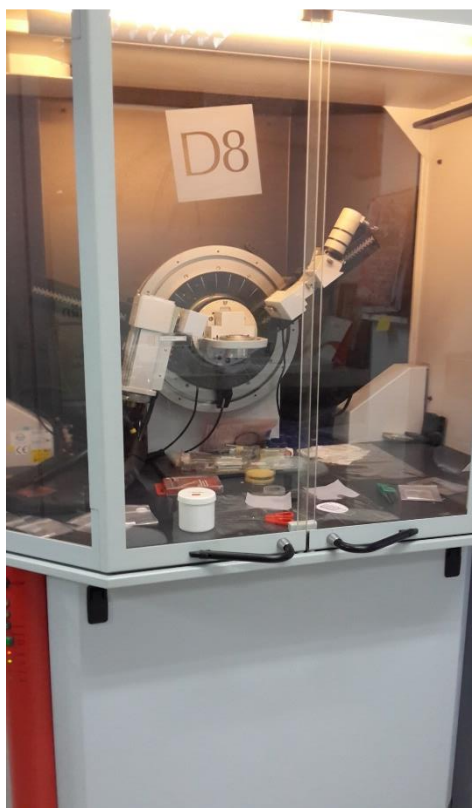
รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ห้อนุภาค

3.4.3.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกา ด้วยเครื่อง BET surface area ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้เทคนิคการแทนที่พื้นผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาค

3.4.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิลิกา ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ เพื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกา



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

3.4.4.1 การวิเคราะห์น้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) หรือ onset หรือ midpoint หรือ endset ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต ซึ่งใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีน้ำหนักประมาณ 4-8 มิลลิกรัม และทำการวิเคราะห์สมบัติในช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

3.4.4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งใช้วิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต ซึ่งใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีน้ำหนักประมาณ 4-8 มิลลิกรัม และทำการวิเคราะห์สมบัติในช่วงอุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส จนถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

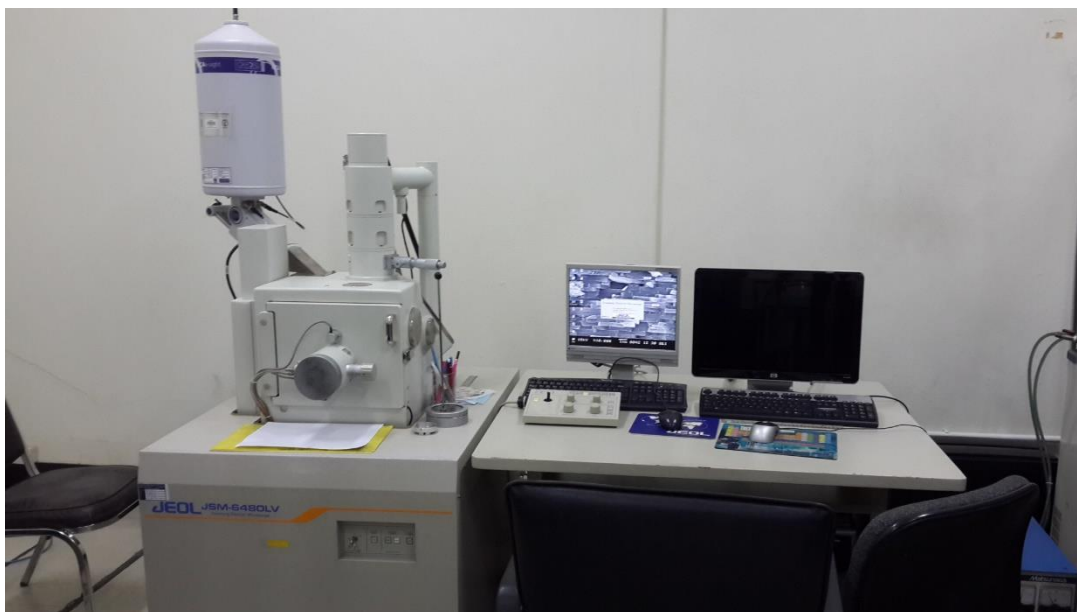


รูปที่ 3.11 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.4.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

3.4.5.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เพื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต โดยนำชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมาตัด เพื่อวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานจากนั้นเคลือบทองเพื่อทำให้เกิดการนำไฟฟ้า ใช้กำลังขยายในการทดสอบ 2,000 เท่า



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต

3.4.6.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการต้านแรงดึง (tensile properties) ของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังรูปที่ 3.13 เพื่อทำการวิเคราะห์ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) และค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) โดยนำชิ้นงานที่มีความยาว 12.75 เซนติเมตร ความกว้าง 3.25 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน (gauge length) 55 มิลลิเมตร ซึ่งการทดสอบใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน ด้วยอัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

3.4.6.2 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

ทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ของพอลิโพรพิลีนซีกซ์ซิเนตคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยนำชิ้นงานที่มีความยาว 12.40 เซนติเมตร ความกว้าง 3.25 เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบใช้ load cell ขนาด 2500 นิวตัน ความเร็วในการทดสอบ 50 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ติดตั้งชุดทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

3.4.6.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก

ทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) ของพอลิเอทิลีนซีกซีเนตคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics ด้วย Impact-Pendulum Tester ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยนำชิ้นงานที่มีความกว้าง 10.75 เซนติเมตร ความหนา 3.25 เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบใช้หัว้อนขนาด 1 จูล



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า

4.1.1 ขนาดอนุภาค

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าด้วยเครื่อง particle size analyzer พบว่าซิลิกาทางการค้ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าซิลิกาจากแกลบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า

ตัวอย่าง	ขนาดของตัวอย่าง (μm)
ซิลิกาจากแกลบ	7.99
ซิลิกาทางการค้า	8.94

4.1.2 พื้นที่ผิว

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าด้วยเครื่อง BET surface area analyzer พบว่าซิลิกาทางการค้ามีพื้นที่ผิวมากกว่าซิลิกาจากแกลบ ซึ่งแสดงถึงความพรุน (porosity) ที่สูงกว่าซิลิกาจากแกลบ จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับซิลิกามากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

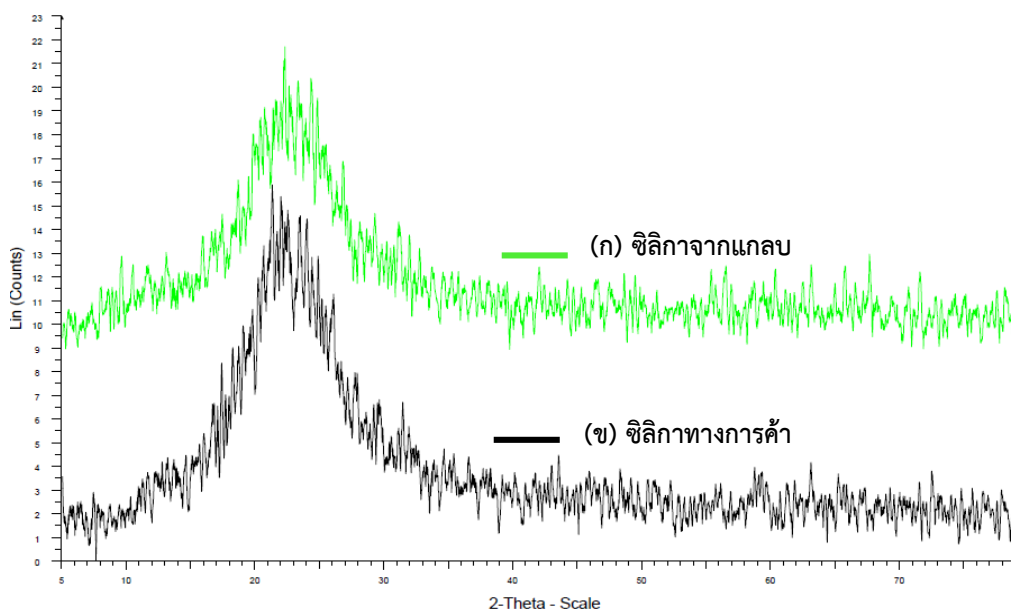
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวของอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)
ซิลิกาจากแกลบ	136.98
ซิลิกาทางการค้า	182.57

4.1.3 โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกาโดยใช้เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) พบว่าโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้ามีลักษณะ

พีกที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นพีกที่แสดงว่าซิลิกาทั้งสองชนิดมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน โดยมีค่า 2θ ประมาณ 22 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



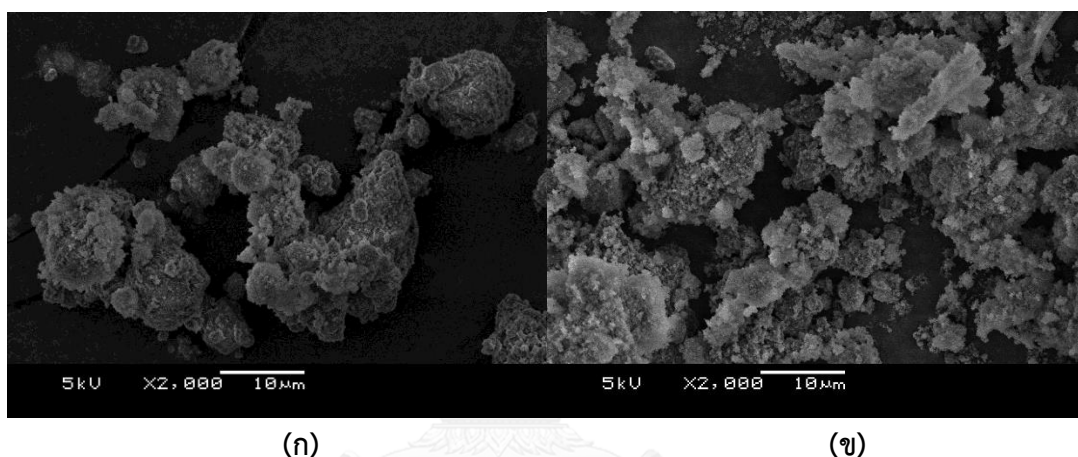
รูปที่ 4.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของ — (ก) ซิลิกาจากแก้ว และ — (ข) ซิลิกาทางการค้า

4.1.4 โครงสร้างทางเคมี

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาจากแก้วและซิลิกาทางการค้าโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.5 พบว่าสเปกตรัมของตัวเต็มทั้งสองประเภทมีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยปรากฏพีกที่เลขคลื่น 1087 และ 1067 cm^{-1} สอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของ (Si-O-Si bond stretching)

4.1.5 สัณฐานวิทยา

ผลจากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้า (ก) ซิลิกาจากแกลบ (ข) ซิลิกาทางการค้า ซึ่งใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาของซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้า พบว่าลักษณะของอนุภาคจะรวมกลุ่มกัน เนื่องจากที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก จึงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกา



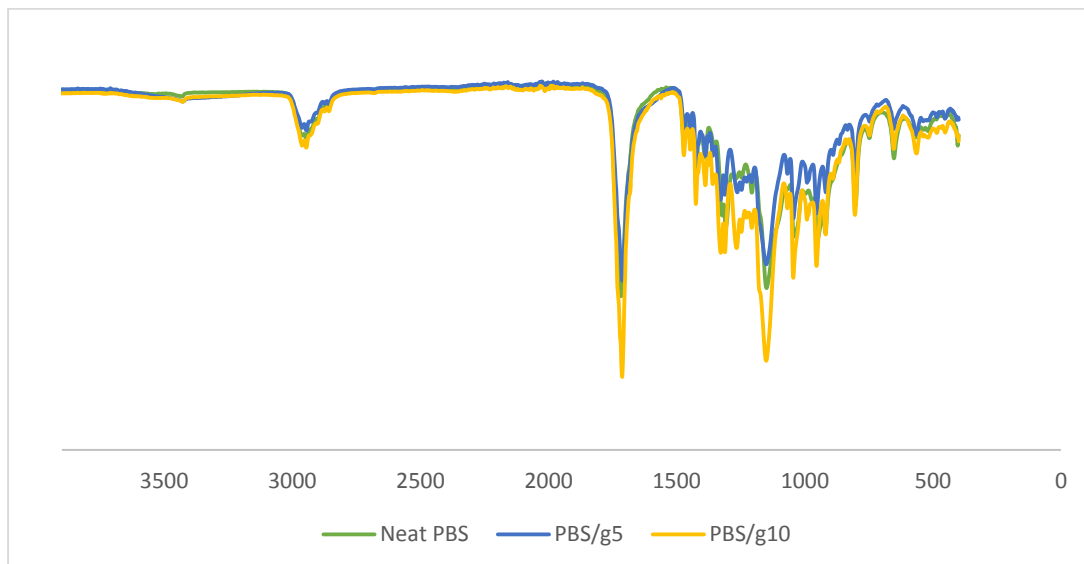
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้า(ก) ซิลิกาจากแกลบ (ข) ซิลิกาทางการค้า

4.2 พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์กราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต

4.2.1 โครงสร้างทางเคมี

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์กราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลตโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์กราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ซึ่งปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1712 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึง C=O stretching ของหมู่คาร์บอนิลของพันธะเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ โดยพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์กราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลตปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1731 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงหมู่คาร์บอนิลของพันธะเอสเทอร์ของไกลซีดีลเมทาคริเลต ซึ่งจากผลการทดลองไม่พบปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1731 cm^{-1} เนื่องจากใน

ขั้นตอนการตกตะกอนได้มีการตกตะกอนด้วยเอทานอลเย็นและล้างตะกอนด้วยเมทานอลจึงทำให้ไม่สามารถพบปรากฏฟีกที่เลขคลื่น 1731 cm^{-1} ได้



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกา พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลต

4.2.2 ปริมาณการกราฟต์

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลตลงบนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยในการคำนวณหาปริมาณการกราฟต์ของไกลซีดิลเมทาคริเลตมีสูตรตั้งสมการต่อไปนี้ [8, 21] ได้เลือกใช้ปริมาณไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ที่ 1.5 phr กับปริมาณไกลซีดิลเมทาคริเลตที่ 2 phr เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้

$$G = \frac{142.15 \times (V_0 - V) \times c}{1000 \times m} \times 100\%$$

โดยให้ V_0 แทนปริมาตรของ KOH/CH₃OH เริ่มต้น

V แทนปริมาตรสุดท้าย

C แทนความเข้มข้นของสารละลาย KOH/CH₃OH

M แทนน้ำหนักของตัวอย่าง

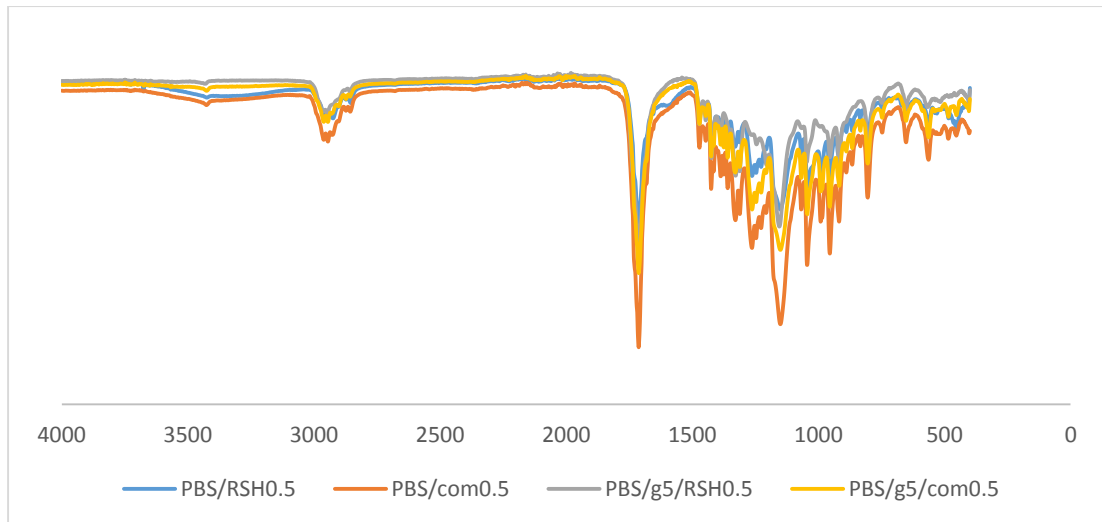
ตารางที่ 4.3 ปริมาณการกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลตบนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

	เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ (%)		
	GMA (phr)		
DCP (phr)	2	5	10
1.5	1.35	2.23	3.12

4.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.3.1 โครงสร้างทางเคมี

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.5 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคซิลิกาจากแคลกับซิลิกาทางการค้าจากรูปที่ 4.2 จะปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1087 และ 1067 cm^{-1} แสดงถึงการดูดกลืนแสงของหมู่ไฮลอคเซน (Si-O-Si) ซึ่งพบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต จะปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1712 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึง C=O stretching และยังปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1066-1067 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ Si-O vibration แต่ทั้งนี้การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลตจะปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1731 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลต ซึ่งจากการทดลองไม่พบปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1731 cm^{-1} เนื่องจากในขั้นตอนการตกตะกอนได้มีการตกตะกอนด้วยเอทานอลเย็นและล้างตะกอนด้วยเมทานอลจึงทำให้ไม่สามารถพบปรากฏพีคที่เลขคลื่น 1731 cm^{-1} ได้



