



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต(เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

สมบัติเชิงกลและพฤติกรรมผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีน/แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน สำหรับภาชนะบรรจุไมโครเวฟของอาหารแช่เย็น

Mechanical Properties and Crystallization Behavior of PP Film/ CaCO_3 Modified by Fatty Acid for Microwaveable Packaging of Chilled Food

นามผู้วิจัย นางสาวอาจารย์ ประดิษฐ์ธรรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชिरารุณี เพชรเย็น, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ดวงเดือน อางองค์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎกานุจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติเชิงกลและพฤติกรรมผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีน/แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร
ด้วยกรดไขมัน สำหรับภาชนะบรรจุไมโครเวฟของอาหารแช่เย็น

Mechanical Properties and Crystallization Behavior of PP Film/ CaCO_3 Modified
by Fatty Acid for Microwaveable Packaging of Chilled Food

โดย

นางสาวอาจารย์ ประดิษฐ์ธรรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาจารย์ ประดิษฐ์ธรรม 2557: สมบัติเชิงกลและพฤติกรรมผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีน/
แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน สำหรับภาชนะบรรจุไมโครเวฟของอาหาร
แช่เย็น ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยี
การบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชिरารุณี เพชรเย็น, วท.ด. 122 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เหมาะสมในการดัดแปรอนุภาค
แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับการเตรียมฟิล์มพอลิโพรพิลีน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นพลาสติก
ไมโครเวฟ โดยใช้กรดไขมัน 2 ชนิด คือ กรดปาล์มติก และกรดสเตียริกในปริมาณที่ต่างกัน คือ
ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของการดัดแปรอนุภาคแคลเซียม
คาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มติก และการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก คือ
ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมาผสมกับพอลิโพรพิลีนในปริมาณที่
แตกต่างกัน คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์ม
พบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรทั้งกรดปาล์มติกและกรดสเตียริกปริมาณ 1.0
ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ฟิล์มมีลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ที่ตี ส่งผลให้มีความต้านทาน
ต่อแรงดึง (21.24 เมกะปาสคาล และ 22.90 เมกะปาสคาล ตามลำดับ) และมอดุลัส (1238.13
เมกะปาสคาล และ 1137.32 เมกะปาสคาล ตามลำดับ) สูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีพฤติกรรมผลึก และ
สมบัติทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ภายหลังจากการใช้งาน
ภายใต้ไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 340 650 และ 1300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที พบว่าฟิล์มไอโซเทกติก
พอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรทั้งกรดปาล์มติกและกรดสเตียริก ฟิล์มมีความ
เป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการสกัดกั้นและอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น
สำหรับค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วมีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่ม
กำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ (650 และ 1300 วัตต์) พบว่าสมบัติของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลง
แต่อย่างไรก็ตามสมบัติที่ลดลงของฟิล์มเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟยังคงมีสมบัติที่
ดีกว่าฟิล์มก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ โดยฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียม
คาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติกมีสมบัติที่ดีกว่าฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค
แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Arjaree Pradittham 2014: Mechanical Properties and Crystallization Behavior of PP Film/ CaCO_3 Modified by Fatty Acid for Microwaveable Packaging of Chilled Food. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Chiravoot Pechyen, Ph.D. 122 pages.