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 5 phr



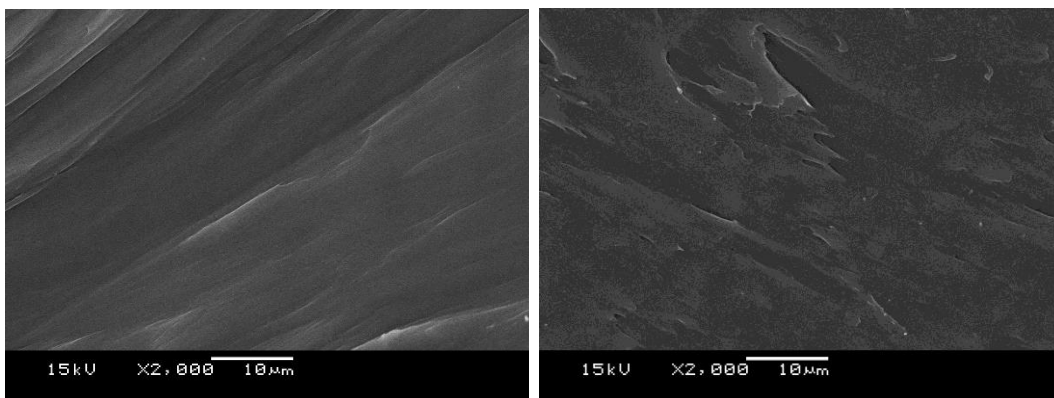
รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 10 phr

4.3.2 สัณฐานวิทยา

ผลจากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้า (ก) ซิลิกาจากแกลบ (ข) ซิลิกาทางการค้า ซึ่งใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า รูปที่ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาของลิบิวทิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต 5 phr และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกราฟต์ไกลซีดีลเมทาคริเลต 10 phr

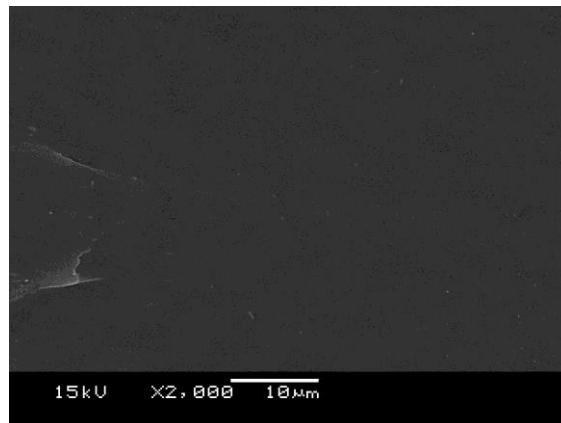
จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ ซึ่งใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า รูปที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ พบว่าลักษณะของอนุภาคจะรวมกลุ่มกัน เนื่องจากที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก จึงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกา

แต่แนวโน้มปริมาณของการรวมตัวกันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแตกหักของชิ้นงานเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคของซิลิกามีการแยกเฟสระหว่างพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกับอนุภาคของซิลิกา เนื่องจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันจึงทำให้ซิลิกาชอบรวมตัวอยู่ด้วยตัวเองมากกว่าจะกระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตจึงเป็นข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดขึ้น ดังนั้นการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะช่วยทำให้อนุภาคของซิลิกาเกิดอันตักิริยากับเฟสของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตได้ดีมากขึ้น



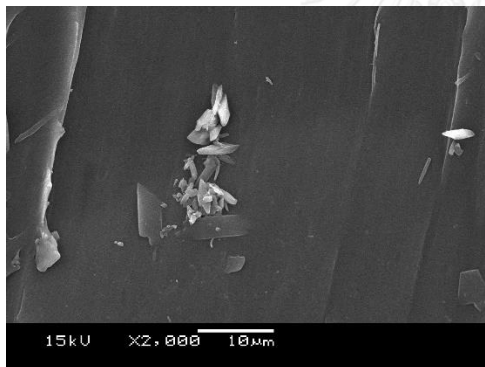
(ก)

(ข)

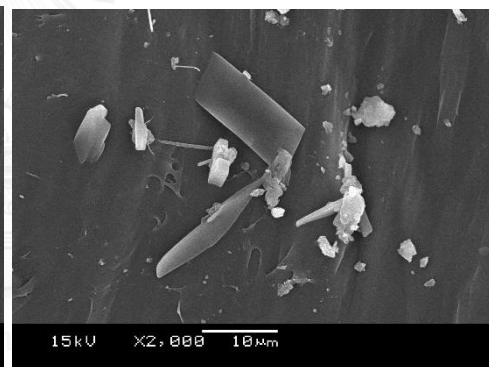


(ค)

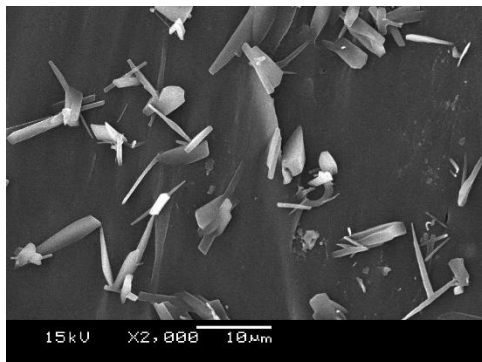
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต (ก) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ (ข) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลต 5 phr (ค) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซีดิลเมทาคริเลต 10 phr



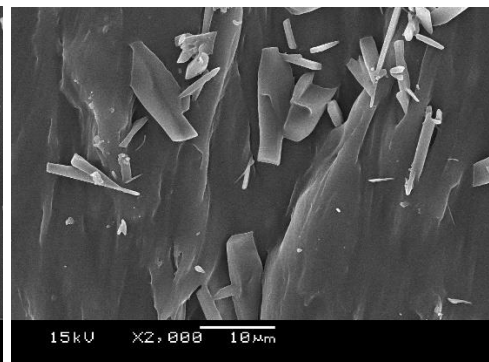
(1)PBS/RHS0.5



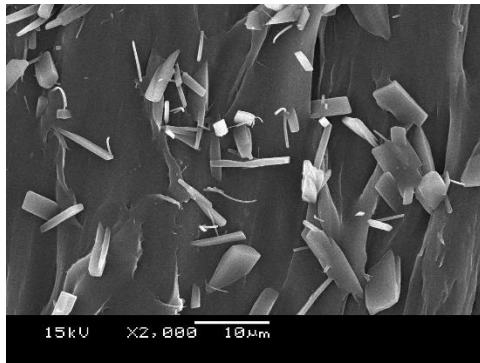
(5) PBS/com0.5



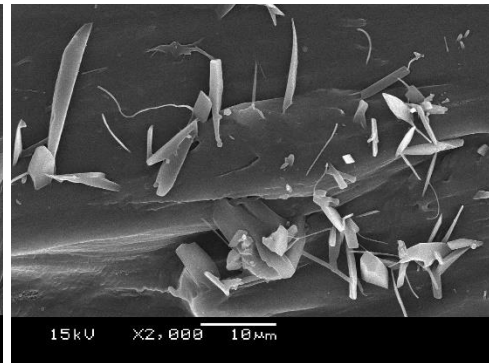
(2)PBS/RHS1



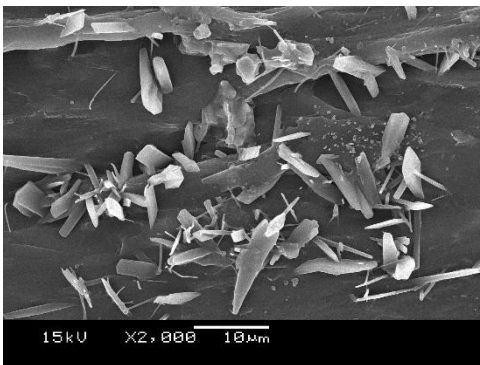
(6) PBS/com0.5



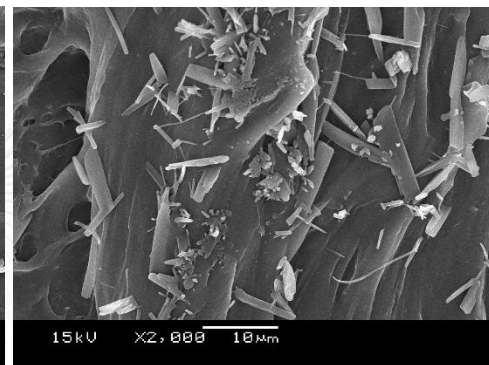
(3) PBS/RHS2



(7) PBS/com2

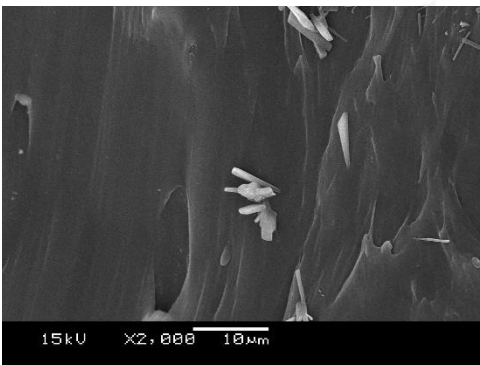


(4) PBS/RHS3

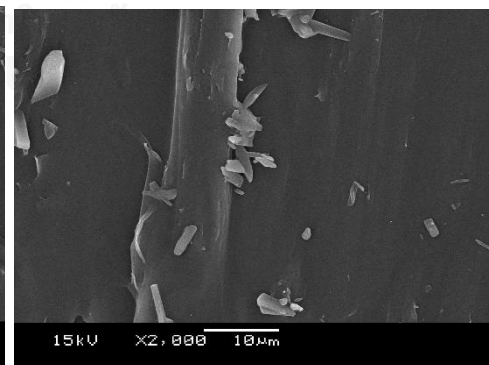


(8) PBS/com3

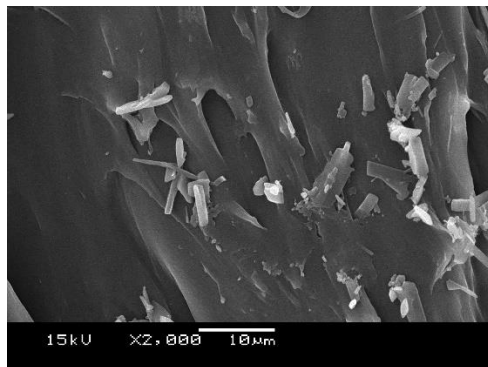
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนซัดซ์ซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้า ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



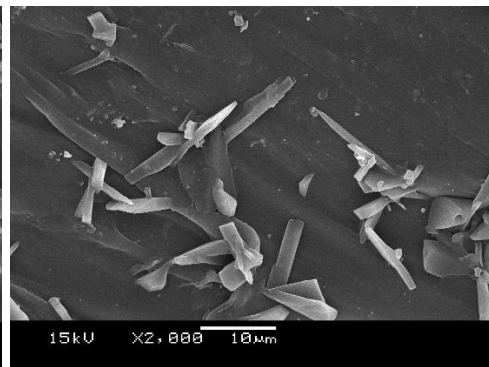
(9) PBS/g5/RHS0.5



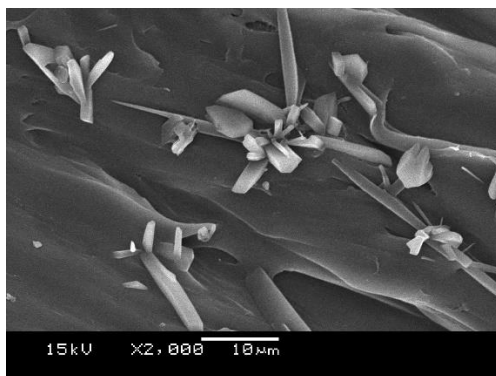
(13) PBS/g5/com0.5



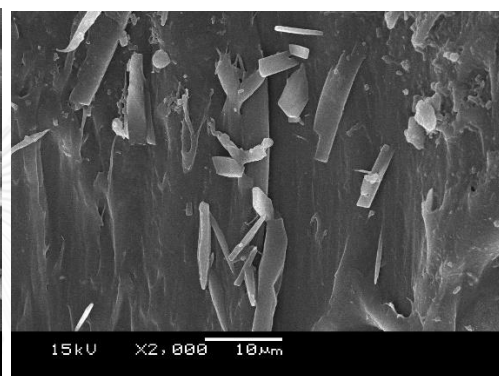
(10) PBS/g5/RHS1



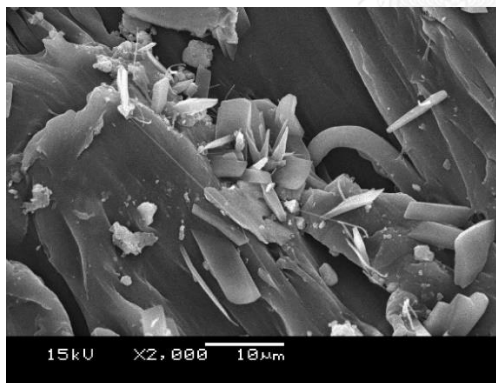
(14) PBS/g5/com1



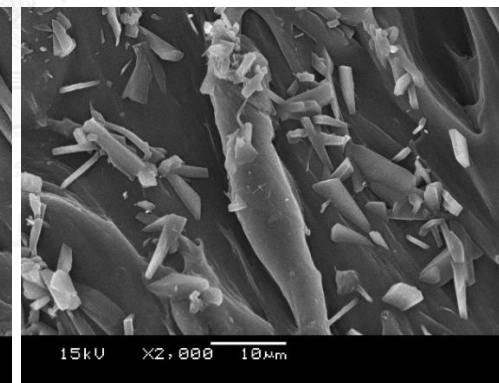
(11) PBS/g5/RHS2



(15) PBS/g5/com2

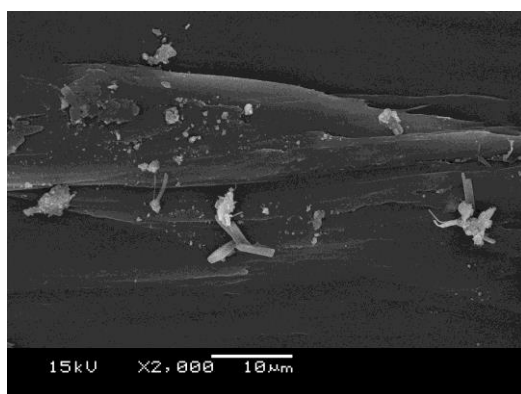


(12) PBS/g5/RHS3

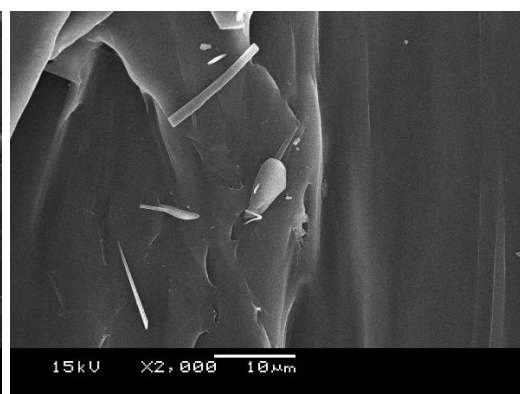


(16) PBS/g5/com3

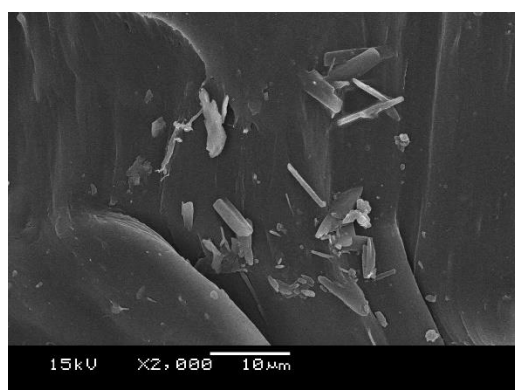
รูปที่ 4. 8 สัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 5 phr ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



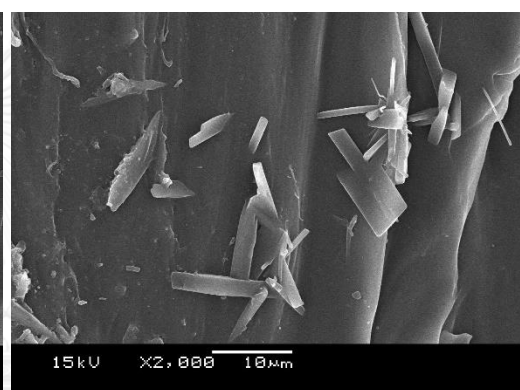
(17) PBS/g10/RHS0.5



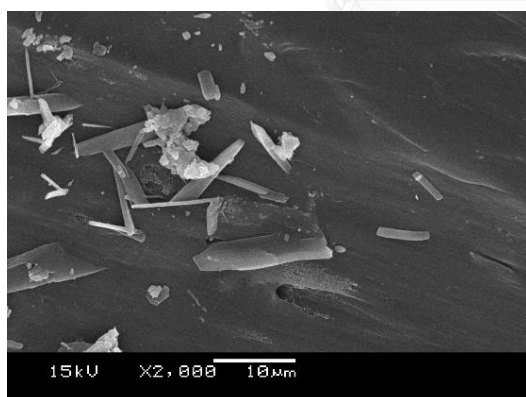
(21) PBS/g10/com0.5



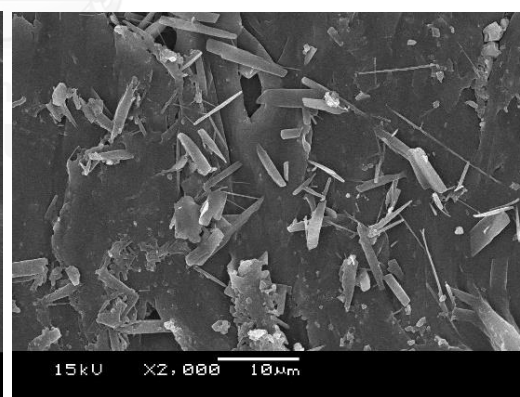
(18) PBS/g10/RHS1



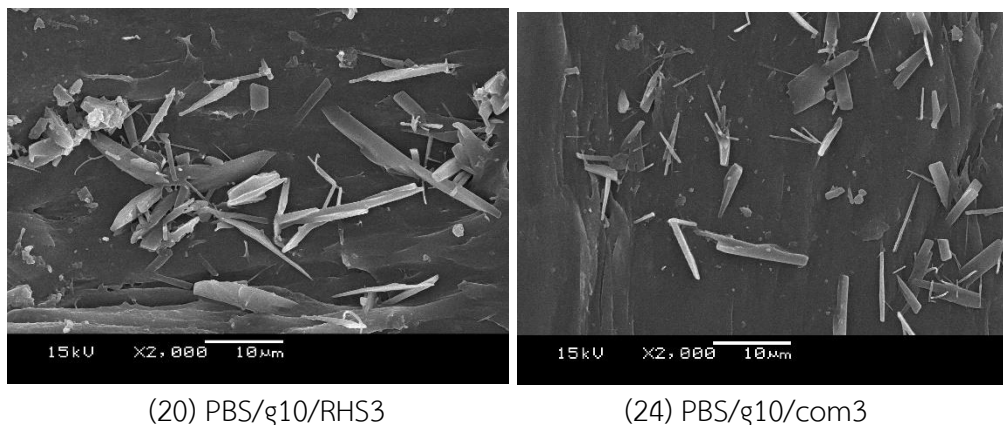
(22) PBS/g10/com1



(19) PBS/g10/RHS2



(23) PBS/g10/com2



รูปที่ 4. 9 สันฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 10 phr ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

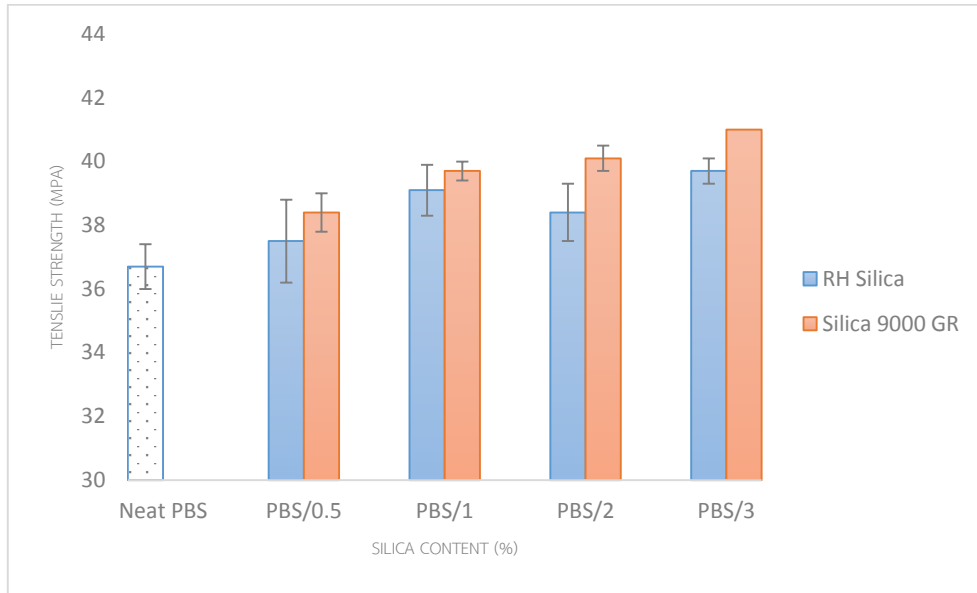
4.3.3 สมบัติเชิงกล

4.3.3.1 ความทนแรงดึง

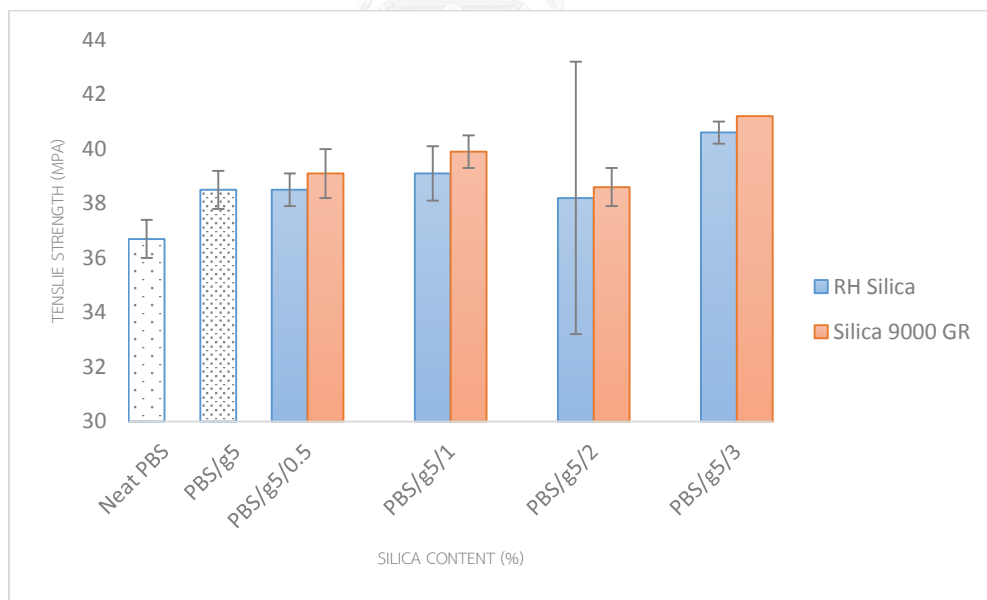
เมื่อศึกษาผลของการเติมซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ปริมาณที่แตกต่างกันในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตต่อความทนแรงดึง (tensile strength) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 – 4.12 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 36.7 MPa โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เติมซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่ไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 3 phr ของซิลิกา 1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 39.7 และ 41.0 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ เนื่องจากการเติมซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้าทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคของซิลิกา [22] ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคของซิลิกาที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้าที่ถูกผสมเข้าไปในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตตามลำดับ

เมื่อเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ลงในคอมพอสิตพบว่าค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ จะช่วยให้อันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกาซิลิกานั้นดีขึ้นกว่าการที่ไม่ได้ใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ โดยเมื่อพิจารณาจากซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้านอกจากนี้ยังอาจสรุปได้ซิลิกาทางการค้าจะให้คอมพอสิตที่มีค่าความทนแรงดึงสูงกว่าซิลิกาจากแกลบ

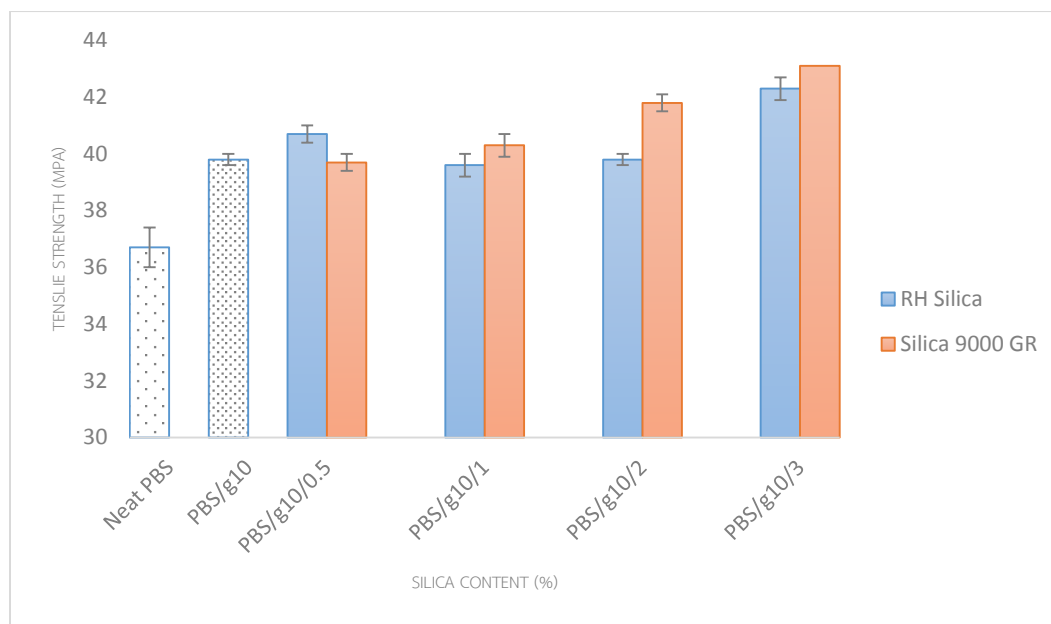
เนื่องจากซิลิกาทางการค้ามีพื้นที่ผิวที่มากกว่าซิลิกาจากแกลบจึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคของซิลิกาได้ดีกว่าซิลิกาจากแกลบ



รูปที่ 4. 10 ทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิต



รูปที่ 4. 11 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



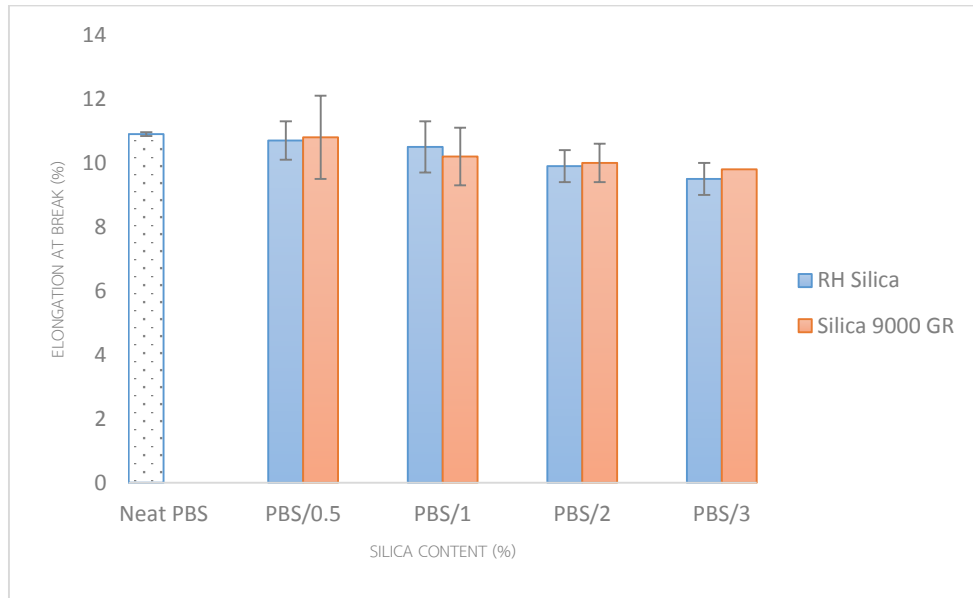
รูปที่ 4. 12 ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

4.3.3.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break)

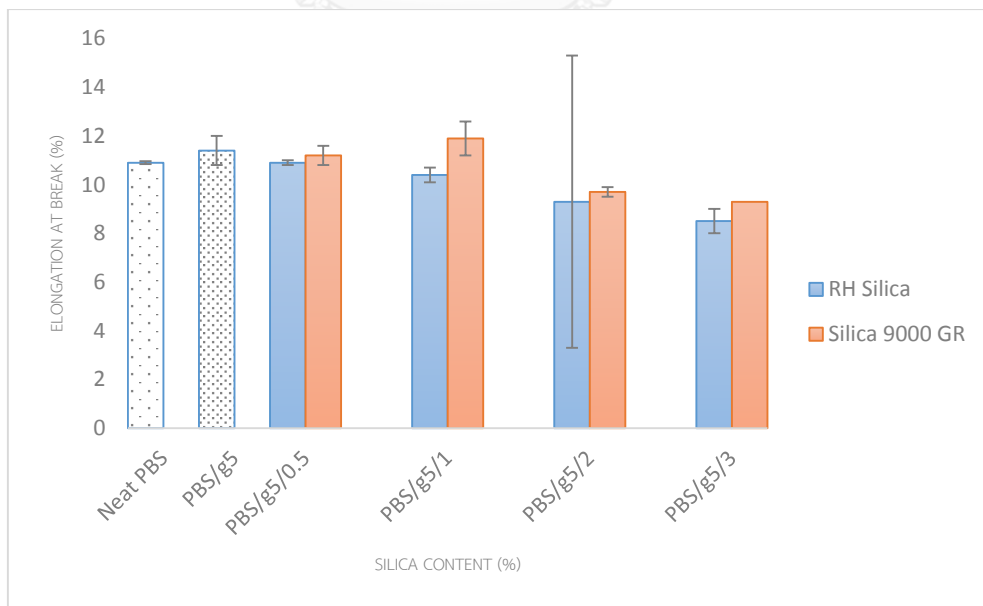
เมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณในการเติมซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่แตกต่างกันในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต จากรูป 4.13 - 4.15 พบว่าที่ปริมาณ 0.5 phr ของซิลิกาจากแคลบกับซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะที่ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมากที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณซิลิกาตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคซิลิกาเกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ไม่ดีและอนุภาคของซิลิกาขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของพอลิเมอร์

โดยเมื่อพิจารณาซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้า พบว่าซิลิกาทางการค้าจะให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่มากกว่าซิลิกาจากแคลบ จึงมีการปรับปรุงสมบัติความยืดสูงสุด ณ จุดขาดโดยการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 และ 10 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ จะช่วยให้อันตกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกาซิลิกานั้นดีขึ้นกว่าการที่ไม่ได้ใส่สารเสริมสภาพความเข้ากันได้ โดยเมื่อพิจารณาจากซิลิกาจากแคลบกับซิลิกาทางการค้า จากรูปที่ 4.13 - 4.15 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาทางการค้าจะให้ค่า

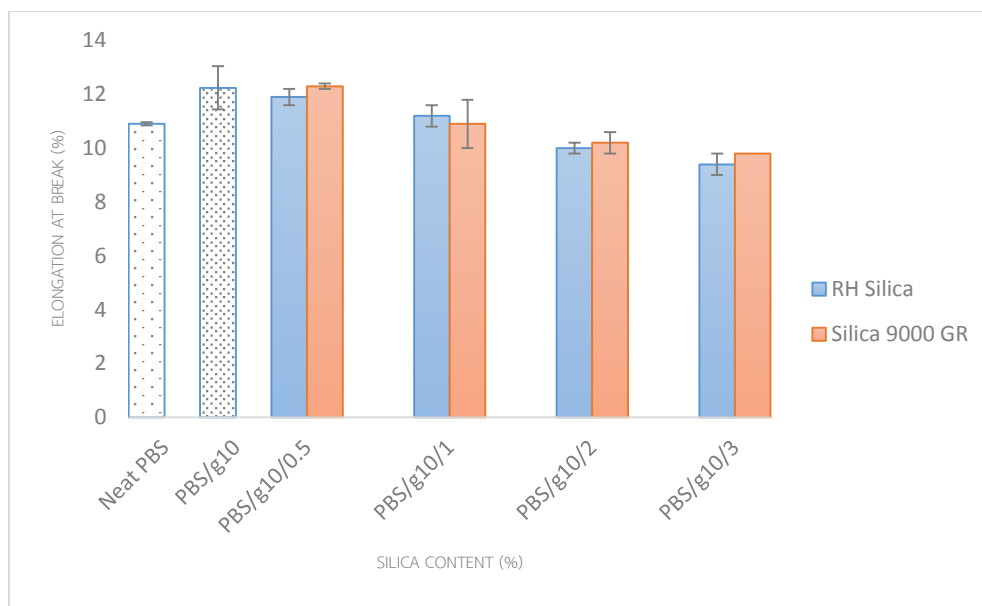
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่สูงกว่าซิลิกาจากแกลบเนื่องจากซิลิกาทางการค้ามีพื้นที่ผิวที่มากกว่าซิลิกาจากแกลบจึงทำให้เกิดอันตกริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคของซิลิกาได้มากกว่าซิลิกาจากแกลบ