Effect of fatty acid type and content on modified calcium carbonate (CaCO_3) of polypropylene (PP) film for microwave application were studied in this research. Two types of fatty acid were used; palmitic acid and stearic acid at 1, 3 and 5 %wt. The results showed that optimum concentration of both fatty acid attached to CaCO_3 surface was 5 %wt. After that the CaCO_3 was mixed with PP which particle content varying from 0.5, 1.0 and 1.5 phr for forming a film. Incorporation of modified CaCO_3 1.0 phr (both palmitic acid and stearic acid) into PP film showed good morphological properties. Besides, films also presented high tensile strength (21.24 MPa and 22.90 MPa, respectively) and modulus (1238.13 MPa and 1137.32 MPa, respectively). Moreover, films displayed suitable crystallization behavior and thermal properties for usability in microwave oven. For microwave application testing, films were heated in microwave oven at 340, 650 and 1300 watt for 10 minutes. It was revealed that the addition of modified CaCO_3 (both palmitic acid and stearic acid) improved crystallinity resulting in increase of mechanical properties, barrier properties and melting temperature. In contrast, glass transition temperature decreased. For increasing of electric power (650 and 1300 watt), it was indicated that properties of films tend to decrease. Although, the properties of films decreased after microwave heating, properties of films still better than non-heated films. The properties of PP/ CaCO_3 modified by palmitic acid was better than the use of stearic acid.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ แนวคิดในการดำเนินวิทยานิพนธ์และการเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมทั้งสองท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและสละเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์ และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ สรรพกุล ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิตชนก มีใจชื่อ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก อาจารย์จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ได้สละเวลาอันมีค่าสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะและแนวคิดต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการดำเนินงาน ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องขึ้นรูป และขอบคุณ เพื่อน ร่วมถึงรุ่นพี่รุ่นน้องทุกคน ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนา สำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA University Industry Research Collaboration, NUI-RC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2555 ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2557 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่า ในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติของนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2557 ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยและการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา ที่ได้อบรม ให้ความรัก และกำลังใจผู้วิจัยตลอดมา จนประสบความสำเร็จในทุกวันนี้

อาจารย์ ประดิษฐ์ธรรม
พฤษภาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์ผล	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก การเตรียมสารที่ใช้ในขั้นตอนการตัดแปรรูปแผ่นฟิล์มอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต	99
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมัน และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมัน	101
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมัน และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมัน	103
ภาคผนวก ง การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และการขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมันด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม	105
ภาคผนวก จ การทดสอบสมบัติของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต	108
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	113
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดและตัวอย่างของกรดไขมัน	18
2	อัตราส่วนของการตัดแปรรูปอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน	30
3	อัตราส่วนของการผสมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต	31
4	ตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมัน	37
5	องค์ประกอบผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปผิวด้วยกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริก	39
6	อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิต	40
7	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมัน	40
8	ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดปาล์มิติก	52
9	ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดสเตียริก	53
10	ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดปาล์มิติก	54
11	ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดสเตียริก	57
12	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดปาล์มิติก	62
13	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดสเตียริก	64
14	ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	74
15	ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	75
16	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	84
18	ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	85
ตารางผนวกที่		
ค1	อัตราส่วนของการผสมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต	106
ฉ1	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	114
ฉ2	ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	114
ฉ3	ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	115
ฉ4	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	115
ฉ5	ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	116
ฉ6	ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	116
ฉ7	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์ม ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรด ปาล์มิติก	117
ฉ8	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์ม ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	117
ฉ9	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียม คาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	118
ฉ10	ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	118
ฉ11	ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียม คาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ฉ12 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	120



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน	7
2	โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนแบบสเตอริโอ	8
3	โครงสร้างของลามেলা	9
4	การเกิดผลึกสเฟียรูไลต์	9
5	ขนาดและการกระจายขนาดของผลึกในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน	10
6	ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดของผลึกสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีน	11
7	โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะซิติก	18
8	กระบวนการเป่าขึ้นรูป	19
9	การให้ความร้อน (ก) แบบธรรมดา (ข) แบบไมโครเวฟ	20
10	FTIR สเปกตรัมของ (ก) PA (ข) CaCO ₃ (ค) CaCO ₃ /1%PA (ง) CaCO ₃ /3%PA และ (จ) CaCO ₃ /5%PA	35
11	FTIR สเปกตรัมของ (ก) SA (ข) CaCO ₃ (ค) CaCO ₃ /1%SA (ง) CaCO ₃ /3%SA และ (จ) CaCO ₃ /5%SA	36
12	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) PA (ข) CaCO ₃ (ค) CaCO ₃ /1%PA (ง) CaCO ₃ /3%PA และ (จ) CaCO ₃ /5%PA	38
13	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) SA (ข) CaCO ₃ (ค) CaCO ₃ /1%SA (ง) CaCO ₃ /3%SA และ (จ) CaCO ₃ /5%SA	38
14	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	42
15	ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	42
16	ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	43
17	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	45
18	ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	45
19	ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	46
20	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	47