รูปที่ 4. 13 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



รูปที่ 4. 14 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



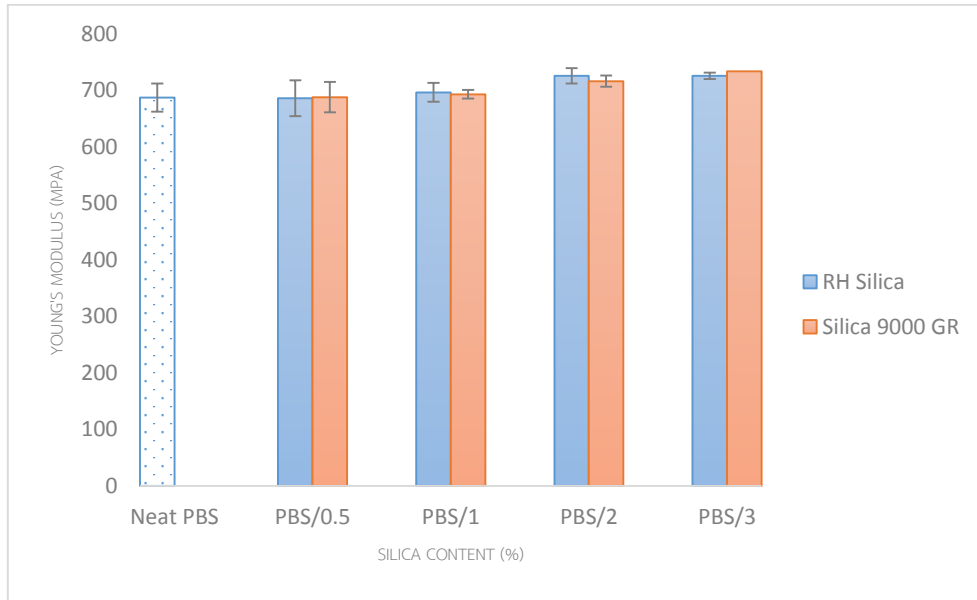
รูปที่ 4. 15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

4.3.3.3 มอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยัง (Young's modulus)

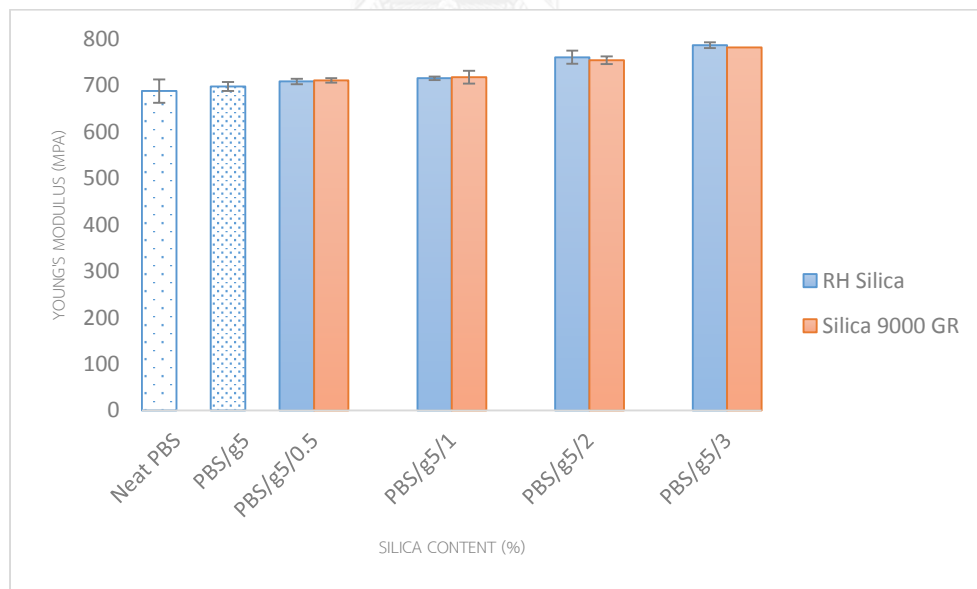
มอดุลัสของยังเป็นตัวที่บ่งบอกความสามารถในการคงรูปและสามารถบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ โดยถ้าวัสดุมีค่ามอดุลัสของยังมาก แสดงว่าวัสดุมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความยาว คือ วัสดุนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความยาวที่น้อยในขณะที่มีแรงมากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือความเค้นมาก เมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณในการเติมซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่แตกต่างกันในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต จากรูป 4.16 - 4.18 พบว่าที่ปริมาณ 3 phr ของซิลิกาจากแคลบกับซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยังมากที่สุด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์จะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยังน้อยที่สุด คือ 687.7 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความสามารถในการยืดหยุ่นมากที่สุด จึงมีความสอดคล้องกับค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีค่าสูงกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

โดยเมื่อทำการให้รับแรงมากขึ้นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ปริมาณ 0.5 1 และ 2 จะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยังที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่อนุภาคซิลิกาจาก

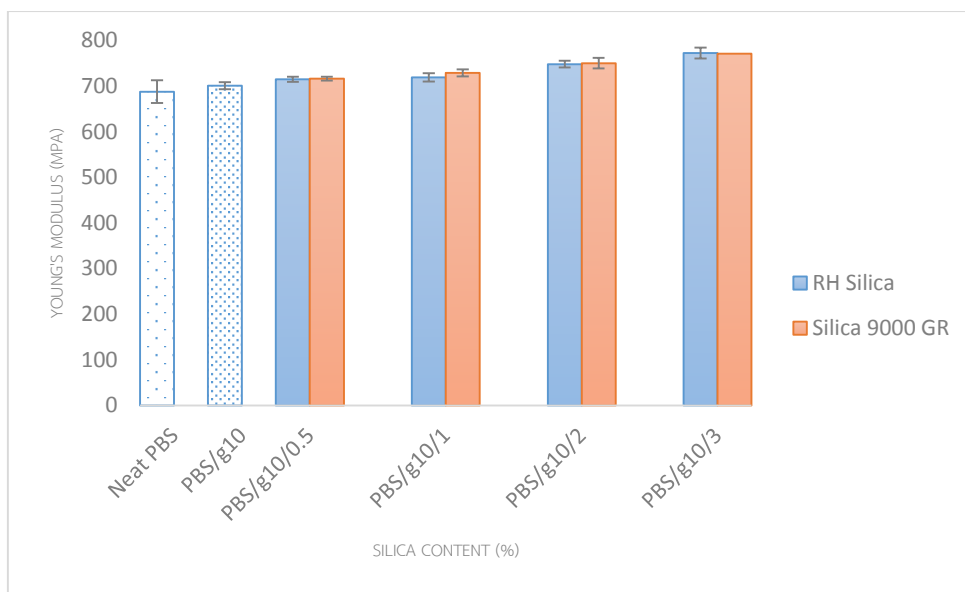
แกลกับซิลิกาทางการค้าเกิดการรวมกลุ่มกัน จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับแรง ก็จะทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4. 16 มอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต



รูปที่ 4. 17 มอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



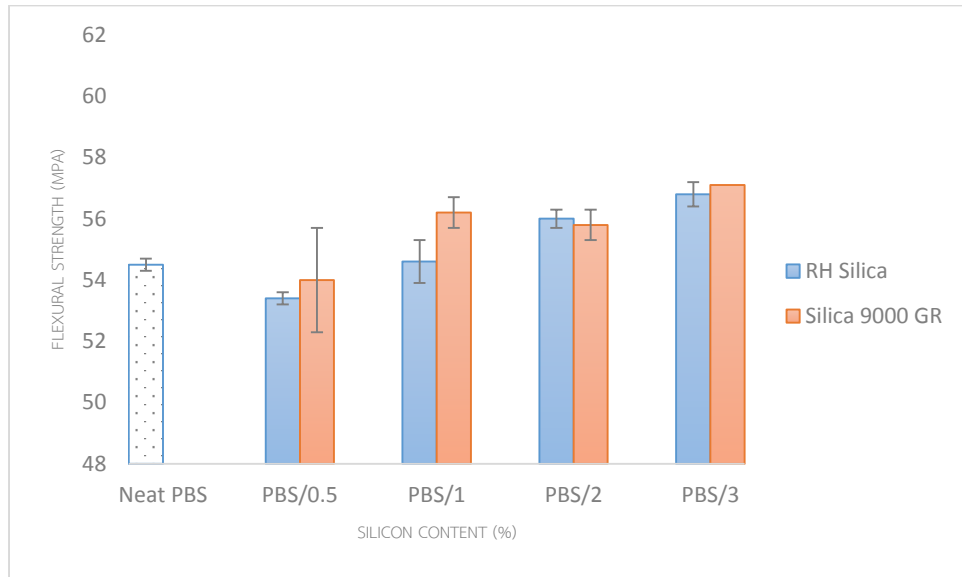
รูปที่ 4. 18 มอดุลัสยืดหยุ่นหรือมอดุลัสของยังของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

4.3.3.4 ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

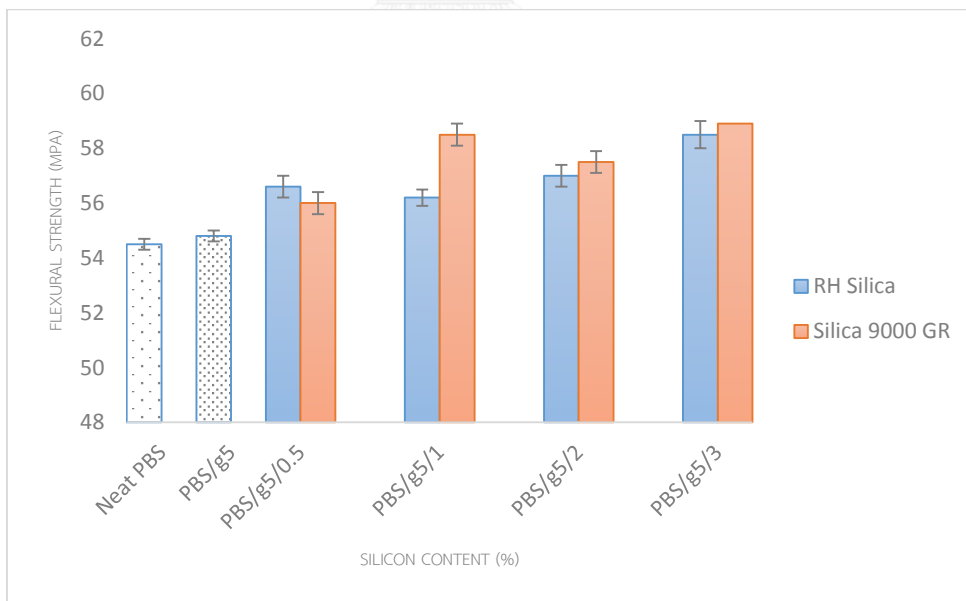
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน ซึ่งมีการเติมซิลิกาจากเกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ซึ่งใช้ load cell ขนาด 2.5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นการทดสอบความทนทานต่อแรงดัดโค้ง เมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณในการเติมซิลิกาจากเกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่แตกต่างกันในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต จากรูป 4.19 - 4.21 พบว่าที่ปริมาณ 3 phr ของซิลิกาจากเกลบกับซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะมีค่าความทนแรงดัดโค้ง

พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิกาจากเกลบที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะมีค่าความทนแรงดัดโค้งต่ำกว่าเมื่อพิจารณาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ อีกทั้งค่าความทนแรงดัดโค้งจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากเกลบกับซิลิกาทางการค้าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกาจึงทำให้เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกถูกส่งมายังเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะไม่สามารถที่จะถ่ายโอนแรงไปสู่อนุภาคซิลิกาได้ เนื่องจากความไม่เข้ากันของทั้งสองเฟส ทำให้ชิ้นงานเกิดการโค้งงอได้ง่ายและเมื่อพิจารณาถึงพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่

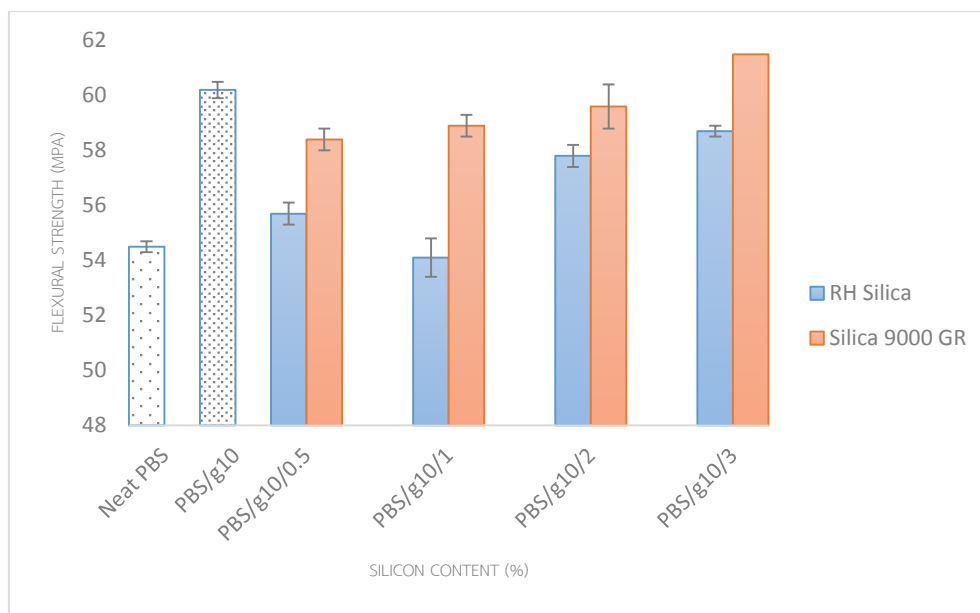
เติมอนุภาคซิลิกาที่มีการผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ จะเห็นได้ว่าค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเกิดอันตริยากับอนุภาคของซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้าได้ดีขึ้น



รูปที่ 4. 19 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



รูปที่ 4. 20 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



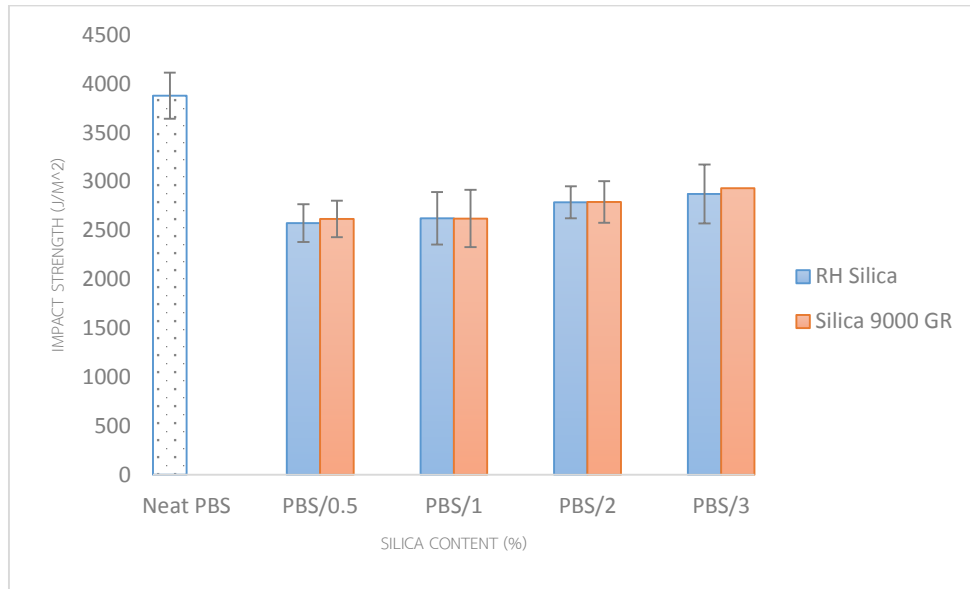
รูปที่ 4. 21 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

4.3.3.5 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

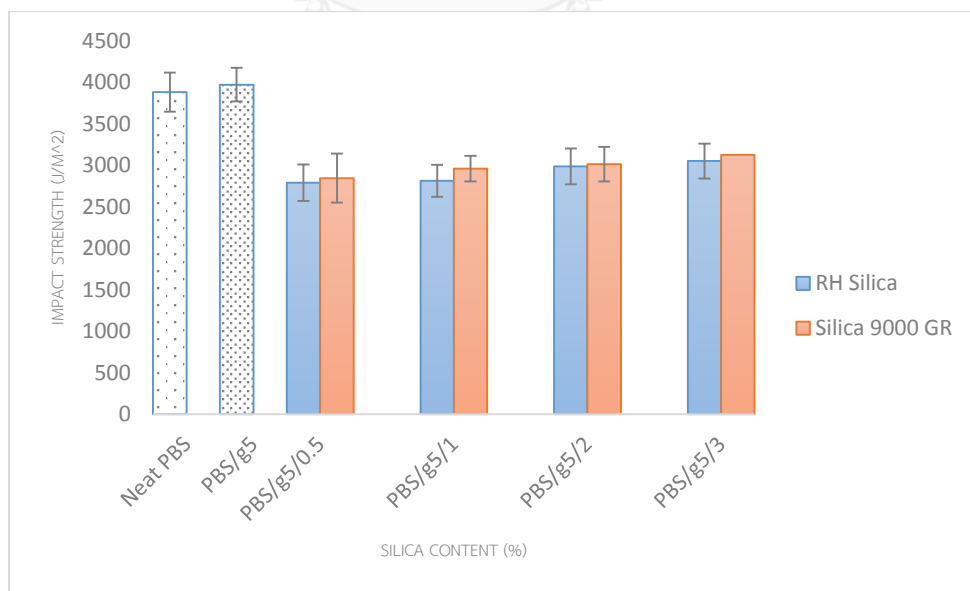
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน ซึ่งมีการเติมซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact-pendulum tester) แบบ Izod Impact Testing (Notched Izod) ซึ่งใช้ค้อนขนาด 1.0 จูล การทดสอบความทนแรงกระแทกจะทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมในการดูดซับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด ซึ่งเมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณในการเติมซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่แตกต่างกันในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต จากรูป 4.202 - 4.24 พบว่าที่ปริมาณ 3 phr ของซิลิกาจากแกลบกับซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะมีค่าความทนแรงกระแทกมากที่สุด

พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีการเติมซิลิกาจากแกลบที่มีการผสมสารและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะมีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเติมซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมสารและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ ซึ่งซิลิกาทางการค้ามีพื้นที่ผิวมากกว่าซิลิกาจากแกลบและยังเกิดอันตรกิริยาได้มากกว่า อีกทั้งผลของการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้คอมพอสิตจะทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจากที่ไม่มีการเติมสารเสริมสภาพลงไป เนื่องจากสารเสริมสภาพความเข้ากันได้สามารถทำให้ความสามารถในการเข้าทำ

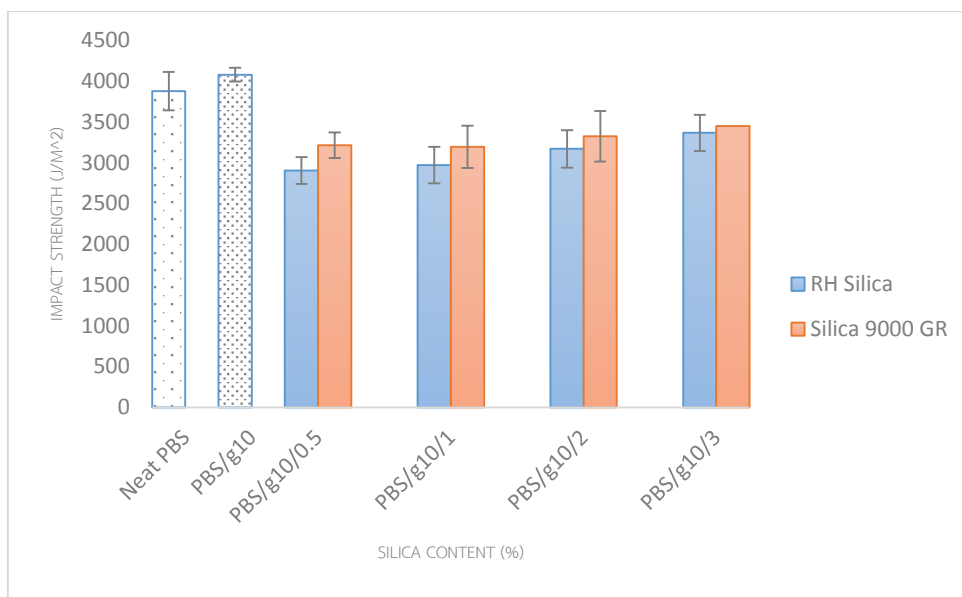
ปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของซิลิกาได้ดีขึ้น ทำให้อันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคของซิลิกาได้ดีขึ้น ซึ่งเมื่อมีการรับแรงอย่างฉับพลันสามารถที่จะส่งผ่านแรงจากเฟสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ดีจึงทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4. 22 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



รูปที่ 4. 23 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 5 phr



รูปที่ 4. 24 ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 10 phr

4.3.4 สมบัติทางความร้อน

4.3.4.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึก

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, DSC) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ มีอุณหภูมิหลอมเหลว (**melting temperature, T_m**) ที่ลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อมีการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ลงไป เนื่องจากการเกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลระหว่างซิลิกากับสายโซ่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ส่งผลต่อการเกิดผลึกมีค่าลดลงบ้าง ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวที่วิเคราะห์ได้จึงต่ำลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

Sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	Crystallinity (%)
Neat PBS	-32.1	78.3	111.4	68.6	62.5
PBS/g5	-33.1	78.2	111.1	76.2	69.8
PBS/g10	-32.0	78.0	111.3	73.2	67.7
PBS/RHS0.5	-35.9	78.9	111.3	71.1	66.5
PBS/RHS1	-34.7	76.0	111.0	75.6	68.9
PBS/RHS2	-32.9	74.7	111.0	76.6	70.1
PBS/RHS3	-31.8	76.5	111.0	70.1	64.9
PBS/com0.5	-33.8	75.9	111.1	75.7	70.8
PBS/com1	-34.6	76.0	110.8	74.4	67.8
PBS/com2	-32.8	76.0	111.2	74.1	67.9
PBS/com3	-35.1	77.0	111.0	69.6	64.4
PBS/g5/RHS0.5	-32.5	77.3	111.0	69.8	65.2
PBS/g5/RHS1	-31.8	76.2	111.1	69.5	63.3
PBS/g5/RHS2	-33.9	77.2	111.0	69.2	63.4
PBS/g5/RHS3	-34.3	77.6	111.0	67.9	62.8
PBS/g5/com0.5	-31.3	78.0	111.2	61.8	57.8
PBS/g5/com1	-32.6	76.4	110.8	71.3	65.0
PBS/g5/com2	-31.2	77.0	110.7	69.6	63.7
PBS/g5/com3	-33.4	76.4	111.0	69.1	63.9
PBS/g10/RHS0.5	-31.8	76.2	111.1	72.8	68.0
PBS/g10/RHS1	-34.0	76.8	110.9	71.2	64.9

PBS/g10/RHS2	-34.0	77.3	110.8	68.8	63.0
PBS/g10/RHS3	-30.4	77.2	110.8	64.5	59.7
PBS/g10/com0.5	-32.1	77.0	110.8	68.4	63.9
PBS/g10/com1	-33.2	75.7	111.2	75.8	68.7
PBS/g10/com2	-33.9	74.7	111.1	88.0	79.7
PBS/g10/com3	-32.9	76.9	110.9	74.3	67.3

*** $\Delta H^{\circ}_m = 110.3 \text{ J/g}$ (melt enthalpy for 100% crystallized PBS) [23]

สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ พบว่าการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ไม่ได้ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_m) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการเติมสารเสริมแรงที่ปริมาณ 0.5 จะทำให้การเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเสริมแรงที่เติมลงไปทำให้ปริมาณการเกิดผลึกลดลงเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการเติมสารเสริมแรงในปริมาณที่มากทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวได้ลดลง

4.3.4.2 การสลายตัวทางความร้อน

การสลายตัวทางความร้อนทดสอบโดยการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมาทดสอบด้วยเครื่องระเหยน้ำหนักภายใต้ความร้อน โดยทำการให้ความร้อนตั้งแต่ 50 – 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้จะทำให้มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (onset) ที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยและยังมีอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัว (endset) ไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ไม่ได้ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดการเสื่อมสลายมากที่สุด (inflection point) พบว่าพอลิ

ทิลีนซึกซิเนตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่จะมีค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเสื่อมสลายมากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดการรวมตัวกันเองของอนุภาคซิลิกา ซึ่งการมีปริมาณซิลิกาที่มากขึ้น จะทำให้อนุภาคซิลิกาเกิดการสะสมความร้อนที่มากจึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดการเสื่อมสลายต่ำกว่าพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์ โดยพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกาจากแคลบและซิลิกาทางการค้าที่มีการผสมและไม่ผสมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้สามารถยืนยันได้จากปริมาณ Residual Mass ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากอนุภาคซิลิกาจะไม่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิดังกล่าว [24]

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตกับพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์

Sample	Onset (°C)	Inflection point (°C)	Endset (°C)	Residual (%)
Neat PBS	372.5	399.0	415.8	1.23
PBS/g5	372.9	399.5	416.1	1.23
PBS/g10	373.2	399.4	416.0	2.77
PBS/RHS0.5	372.3	398.8	415.6	1.53
PBS/RHS1	373.7	399.0	415.9	1.95
PBS/RHS2	372.6	398.4	415.6	3.38
PBS/RHS3	372.4	398.4	415.4	4.56
PBS/com0.5	371.3	397.7	415.0	2.67
PBS/com1	371.0	397.8	414.9	0.74
PBS/com2	372.9	398.5	415.7	2.22
PBS/com3	371.5	398.0	415.0	1.31
PBS/g5/RHS0.5	371.5	398.0	415.5	1.45
PBS/g5/RHS1	371.1	397.1	415.5	2.15

PBS/g5/RHS2	374.9	400.9	415.9	2.73
PBS/g5/RHS3	374.9	401.0	417.8	3.27
PBS/g5/com0.5	372.2	398.4	415.8	0.64
PBS/g5/com1	372.1	397.8	415.1	1.16
PBS/g5/com2	371.4	398.0	415.6	2.82
PBS/g5/com3	372.0	398.0	415.7	3.21
PBS/g10/RHS0.5	375.2	401.3	415.7	1.44
PBS/g10/RHS1	374.5	400.7	417.1	0.03
PBS/g10/RHS2	375.0	400.7	417.0	2.78
PBS/g10/RHS3	374.4	400.6	416.8	2.77
PBS/g10/com0.5	374.4	399.7	416.4	1.94
PBS/g10/com1	374.3	399.4	416.0	3.36
PBS/g10/com2	375.0	400.4	417.2	2.62
PBS/g10/com3	373.2	398.8	415.5	-4.0

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำซิลิกาจากแกลบมาใช้ประโยชน์ โดยศึกษาการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบ เปรียบเทียบกับซิลิกาทางการค้า รวมทั้งศึกษาการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดัดแปรมาใช้เป็นสารคู่ควบเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติม จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตเพื่อใช้เป็นสารคู่ควบ โดยการดัดแปรพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตในเครื่องอัลตราซาวด์ สารคู่ควบที่เตรียมขึ้นนี้มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งคาดว่าจะเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคซิลิกาได้ดี โดยอัตราส่วนการเตรียมสารคู่ควบที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ไกลซีดีลเมทาคริเลต 2 phr และไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 phr
2. เมื่อปริมาณของซิลิกาจากแกลบเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงดึง โมดูลัสของยัง ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงต่ำกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ โดยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้ามีแนวโน้มในการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคล้ายคลึงกัน แต่ซิลิกาทางการค้ามีประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีกว่าซิลิกาจากแกลบเล็กน้อย
3. เมื่อเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ลงในคอมพอสิต พบว่าสมบัติเชิงกลทั้งความทนแรงดึง โมดูลัสของยัง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาเท่ากัน โดยซิลิกาจากแกลบและซิลิกาทางการค้ามีแนวโน้มในการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคล้ายคลึงกัน แต่ซิลิกาทางการค้ามีประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีกว่าซิลิกาจากแกลบเล็กน้อย
4. ปริมาณของซิลิกาจากแกลบกับสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่เหมาะสมที่สุดคือ 3 และ 10 phr ตามลำดับ และมีค่าไม่ต่างกับการใช้ซิลิกาทางการค้ามากนัก จึงสามารถนำซิลิกาจากแกลบซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งทางเกษตรกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุดมาประยุกต์เป็นตัวเติมเสริมแรงเพื่อทดแทนซิลิกาทางการค้าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาการนำซิลิกาจากแคลไปเสริมแรงพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น เช่น พอลิแล็กติกแอซิด
- 2) ศึกษาการตัดแปรซิลิกาด้วยวิธีอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงให้กับซิลิกามากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] Center, N.M.a.M.T. Biodegradable plastics 2007. Available from:
http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html
[22 June 2015]
- [2] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ฟ. พลาสติกย่อยสลายได้.. นวัตกรรมเพื่อโลก 2553. Available from:
<http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf>
- [3] ดร.ณัฐพันธ์ศุภภา. เทคโนโลยีสีเจียวนำจับตามอง 2012-2013. Available from:
<http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/p27-30.pdf>
- [4] Polymers' place. PTT Chemical Public Company Limited (10) (2010): 6-9.
- [5] Callister. ทอมพอลิต คืออะไร 2003. Available from:
<http://www.ptreform.com/know1.html> [25 May 2015]
- [6] กীরติเสวี, ห. ภาครวมของวัสดุเชิงวิศวกรรม. วิศวกรรมศาสตร์ มก 70 (2553): 19-32.
- [7] Sigma-Aldrich. Glycidyl methacrylate Available from:
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/151238?lang=en®ion=TH> [22 June 2015]
- [8] 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.
- [9] Raquez, J.-M., Narayan, R., and Dubois, P. Recent Advances in Reactive Extrusion Processing of Biodegradable Polymer-Based Compositions. Macromolecular Materials and Engineering 293(6) (2008): 447-470.
- [10] พันธวรากร, ด. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ (2555).
- [11] Agency, N.I. Innovation Trend 2010. Available from:
<http://www.nia.or.th/innolinks/page.php?issue=200903§ion=6> [9 May 2558]
- [12] Paoprasert, P. Polymers from Biological Sources: A Literature Review resjournal 18(3) (2013): 536-547.
- [13] บุญมี, จ. พลาสติกชีวภาพ. วารสารสิ่งแวดล้อม 16 (2012): 15-19.

- [14] 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.
- [15] Vassiliou, A.A., Bikiaris, D., El Mabrouk, K., and Kontopoulou, M. Effect of evolved interactions in poly(butylene succinate)/fumed silica biodegradable in situ prepared nanocomposites on molecular weight, material properties, and biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science* 119(4) (2011): 2010-2024.
- [16] Soccio, M., Lotti, N., Gigli, M., Finelli, L., Gazzano, M., and Munari, A. Reactive blending of poly(butylene succinate) and poly(triethylene succinate): characterization of the copolymers obtained. *Polymer International* 61(7) (2012): 1163-1169.
- [17] Chen, X., Gug, J., and Sobkowicz, M.J. Role of polymer/filler interactions in the linear viscoelasticity of poly(butylene succinate)/fumed silica nanocomposite. *Composites Science and Technology* 95 (2014): 8-15.
- [18] Li, J., Luo, X., and Lin, X. Preparation and characterization of hollow glass microsphere reinforced poly(butylene succinate) composites. *Materials & Design* 46 (2013): 902-909.
- [19] Wan, C. and Chen, B. Reinforcement of biodegradable poly(butylene succinate) with low loadings of graphene oxide. *Journal of Applied Polymer Science* 127(6) (2013): 5094-5099.
- [20] Wu, W., Cao, X., Luo, J., He, G., and Zhang, Y. Morphology, thermal, and mechanical properties of poly(butylene succinate) reinforced with halloysite nanotube. *Polymer Composites* 35(5) (2014): 847-855.
- [21] 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.
- [22] Vasileiou, A.A., Papageorgiou, G.Z., Kontopoulou, M., Docoslis, A., and Bikiaris, D. Covalently bonded poly(ethylene succinate)/SiO₂ nanocomposites prepared by in situ polymerisation. *Polymer* 54(3) (2013): 1018-1032.