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	48
22	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	49
23	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	50
24	ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	55
25	ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก	56
26	ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	57
27	ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก	58
28	FTIR สเปกตรัมของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -PA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -PA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -PA	59
29	FTIR สเปกตรัมของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -SA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -SA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -SA	60
30	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -PA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -PA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -PA	61
31	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -SA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -SA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -SA	63
32	ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -PA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -PA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -PA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	65
33	ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -PA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -PA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -PA ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	66

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -SA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -SA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -SA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	67
35	ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO ₃ (ค) PP/1.0 CaCO ₃ (ง) PP/1.5 CaCO ₃ (จ) PP/0.5 CaCO ₃ -SA (ฉ) PP/1.0 CaCO ₃ -SA และ (ช) PP/1.5 CaCO ₃ -SA ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	68
36	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	69
37	ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	70
38	ค่าความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	71
39	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	72
40	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	73
41	ค่า $\tan \delta$ ของ (ก) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และ (ค) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	76
42	ค่ามอดูลัสสะสมของ (ก) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และ (ค) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	78
43	FTIR สเปกตรัมของ (ก) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และ (ค) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	80
44	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และ (ค) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ	82

สมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีน/แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร
ด้วยกรดไขมัน สำหรับภาชนะบรรจุไมโครเวฟของอาหารแช่เย็น

Mechanical Properties and Crystallization Behavior of PP Film/ CaCO_3
Modified by Fatty Acid for Microwaveable Packaging of Chilled Food

คำนำ

ปัจจุบันพลาสติกมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ทั้งการใช้งานกับอาหารและ
ไม่ใช้กับอาหาร ในรูปแบบ ฟิล์ม ถ้วย ถาด และขวด เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา มีสมบัติ
ที่หลากหลาย เช่น ความใส ความขุ่น ความเหนียว ความสามารถในการปิดผนึกด้วยความร้อนหรือ
ความสามารถในการทนความร้อน เป็นต้น โดยการขึ้นรูปพลาสติกในอุตสาหกรรมพลาสติกของ
ประเทศไทยนิยมใช้เม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (poly
propylene, PP) และพอลิเอทิลีนเทอเลฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) เป็นต้น

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่อยู่ในตระกูลพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) เช่นเดียวกับ
พอลิเอทิลีน นิยมนำพอลิโพรพิลีนมาทำเป็นภาชนะบรรจุสำหรับอุ่นอาหารเข้าไมโครเวฟ เนื่องจากมี
อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง (melting temperature, T_m) ประมาณ 160 องศาเซลเซียส
พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งตึง (stiffness) สูง เหมาะกับการทำฝา เพราะมีความคงรูป
และสามารถทนต่อแรงบิดในการเปิด-ปิดได้ดี ทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีความเค้นสูง (environment
stress crack resistance, ESCR) เนื่องจากพฤติกรรมการผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยโครงสร้างแบบ
สเตอริโอ (stereo configurations) ของพอลิโพรพิลีนมี 3 แบบ คือ แบบอะแทกติก (atactic)
แบบซินดีโอแทกติก (syndiotactic) และแบบไอโซแทกติก (isotactic) โครงสร้างแบบอะแทกติก
มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) มีลักษณะเป็นยางเหนียว ไม่ค่อยพบการใช้งานทาง
การบรรจุ โครงสร้างแบบซินดีโอแทกติกสามารถเกิดผลึกได้บ้าง สมบัติทางการบรรจุดีกว่าแบบ
ไอโซแทกติก ซึ่งโครงสร้างแบบไอโซแทกติกสามารถเกิดผลึกได้ง่าย ทำให้มีความแข็งแรงสูง จึงนิยม
นำมาใช้งานทางการบรรจุ ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene, iPP) สามารถเกิด
ผลึกได้ 4 รูปแบบ คือ รูปผลึกแบบแอลฟา (monoclinic, α -form) รูปผลึกแบบเบต้า (trigonal,
 β -form) รูปผลึกแบบแกมมา (orthorhombic, γ -form) และรูปผลึกแบบสมเมติก (smectic) ซึ่งรูป
ผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบ
การกระเจิงหรือเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction pattern) ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึก
ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน จะประกอบด้วยรูปผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็น
โครงสร้างที่เสถียร และอาจมีรูปผลึกแบบเบต้าบ้างเล็กน้อย ซึ่งพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบแอลฟา
เป็นส่วนใหญ่จะมีมอดุลัส (modulus) ความทนแรงดึงสูง แต่มีความทนแรงกระแทก (impact
strength) ปานกลาง ขณะที่พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบเบต้าเป็นส่วนใหญ่จะมีความทนแรง