- [23] Phua, Y.J. Mechanical properties and structure development in poly(butylene succinate)/organo-montmorillonite nanocomposites under uniaxial cold rolling. eXPRESS Polymer Letters 5(2) (2011): 93-103.
- [24] Vassiliou, A.A., Chrissafis, K., and Bikiaris, D.N. In situ prepared PBSu/SiO₂ nanocomposites. Study of thermal degradation mechanism. Thermochimica Acta 495(1-2) (2009): 120-128.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ความทนแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิิต

ตาราง ก-1 ค่าความทนแรงดึงของ Neat PBS

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	36.1	10.9	722.2
2	36.0	10.8	653.2
3	37.6	11	680.1
4	36.6	10.9	695.3
5	37.3	10.9	687.7
AVG	36.7	10.9	687.7
SD	0.7	0.06	24.9

ตาราง ก-2 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.2	12.0	710.2
2	38.3	10.8	688.3
3	39.5	11.9	706.1
4	38.8	10.9	693.4
5	37.8	11.4	691.0
AVG	38.5	11.4	697.8
SD	0.7	0.6	9.7

ตาราง ก-3 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.1	12.9	694.4
2	39.9	11.0	705.3
3	39.6	12.6	710.7
4	39.7	11.8	702.4
5	39.6	12.7	692.2
AVG	39.8	12.2	701
SD	0.2	0.8	7.7

ตาราง ก-4 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/RHS0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.4	11.4	729.5
2	36.6	10.0	641.3
3	39.1	11.2	692.8
4	37.5	10.5	680.0
5	35.9	10.4	688.4
AVG	37.5	10.7	686.4
SD	1.3	0.6	31.5

ตาราง ก-5 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/com0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	37.0	11.3	673.5
2	39.8	10.3	708.1
3	38.3	9.6	724.4
4	38.7	11.0	654.2
5	38.2	11.8	681.3
AVG	38.4	10.8	688.3
SD	1	4.9	28

ตาราง ก-6 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/RHS1.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.2	11.6	682.2
2	38.0	10.2	692.8
3	39.4	10.5	711.4
4	38.6	9.4	680.3
5	39.3	10.8	717.3
AVG	39.1	10.5	696.8
SD	0.8	0.8	16.8

ตาราง ก-7 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/com1.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.9	8.4	644.6
2	39.9	11.6	717.2
3	39.7	10.9	689.3
4	38.5	9.5	697.5
5	39.5	10.6	698.4
AVG	39.7	10.2	693.4
SD	0.6	1.3	27

ตาราง ก-8 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/RHS2.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.2	9.2	715.7
2	39.6	10	709.3
3	38.3	10.6	736.5
4	38.7	9.9	728.1
5	37.2	9.8	740.9
AVG	38.4	9.9	726.1
SD	0.9	0.5	13.4

ตาราง ก-9 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/com2.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.8	11	707.2
2	40.5	10.3	725.3
3	40.3	10.1	719.8
4	39.9	8.6	710.6
5	40.0	10	720.6
AVG	40.1	10.0	716.7
SD	0.3	0.9	7.5

ตาราง ก-10 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/RHS3.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.6	9.7	730.2
2	38.9	9.3	718.3
3	39.7	9.5	722.1
4	38.8	10.2	728.2
5	39.5	8.8	731.7
AVG	39.7	9.5	726.1
SD	0.4	0.5	5.7

ตาราง ก-11 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/com3.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.7	10.0	719.8
2	41.1	9.6	732.5
3	41.5	9.9	735.3
4	41.2	10.7	736.3
5	40.5	9.0	747.8
AVG	41.0	9.8	734.3
SD	0.4	0.6	10

ตาราง ก-12 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/RHS0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.7	11.0	700.2
2	37.4	10.9	716.6
3	38.8	11.0	709.5
4	38.9	10.9	707.3
5	38.5	10.7	708.4
AVG	38.5	10.9	708.4
SD	0.6	0.1	5.9

ตาราง ก-13 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/com0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.8	11.6	721.4
2	39.3	10.8	703.1
3	38.9	10.7	701.4
4	39.0	11.2	718.9
5	39.5	11.7	710.2
AVG	39.1	11.2	711.0
SD	0.3	0.5	9

ตาราง ก-14 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/RHS1.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.8	10.9	714.5
2	38.3	10.1	710.6
3	38.9	10.5	716.1
4	39.0	10.3	714.3
5	38.5	10.2	721.0
AVG	39.1	10.4	715.3
SD	1	0.3	3.8

ตาราง ก-15 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/com1.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.9	11.5	718.3
2	39.5	11.9	719.7
3	40.3	12.2	722.4
4	41.1	11.6	712.6
5	38.7	12.3	714.5
AVG	39.9	11.9	717.5
SD	0.9	0.4	4.9

ตาราง ก-16 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/RHS2.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.1	10.0	769.2
2	38.3	8.5	753.2
3	39.0	9.5	742.9
4	37.6	9.1	779.3
5	38.0	9.4	758.4
AVG	38.2	9.3	760.6
SD	5	6	14.1

ตาราง ก-17 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/com2.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	38.0	10.2	755.5
2	39.4	9.1	769.7
3	39.1	8.9	738.3
4	38.4	10.4	743.2
5	38.1	9.9	765.8
AVG	38.6	9.7	754.5
SD	0.6	0.7	13.7

ตาราง ก-18 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/RHS3.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.7	8.2	792.6
2	40.4	9.2	781.9
3	40.2	8.7	778.2
4	40.5	8.3	790.9
5	41.2	8.1	784.4
AVG	40.6	8.5	786.4
SD	0.4	0.5	6.1

ตาราง ก-19 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g5/com3.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	42.0	9.4	769.9
2	40.2	9.5	782.6
3	41.6	9.5	784.6
4	41.3	9.1	778.9
5	40.9	9.0	792.5
AVG	41.2	9.3	781.7
SD	0.7	0.2	8.3

ตาราง ก-20 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/RHS0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.8	11.6	710.2
2	41.2	11.9	719.3
3	40.6	12.1	721.6
4	40.5	11.7	708.9
5	40.4	12.2	713.5
AVG	40.7	11.9	714.7
SD	0.3	0.3	5.6

ตาราง ก-21 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/com0.5

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.6	11.8	728.4
2	39.8	12.8	704.0
3	39.7	12.5	711.9
4	39.5	12.1	719.5
5	39.9	12.3	717.2
AVG	39.7	12.3	716.2
SD	0.2	0.4	9.1

ตาราง ก-22 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/RHS1.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.6	11.2	731.3
2	39.8	10.9	707.5
3	39.7	10.8	714.6
4	39.0	11.8	723.4
5	39.9	11.5	718.2
AVG	39.6	11.2	719.0
SD	0.4	0.4	9

ตาราง ก-23 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/com1.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	40.7	10.7	728.5
2	40.1	10.9	732.0
3	40.2	10.9	725.6
4	40.5	1	733.8
5	40.0	11.0	723.6
AVG	40.3	10.9	728.7
SD	0.3	4.4	4.3

ตาราง ก-24 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/RHS2.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	39.6	9.8	744.7
2	39.9	10.2	754.6
3	40.1	10.0	756.9
4	39.7	10.0	739.3
5	39.6	10.0	745.0
AVG	39.8	10	748.1
SD	0.2	0.2	7.4

ตาราง ก-25 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/com2.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	41.7	9.0	748.5
2	41.6	9.5	739.9
3	41.5	10.9	761.6
4	41.7	11.0	749.3
5	42.5	10.6	750.7
AVG	41.8	10.2	750.0
SD	0.4	0.9	7.7

ตาราง ก-26 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/RHS3.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	41.9	9.4	789.7
2	42.8	9.7	757.1
3	42.5	9.1	769.9
4	42.4	9.8	774.9
5	41.9	9.0	770.4
AVG	42.3	9.4	772.4
SD	0.4	0.4	11.7

ตาราง ก-27 ค่าความทนแรงดึงของ PBS/g10/com3.0

No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
1	43.2	10.2	787.4
2	43.5	9.8	754.8
3	43.2	9.5	773.1
4	43.7	9.4	770.8
5	42.9	10.1	768.9
AVG	43.1	9.8	771.0
SD	0.3	0.4	11.6

ภาคผนวก ข

ความทนแรงตัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอลิิต

ตาราง ข-1 ค่าความทนแรงตัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตคอมพอลิิต

Sample	1	2	3	4	5	AVG	SD
Neat PBS	54.2	54.8	54.4	54.6	54.5	54.5	0.2
PBS/g5	54.8	54.9	54.7	54.6	55.0	54.8	0.2
PBS/g10	60.5	59.9	59.8	60.2	60.4	60.2	0.3
PBS/RHS0.5	53.5	53.6	53.3	53.2	53.4	53.4	0.2
PBS/com0.5	54.3	54.0	53.7	53.8	54.2	54.0	0.3
PBS/RHS1.0	54.5	54.6	54.7	53.6	55.6	54.6	0.7
PBS/com1.0	55.5	59.9	56.5	56.9	56.2	56.2	1.7
PBS/RHS2.0	56.3	56.2	55.7	56.1	55.7	56.0	0.3
PBS/com2.0	56.5	56	55.7	55.6	55.2	55.8	0.5
PBS/RHS3.0	56.3	56.5	57.	57.4	56.8	56.8	0.4
PBS/com3.0	57.7	56.5	56.8	57.4	57.1	57.1	0.5
PBS/g5/RHS0.5	56.3	56.6	56.9	56.1	57.1	56.6	0.4
PBS/g5/com0.5	56.1	55.3	55.9	56.3	55.7	56.0	0.4
PBS/g5/RHS1.0	56.1	56.2	55.8	56.6	56.3	56.2	0.3
PBS/g5/com1.0	58,5	59.1	57.9	58	58.5	58.5	26.1
PBS/g5/RHS2.0	57.5	57.2	56.5	57	56.8	57.0	0.4
PBS/g5/com2.0	57.5	57.7	57.3	58.0	57.0	57.5	0.4
PBS/g5/RHS3.0	59.0	58.0	58.1	58.9	58.5	58.5	0.5

PBS/g5/com3.0	58.9	59.3	58.6	58.5	59.2	58.9	0.4
PBS/g10/RHS0.5	56.0	55.4	55.7	55.2	56.2	55.7	0.4
PBS/g10/com0.5	58.4	58.8	58.3	58.5	58.4	58.4	0.2
PBS/g10/RHS1.0	53.7	54.5	54.1	53.2	55.0	54.1	0.7
PBS/g10/com1.0	58.9	58.7	58.5	59.1	59.3	58.9	0.4
PBS/g10/RHS2.0	57.8	57.3	57.6	58.3	58.0	57.8	0.4
PBS/g10/com2.0	59.1	59.4	59.8	60.1	59.6	59.6	0.4
PBS/g10/RHS3.0	58.6	58.9	58.7	58.5	58.8	58.7	0.2
PBS/g10/com3.0	62.0	61.3	60.0	61.7	61.5	61.5	0.8

ภาคผนวก ค

ความทนแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิิต

ตาราง ค-1 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิิต

Sample	1	2	3	4	5	AVG	SD
Neat PBS	3568.9	4188.9	3756.8	4001.9	3878	3878.9	235.7
PBS/g5	4235.7	3865.2	4073.8	3969	3703.8	3969.5	202
PBS/g10	4170.1	4075.3	4156.3	3988.5	4006.3	4079.3	83.9
PBS/RHS0.5	2683.4	2570.9	2329.6	2831.2	2467.5	2575.9	193.1
PBS/com0.5	2498.2	2738.4	2361.7	2877.9	2615.3	2618.3	201.3
PBS/RHS1.0	2439.8	2829.4	2604.6	2951.6	2297.6	2624.6	269.4
PBS/com1.0	2361.2	2881.8	2597.1	2665.9	2601.5	2621.5	186.1
PBS/RHS2.0	2568.2	3006.4	2864.1	2710.5	2757.3	2787.3	164.7
PBS/com2.0	2489.3	3193.1	2591.3	2991.1	2691.2	2791.2	292.7
PBS/RHS3.0	2566.7	3280.5	2658.1	3089.1	2773.6	2873.6	301.1
PBS/com3.0	3017.2	2846.2	2653.7	3229.7	2911.7	2931.7	212.8
PBS/g5/RHS0.5	2509.3	3067.3	2654.1	2922.8	2788	2788.3	219
PBS/g5/com0.5	2862.	3205.9	2459.3	3052.8	2632.4	2842.6	301.1
PBS/g5/RHS1.0	2539.6	3083.2	2838.7	2794.1	2801.4	2811.4	192.9
PBS/g5/com1.0	3315.8	2597.8	2986.8	2731.2	3152.4	2956.8	294.9
PBS/g5/RHS2.0	2906.1	3094.5	2695.1	3275.5	2955.3	2985.3	216.5
PBS/g5/com2.0	2764.2	3159.4	2985.1	3038.5	3111.8	3011.8	153.7
PBS/g5/RHS3.0	3241.7	2854.3	2787.4	3208.6	3148.0	3048	211.4

PBS/g5/com3.0	3311.6	2931.2	2966.7	3021.4	3376.1	3121.4	206.9
PBS/g10/RHS0.5	2749.1	3059.7	3011.9	2704.4	2996.9	2904.4	164.6
PBS/g10/com0.5	3213.8	3359.4	3068.2	3493.4	2934.2	3213.8	223
PBS/g10/RHS1.0	2659.5	3285.3	2972.4	3078.5	2866.3	2972.4	233.6
PBS/g10/com1.0	3195.6	3125.8	2984.5	3406.7	3265.4	3195.6	157.2
PBS/g10/RHS2.0	3466.4	2873.4	3315.3	3124.5	3069.9	3169.9	228.6
PBS/g10/com2.0	3320.7	3465.9	3189.3	3663	2987.6	3325.3	258.1
PBS/g10/RHS3.0	3574.8	3159.8	3636.7	3197.9	3267.3	3367.3	222.1
PBS/g10/com3.0	3451.5	3533.7	3369.9	3019.5	3883.9	3451.7	311.1



ภาคผนวก ง

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

ตาราง ง-1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตที่ GMA 2 (phr), DCP 1.5 (phr)

	GMA 2 (phr), DCP 0.5 (phr)				
	1	2	3	AVG	SD
NaOH(ml)	3.8	3.7	3.9	3.8	0.1

ตาราง ง-2 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตที่ GMA 5 (phr), DCP 1.5 (phr)

	GMA 2 (phr), DCP 1.0 (phr)				
	1	2	3	AVG	SD
NaOH(ml)	5.9	5.5	5.7	5.7	0.2

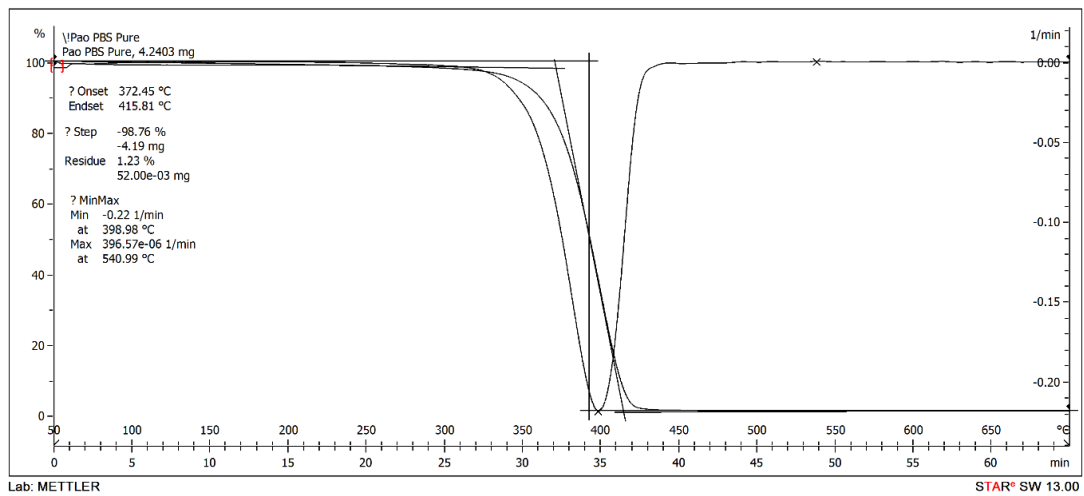
ตาราง ง-3 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตที่ GMA 10 (phr), DCP 1.5 (phr)