กระแทก ความเหนียว (toughness) อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (heat distortion temperature, HDT) ได้ดีกว่ารูปผลึกแบบแอลฟา โดยจากการเปรียบเทียบด้วยพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมผลึกเบต้า และไม่เติมผลึกเบต้า (พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแอลฟา) มาบรรจุข้อสมมุติฐานแล้วนำเข้าเครื่องไมโครเวฟพบว่า ถ้วยพอลิโพรพิลีนที่ไม่เติมผลึกเบต้าเกิดการเสียรูป เนื่องจากรูปผลึกแบบแอลฟามีอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ระดับการหล่อตัวสูงเมื่อมีแรงกระทำ (high level of moulded in stress) การเกิดรูปผลึกแบบแอลฟาและรูปผลึกแบบเบต้าเกิดขึ้นได้จากการใช้สารก่อผลึกกับพอลิโพรพิลีน ขณะที่รูปผลึกแบบแกมมาและรูปผลึกแบบสมติกจะเกิดจากการลดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมอย่างรวดเร็ว การใช้สารก่อผลึกสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ การเติมด้วยสารอินทรีย์ เช่น ซอร์บิทอล (sorbitols) และอนุพันธ์ (derivatives) ต่างๆ การเติมด้วยสารอนินทรีย์ เช่น ทัลค์ (talc) ไมก้า (mica) แบเรียมซัลเฟต (barium sulfate) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) โดยปกติการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนจะช่วยปรับปรุงสมบัติที่ด้อยของพอลิโพรพิลีน คือ ความสามารถทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ มอดูลัสต่ำ การหดตัว (shrinkage) สูง เป็นต้น ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้นและช่วยเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้การผลิตมีต้นทุนที่ต่ำลง

จากที่ได้กล่าวมาพบว่า การเติมสารก่อผลึกเบต้าในแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถช่วยลดการเสียรูปของพอลิโพรพิลีนที่ใช้งานภายใต้ไมโครเวฟได้ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติด้านต่างๆ ต่อพอลิโพรพิลีน แต่การใช้สารก่อผลึกมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตจึงเกิดแนวคิดในการศึกษาชนิด ปริมาณกรดไขมัน (fatty acid) ที่เหมาะสมในการตัดแปรรูปแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับการเตรียมฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเพื่อเป็นสารเหนียวนำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบเบต้า และช่วยให้แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวได้ดีในไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นภาชนะบรรจุที่สามารถเข้าไมโครเวฟได้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิโพรพิลีน/แคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรและไม่ตัดแปรพื้นผิวด้วยกรดไขมัน ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการสกัดกั้น สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพ
2. ศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานของฟิล์มพอลิโพรพิลีน/แคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรและไม่ตัดแปรพื้นผิวด้วยกรดไขมันภายใต้ไมโครเวฟ ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการสกัดกั้น สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพ



การตรวจเอกสาร

ภาชนะบรรจุ

ภาชนะบรรจุ (package) เป็นภาชนะหรือโครงสร้างใดๆ ที่ทำหน้าที่ในการบรรจุ ห่อหุ้ม และรวบรวมผลิตภัณฑ์ให้เป็นหน่วย เพื่อนำผลิตภัณฑ์ส่งไปยังผู้บริโภคในสภาพที่สมบูรณ์ และมีความปลอดภัย นอกจากนี้ภาชนะบรรจุยังรวมถึงฉลากและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับมัดหรือปิดผนึกภาชนะบรรจุด้วย

วัสดุของภาชนะบรรจุที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ แก้ว กระดาษ โลหะและพลาสติก อุตสาหกรรมภาชนะบรรจุในประเทศไทย มีการใช้กระดาษมากที่สุด ร้อยละ 40 รองลงมาคือพลาสติกร้อยละ 25 โลหะร้อยละ 20 และแก้วร้อยละ 15 ตามลำดับ (งามทิพย์, 2550; พรชัย, 2552)

1. แก้ว (glass)

แก้วเป็นของแข็งชนิดหนึ่งที่เกิดจากการหลอมรวมกันของสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง ธรรมชาติของแก้วจะมีลักษณะคล้ายของเหลว โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างช้าๆ เมื่อได้รับความร้อนและจะมีรูปร่างแข็งเมื่ออุณหภูมิลดลงหรือแก้วเย็นตัวลง วัตถุประสงค์หลักของแก้ว คือ ทนรอยแตก ร้อยละ 72 ถึง 73 ทนปฏิกิริยาร้อยละ 10 ถึง 11 และโซดาแอซร้อยละ 14 ถึง 15 ในกระบวนการผลิตแก้วจะมีการเติมแก้วที่ใช้แล้ว หรือเศษแก้วเข้าไปในกระบวนการหลอมแก้วร่วมกับวัตถุดิบหลัก เพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการหลอม ทำให้แก้วหลอมได้เร็วขึ้นและช่วยลดต้นทุนในการผลิต นอกจากนี้ยังมีการเติมวัตถุดิบอื่นๆ เข้าไป เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของแก้วหรือปรับปรุงกระบวนการผลิต เช่น สารไล่ฟองอากาศ สารเพิ่มความแข็งแรง สารฟอกสีและสารเร่งการหลอมละลาย เป็นต้น

ภาชนะบรรจุแก้วมีความแข็งแรงสูง รับแรงกดทับ แรงดันภายในได้ดี แต่แก้วไม่ทนต่อแรงกระแทกที่มากกระทำ จึงทำให้แก้วเปราะแตกได้ง่าย ภาชนะบรรจุแก้วมีความโปร่งใส ช่วยแสดงตัวสินค้า ทนต่อสารเคมี ทนต่อการซึมผ่านของไอน้ำ กลิ่นและแก๊สได้ดี มีความเป็นกลาง ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ ทำให้ผู้บริโภคได้รับความปลอดภัยสูง ช่วยรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้เป็นระยะเวลานาน อย่างไรก็ตามบรรจุภัณฑ์แก้วมีน้ำหนักมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าขนส่ง การเก็บรักษา และการขนส่งใช้พื้นที่มาก มีค่าแม่แบบแพงและใช้พลังงานสูงในการผลิต ทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง (งามทิพย์, 2550; พัทธรา และคณะ, 2546; พรชัย, 2552)

2. กระดาษ (paper)