	GMA 2 (phr), DCP 1.5 (phr)				
	1	2	3	AVG	SD
NaOH(ml)	8.7	8.7	8.9	8.77	0.16

ภาคผนวก จ

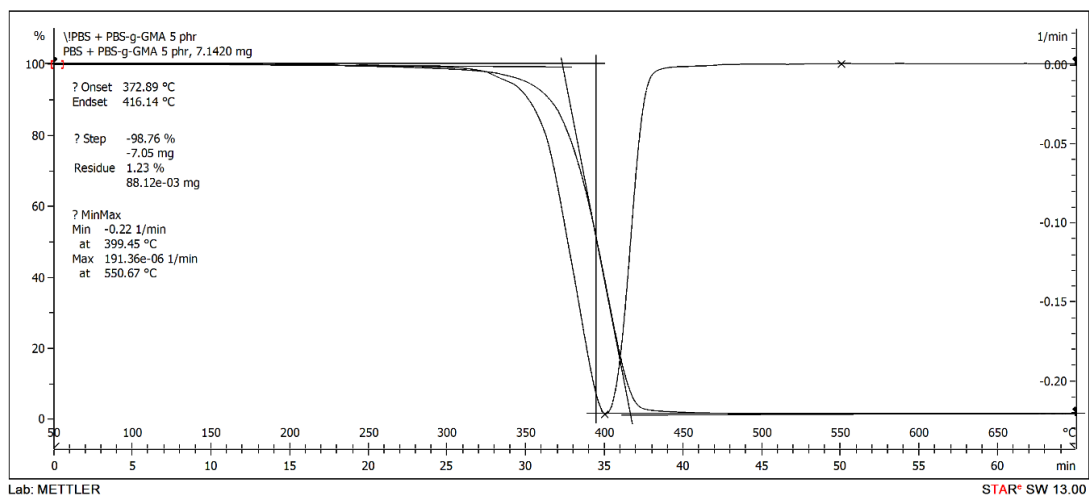
TGA Thermogram ของพอลิเมอร์

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



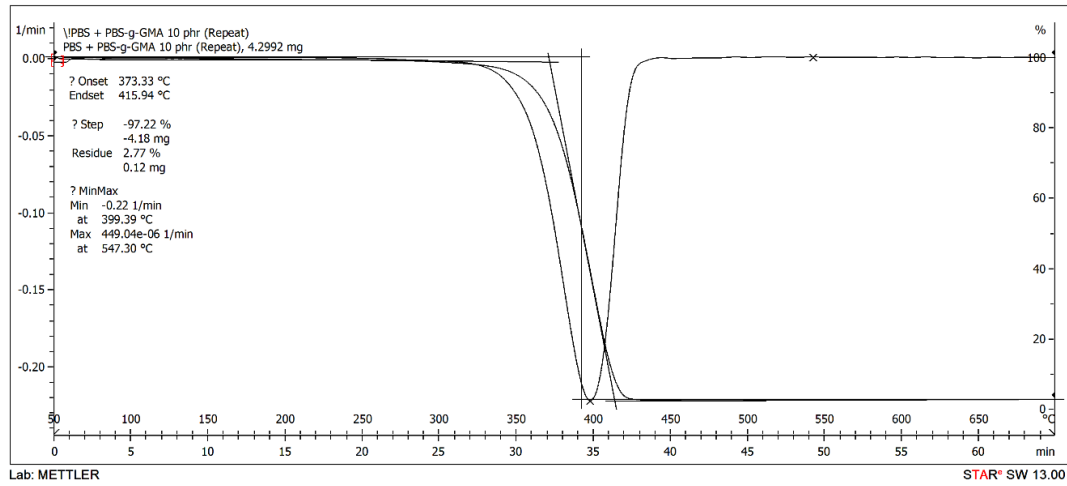
รูปที่ จ-1 เทอร์โมแกรมของ Neat PBS

2. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 5 phr



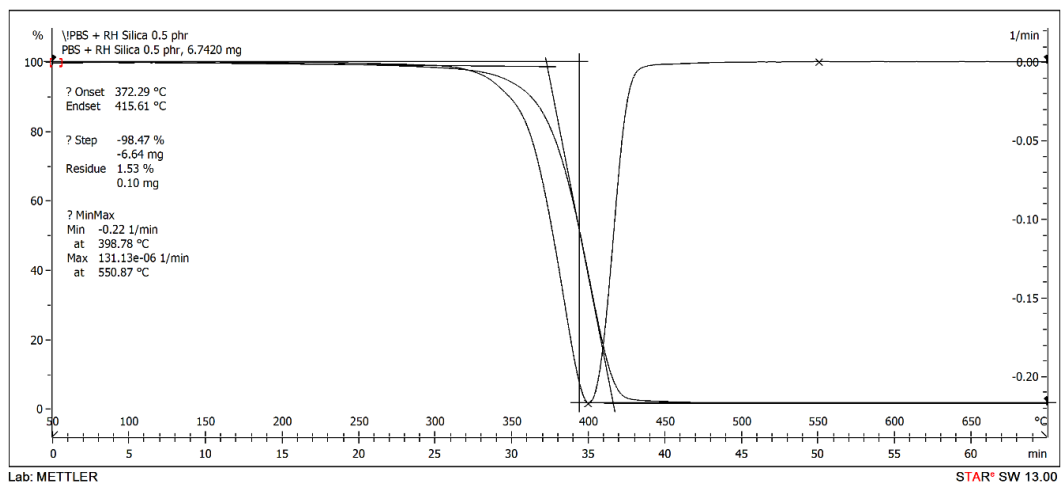
รูปที่ จ-2 เทอร์โมแกรมของ PBS/g5

3. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 10 phr



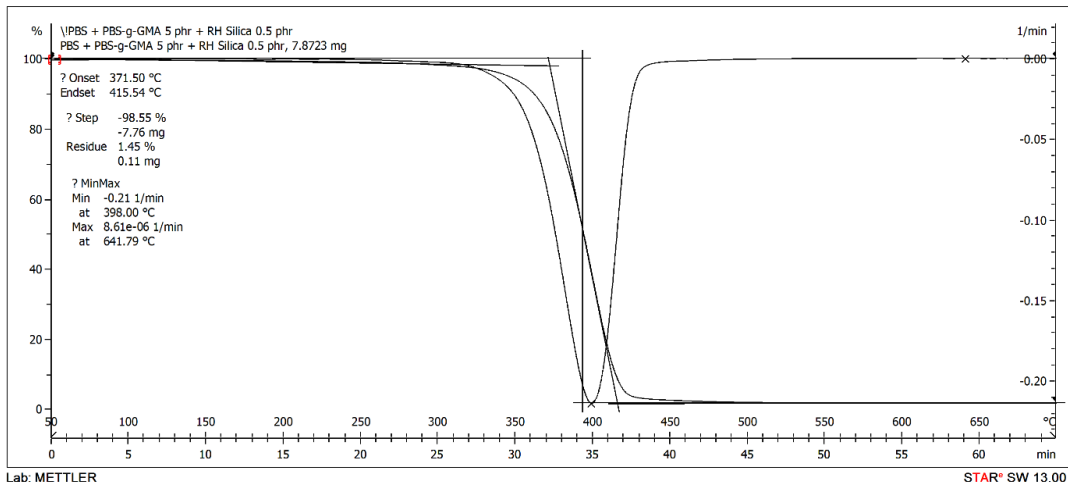
รูปที่ จ-3 เทอร์โมแกรมของ PBS/g10

4. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเกลบที่ 0.5 phr



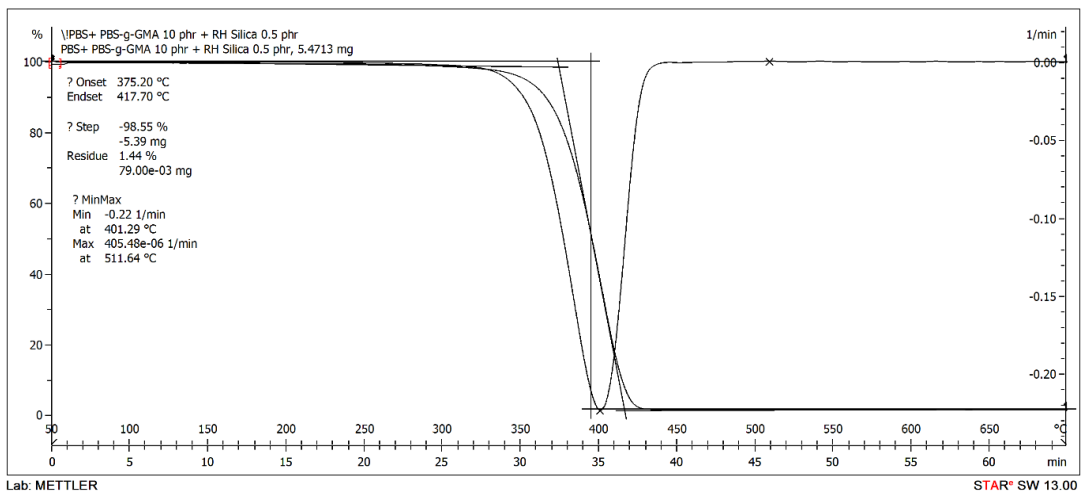
รูปที่ จ-4 เทอร์โมแกรมของ PBS/RHS0.5

5. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเกลบที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้
ได้ที่ 5 phr



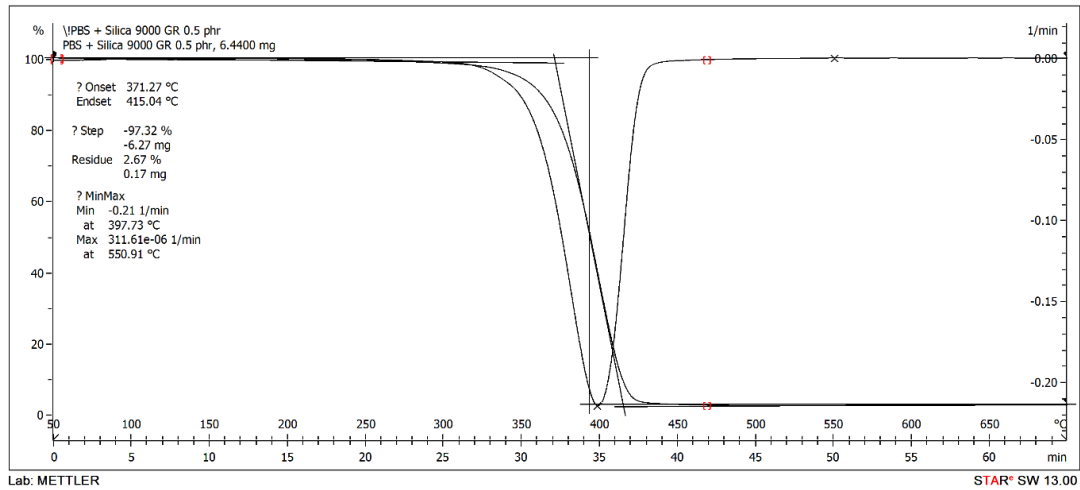
รูปที่ จ-5 เทอร์โมแกรมของ PBS/g5/RHS0.5

6. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเกลบที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้
ได้ที่ 10 phr



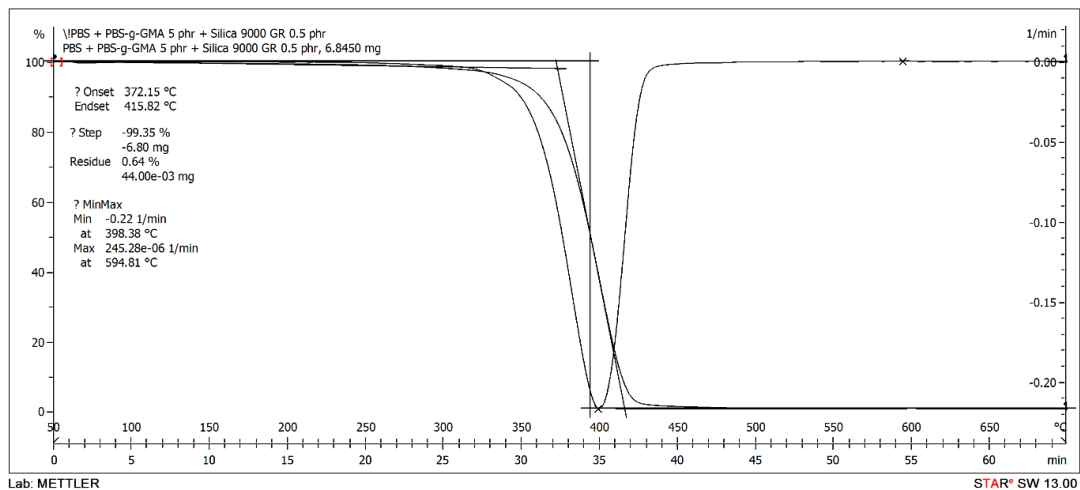
รูปที่ จ-6 เทอร์โมแกรมของ PBS/g10/RHS0.5

7. พอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าที่ 0.5 phr



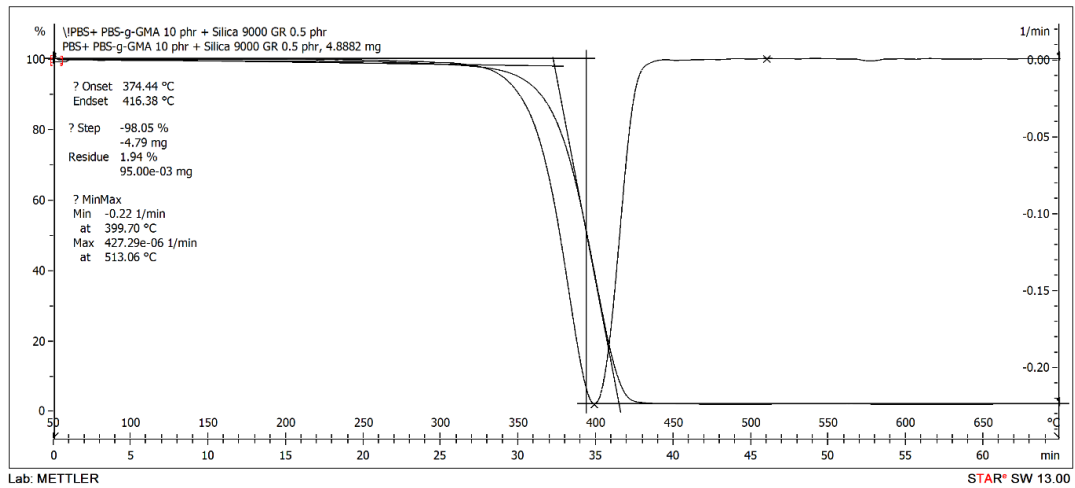
รูปที่ จ-7 เทอร์โมแกรมของ PBS/com0.5

8. พอลิบิวทิลีนซ็อกซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ 5 phr



รูปที่ จ-8 เทอร์โมแกรมของ PBS/g5/com0.5

9. พอลิบิวทิลีนซัลไฟด์ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 10 phr



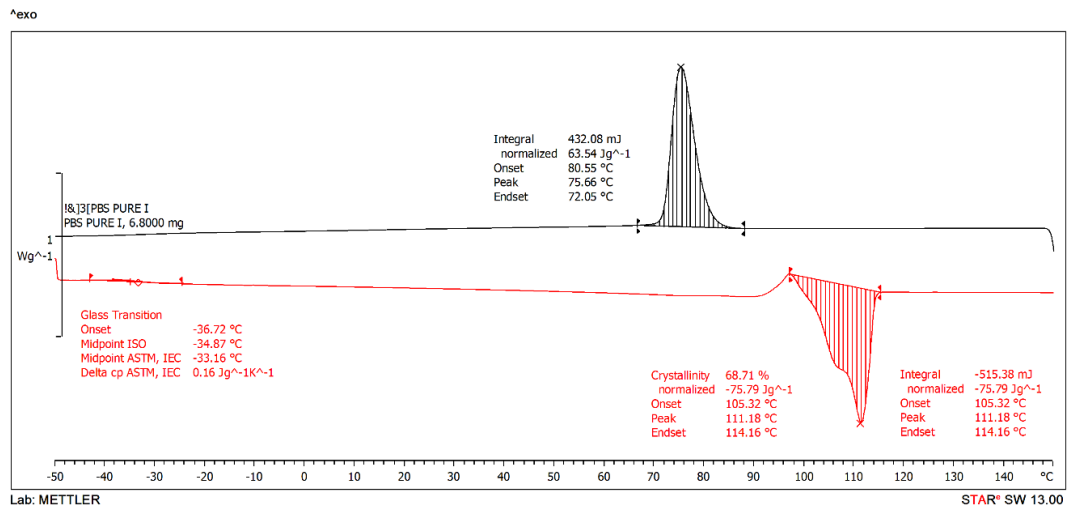
รูปที่ จ-9 เทอร์โมแกรมของ PBS/g10/com0.5



ภาคผนวก ฉ

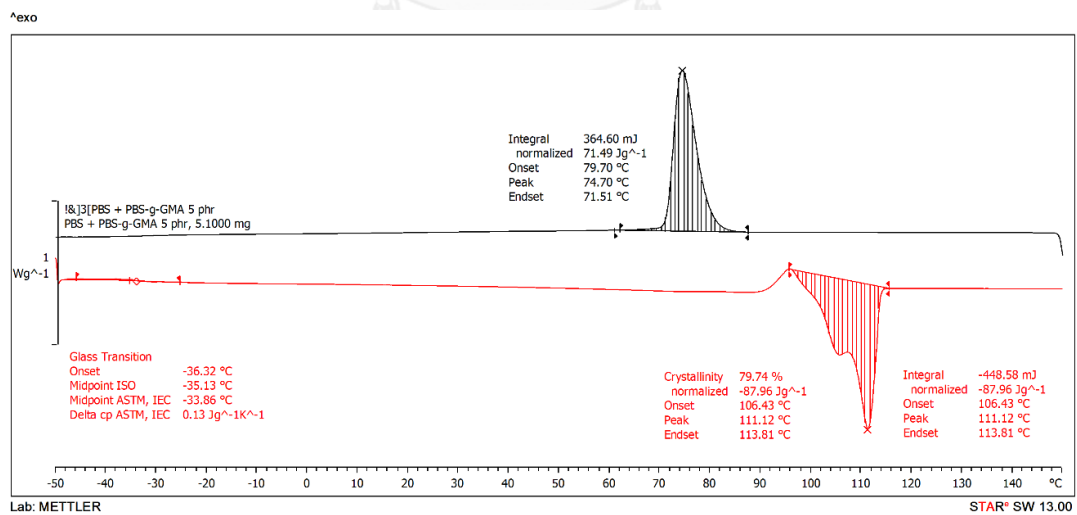
DSC Thermogram ของพอลิเมอร์ ที่ second heat

1. พอลิวิวิทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



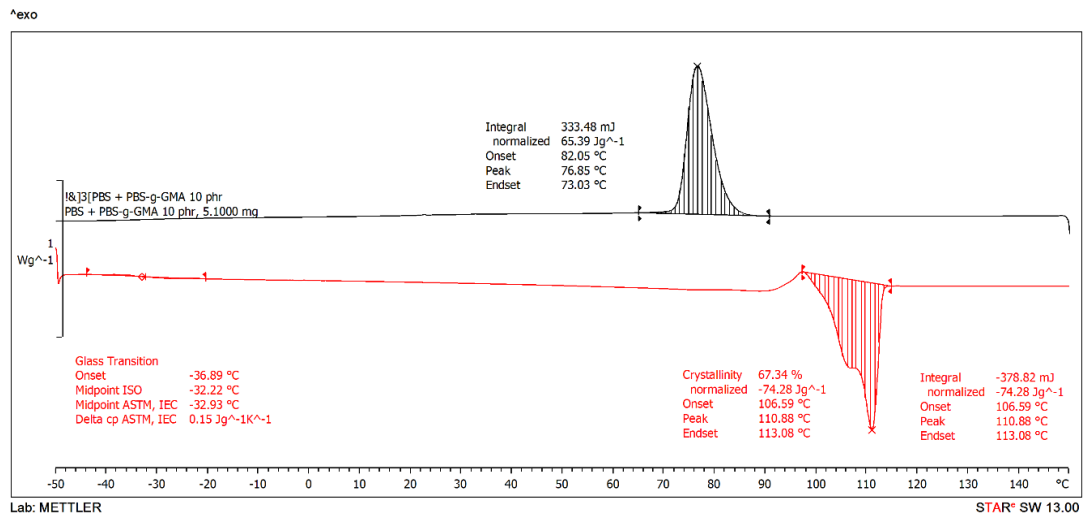
รูปที่ ฉ-1 เทอร์โมแกรมของ Neat PBS

2. พอลิวิวิทิลีนซัคซิเนตที่ผสมพอลิวิวิทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 5 phr



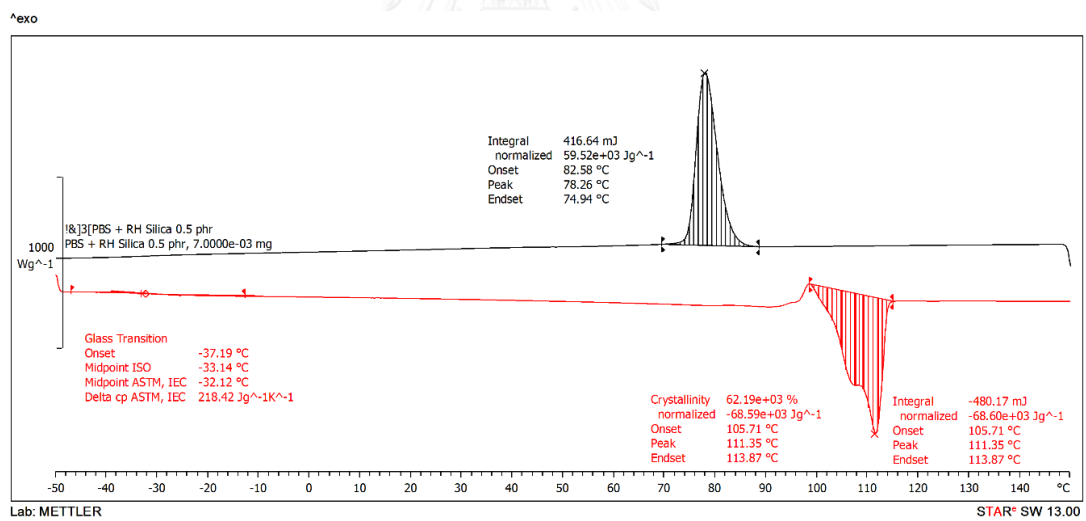
รูปที่ ฉ-2 เทอร์โมแกรมของ PBS/g5

3. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟต์ไกลซิดิลเมทาคริเลตที่ 10 phr



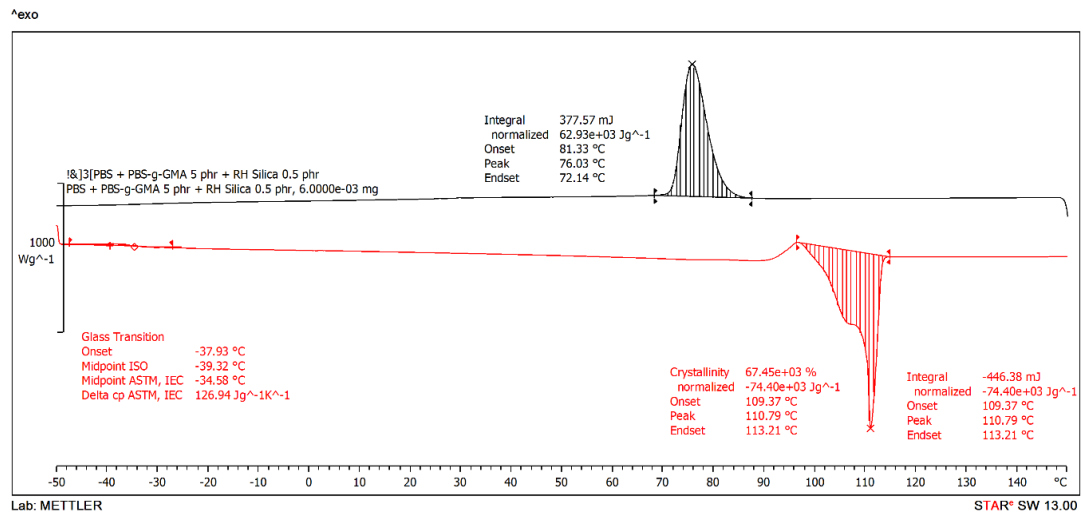
รูปที่ ฉ-3 เทอร์โมแกรมของ PBS/g10

4. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากกล้วยที่ 0.5 phr



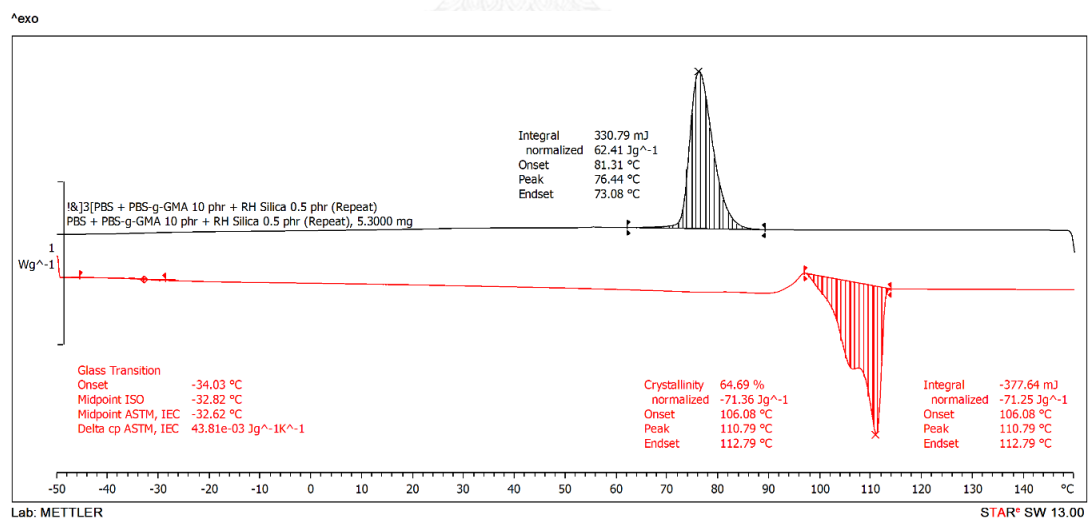
รูปที่ ฉ-4 เทอร์โมแกรมของ PBS/RHS0.5

5. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเกลบที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้
ได้ที่ 5 phr



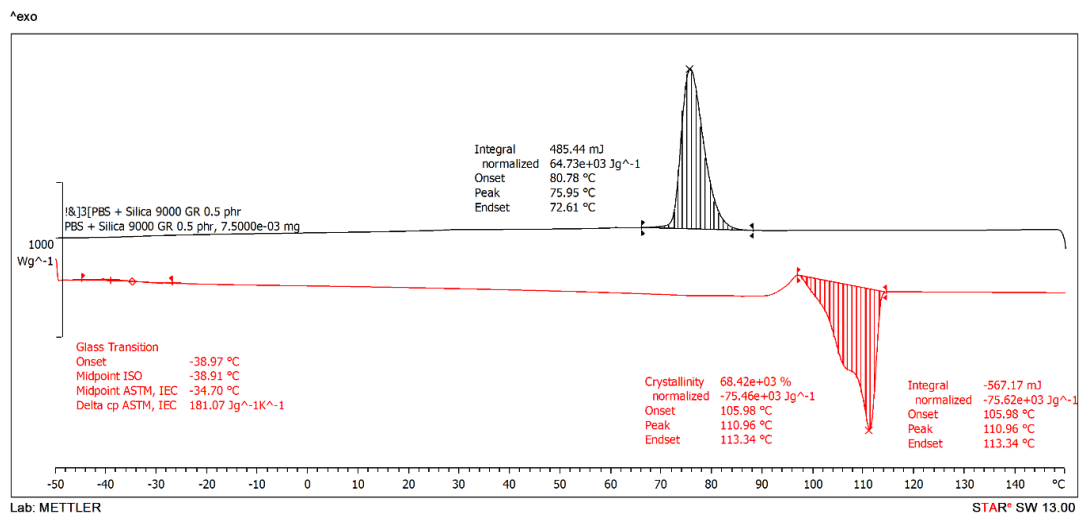
รูปที่ ฉ-5 เทอร์โมแกรมของ PBS/g5/RHS0.5

6. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจากเกลบที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้
ได้ที่ 10 phr



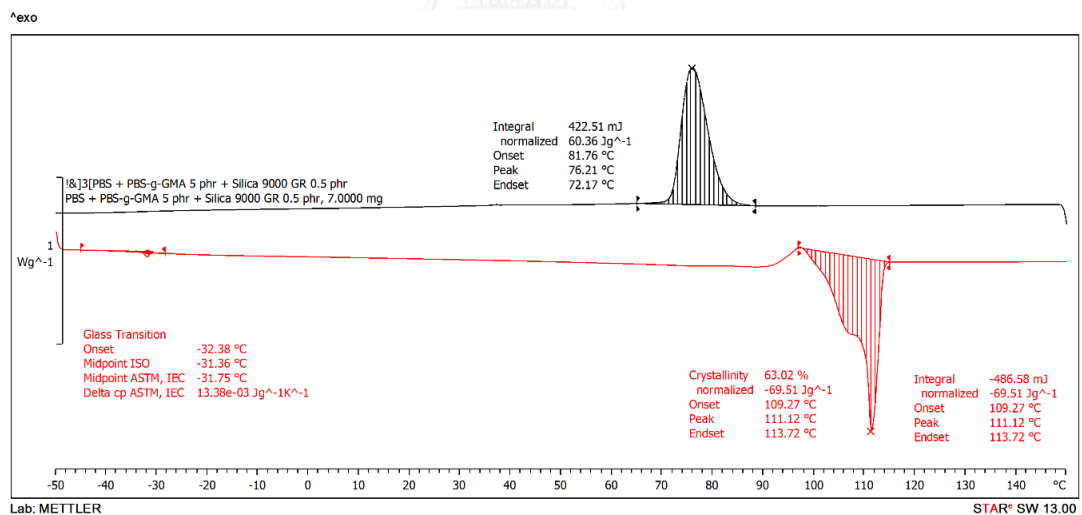
รูปที่ ฉ-6 เทอร์โมแกรมของ PBS/g10/RHS0.5

7. พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าที่ 0.5 phr



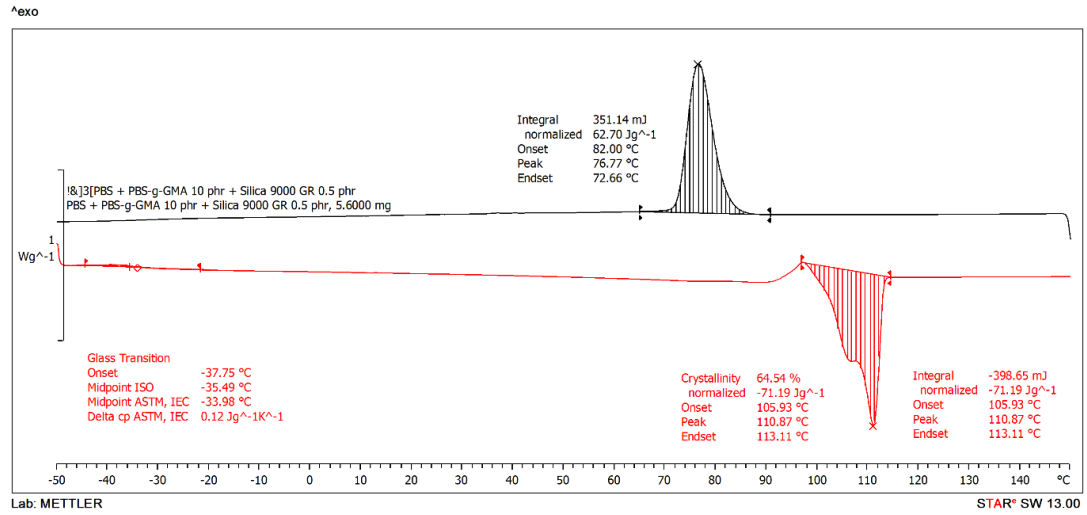
รูปที่ ๗-7 เทอร์โมแกรมของ PBS/com0.5

8. พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ 5 phr



รูปที่ ๗-8 เทอร์โมแกรมของ PBS/g5/com0.5

9. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยซิลิกาทางการค้าที่ 0.5 phr ที่มีการสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ที่ 10 phr



รูปที่ ๙-9 เทอร์โมแกรมของ PBS/g10/com0.5

ตาราง ข-4 ค่าความทนแรงดัดโค้งทดสอบด้วยวิธีทางสถิติเปรียบเทียบแบบ ANOVA

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27			
1		992	944	969	956	997	931	959	964	938	925	942	962	953	000	931	917	939	976	967	960	969	978	939	959	984	913			
2			922	961	979	994	939	967	972	945	936	960	971	961	000	939	926	999	967	975	999	961	927	917	967	992	921			
3				914	930	947	912	930	979	907	915	901	901	900	000	912	926	954	966	977	953	933	965	936	954	959	966			
4					933	967	900	925	933	906	896	911	932	922	000	900	987	958	948	936	960	981	945	969	929	954	783			
5						933	917	945	930	922	914	939	945	939	000	917	933	976	963	953	976	997	963	966	946	970	799			
6							933	961	967	939	931	945	965	956	000	933	920	962	961	969	963	966	961	911	962	967	916			
7								972	967	964	967	969	968	978	000	1000	966	958	947	964	969	920	947	978	928	963	981			
8									972	964	978	969	963	996	994	000	972	968	951	920	992	931	947	920	963	900	926	984		
9										972	964	978	999	999	000	967	953	925	914	997	926	953	914	945	959	920	948			
10											992	994	974	963	000	994	961	963	942	969	953	925	942	972	922	947	976			
11												996	966	975	000	997	999	961	950	961	962	917	959	901	931	956	984			
12													996	975	979	999	000	969	975	947	936	975	946	931	936	967	917	942	970	
13														979	000	965	964	927	918	966	927	961	918	948	966	921	932			
14															000	975	964	936	925	966	937	942	925	956	906	931	998			
15																000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	001			
16																	979	964	936	925	966	937	942	925	956	906	931	998		
17																		968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981		
18																			968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981	
19																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
20																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
21																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
22																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
23																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
24																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
25																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
26																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981
27																				968	953	947	964	969	920	947	978	928	963	981

ตาราง ข-5 ค่าความทนแรงกระแทกทดสอบด้วยวิธีทางสถิติเปรียบเทียบแบบ ANOVA

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27						
1		932	969	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	001	924						
2			932	948	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	001						
3				969	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	001						
4					900	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	001						
5						973	965	963	962	962	924	960	952	942	914	966	921	913	906	904	901	900	900	916	900	900	000	000					
6							965	963	962	962	924	960	952	942	914	966	921	913	906	904	901	900	900	916	900	900	000	000					
7								972	943	964	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924					
8									948	925	901	961	973	936	923	911	914	969	920	996	903	969	903	969	903	969	903	969					
9										933	964	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924	924					
10											969	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968					
11												934	939	907	963	912	961	923	923	923	923	923	923	923	923	923	923	923					
12													909	975	946	916	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926					
13														909	975	946	916	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926					
14															909	975	946	916	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926					
15																909	975	946	916	926	926	926	926	926	926	926	926	926					
16																	909	975	946	916	926	926	926	926	926	926	926	926					
17																		909	975	946	916	926	926	926	926	926	926	926					
18																			909	975	946	916	926	926	926	926	926	926					
19																				909	975	946	916	926	926	926	926	926					
20																					909	975	946	916	926	926	926	926					
21																						909	975	946	916	926	926	926					
22																							909	975	946	916	926	926	926				
23																								909	975	946	916	926	926				
24																									909	975	946	916	926	926			
25																										909	975	946	916	926	926		
26																											909	975	946	916	926	926	
27																												909	975	946	916	926	926



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิมุข ลาภทิพนนท์ เกิดวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ.2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ภาคต้นปีการศึกษา 2556 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลาย ปีการศึกษา 2557