กระดาษเป็นวัสดุที่มาจากเส้นใยสานอัดแน่นเป็นแผ่นบางๆ โดยทั่วไปมีความหนาไม่เกิน 0.012 นิ้ว องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเยื่อกระดาษคือเซลลูโลส ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเส้นใยและให้ความแข็งแรง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นสารยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกันและให้ความแข็งแรงกับเส้นใย ลิกนินทำหน้าที่เป็นสารยึดและให้ความแข็งแรงกับเนื้อเยื่อของไม้ ในกระบวนการสกัดเยื่อกระดาษจะต้องกำจัดลิกนินออกไป เนื่องจากลิกนินเป็นสาเหตุทำให้กระดาษมีสีคล้ำและเยื่อกระดาษมีความแข็งแรงต่ำ

กระดาษมีแหล่งวัตถุดิบหลากหลายชนิด สามารถผลิตได้ง่ายมีต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับภาชนะบรรจุประเภทอื่น สามารถพิมพ์ได้ง่าย ออกแบบให้มีรูปร่างพิเศษได้สะดวก สามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนได้ใหม่ ทั้งในรูปเดิมหรือสกัดเอาเยื่อกระดาษมาขึ้นรูปใหม่ มีน้ำหนักเบาและสามารถเก็บในลักษณะพับแบนได้เป็นการประหยัดค่าเก็บภาชนะเปล่าและค่าขนส่ง แต่กระดาษไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง จึงทำให้จุลินทรีย์ แมลง สัตว์ เข้ามาอาศัย ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงน้อยลงทำให้ฉีกขาดง่ายและไม่สามารถต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำได้ (งามทิพย์, 2550; พรชัย, 2552)

3. โลหะ (metal)

โลหะที่นิยมนำมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุอาหารมี 4 ประเภท คือ เหล็ก อะลูมิเนียม ดีบุกและโครเมียม วัสดุโลหะที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เหล็กและอะลูมิเนียม นอกจากโลหะทั้ง 4 ประเภทแล้ว วัตถุดิบในการขึ้นรูปกระป๋องยังใช้โลหะอื่นๆ ช่วยในการเชื่อมติด คือ ตะกั่วและทองแดง เป็นสารช่วยเชื่อมติดตามบริเวณตะเข็บข้างของตัวกระป๋องและวัสดุฉนวนตะเข็บสองชั้นของกระป๋อง

ภาชนะบรรจุโลหะมีความแข็งแรงคงทน ทนทานต่อความดันและแรงกระแทกสูง ช่วยคุ้มครองผลิตภัณฑ์ภายใน ถ่ายเทความร้อนได้ดี เหมาะกับกระบวนการผลิตที่ต้องการการถ่ายเทความร้อน กระบวนการผลิตและบรรจุสินค้านำง่ายและรวดเร็ว แต่ภาชนะบรรจุมีน้ำหนักต่อหน่วยมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงเมื่อเทียบกับภาชนะบรรจุประเภทอื่น เมื่ออยู่ในสภาพที่มีความชื้นหรือความเค็ม จะเกิดการกัดกร่อน เป็นสนิมได้ง่าย โดยเฉพาะกระป๋องจากแผ่นเหล็กกล้าที่บรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรดสูง จึงต้องมีการเคลือบโลหะและแลคเกอร์เสมอ ทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเข้าไปในผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค (งามทิพย์, 2550; ปุ่น และ สมพร, 2551; พรชัย, 2552)

4. พลาสติก (plastic)

พลาสติกเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถทำให้ไหล (flow) และหล่อขึ้นรูป (mould) ได้ด้วยการให้ความร้อนหรือความดันหรือทั้ง 2 อย่างร่วมกัน ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพลาสติกเป็นธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คลอรีน เป็นต้น โดยโมเลกุลของสารขนาดเล็ก (monomer) จะเกิดปฏิกิริยาเคมีมีการเชื่อมโยงกัน (polymerization) เป็นหน่วยซ้ำๆ กันจำนวนมากกลายเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (polymer) พลาสติกเป็นวัสดุที่มีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกในการขนย้ายและได้รับการพัฒนาขึ้นมาให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น พลาสติกสามารถจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้หลายลักษณะ เช่น สามารถทำเป็นวัสดุคงรูป (rigid packaging) เช่น ขวด ลัง กล่อง หรือใช้เป็นวัสดุรูปทรงอ่อนตัว (flexible packaging) นำมาทำเป็นซอง ถุง ฟิล์ม และสามารถผลิตได้อย่างรวดเร็วในปริมาณที่มาก มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำกว่า แก้วและโลหะ ทำให้ประหยัดพลังงานในระหว่างกระบวนการผลิต จึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ พลาสติกยังมีข้อดีด้านอื่นๆ อีก เช่น สามารถพิมพ์ตกแต่ง สามารถป้องกันการซึมผ่านของอากาศและแก๊สได้ระดับหนึ่ง และพลาสติกบางชนิดยังเป็นฉนวนกันความร้อนได้อีกด้วย

พลาสติกที่ใช้ทางการบรรจุแบ่งตามสมบัติการหลอมขึ้นรูปได้ 2 ประเภท คือ

4.1 เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic)

เป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใช้ใหม่ได้อีกหลังจากผ่านการหลอมขึ้นรูปแล้ว เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมบรรจุ

4.2 เทอร์โมเซตติง (thermosetting)

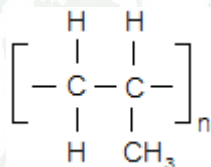
เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใช้ใหม่ได้อีก เนื่องจากหลังผ่านกระบวนการหลอมเพื่อขึ้นรูปครั้งแรกแล้ว จะเกิดโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมโมเลกุลเป็นแบบร่างแห (cross-linked) เมื่อให้ความร้อนสูงๆ พลาสติกชนิดนี้จะไม่เกิดการหลอมแต่จะเกิดการสลายตัวขึ้น ส่วนมากจะใช้เป็นทางอุตสาหกรรมกาวและเครื่องใช้ในครัว

โดยพลาสติกที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมบรรจุอาหารส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น (งามทิพย์, 2550; ดวงฤทัย, 2550; สมพงษ์, 2550)

พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีน (polypropylene) เป็นพลาสติกที่อยู่ในตระกูลพอลิโอเลฟินส์เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมบรรจุ โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน แสดงดังภาพที่ 1

ภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนมี CH_3 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า H ในโครงสร้างของพอลิเอทิลีน ทำให้การเรียงตัวในผลึกไม่แน่นมาก จึงมีความหนาแน่นต่ำกว่าพอลิเอทิลีน มีค่าอยู่ในช่วง 0.89 ถึง 0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้เนื้อพลาสติกมีความใสและโปร่งแสงกว่าถุงพอลิเอทิลีน สมบัติเด่นของพอลิโพรพิลีนที่ทำให้มีการใช้งานทางการบรรจุมาก ได้แก่ ความแข็งตึง (stiffness) สูง เหมาะกับการทำฝา เนื่องจากคงรูปและทนทานต่อแรงบิดในการเปิด-ปิดได้ดี มีค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -10 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการหลอมเหลวประมาณ 160 องศาเซลเซียส จึงเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ภาชนะสำหรับอุ่นอาหารในตู้ไมโครเวฟและรีเทอร์ทเพาซ์ (retort pouch) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพอลิโพรพิลีนปิดผนึกด้วยความร้อนยากกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีน และจะกรอบเปราะที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดแตกหัก (brittle point) สูง (ประมาณ 0 ถึง -1 องศาเซลเซียส) และเมื่อเจอความร้อนและแสงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน

โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนแบบสเตอริโอมี 3 แบบ คือ แบบอะแทกติก แบบซินดิโอแทกติก และแบบไอโซแทกติก ซึ่งแตกต่างกันที่ตำแหน่งของ CH_3 ที่อยู่บนสายโซ่ ส่งผลให้สมบัติของพอลิโพรพิลีนทั้ง 3 แบบ มีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน

1. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene)

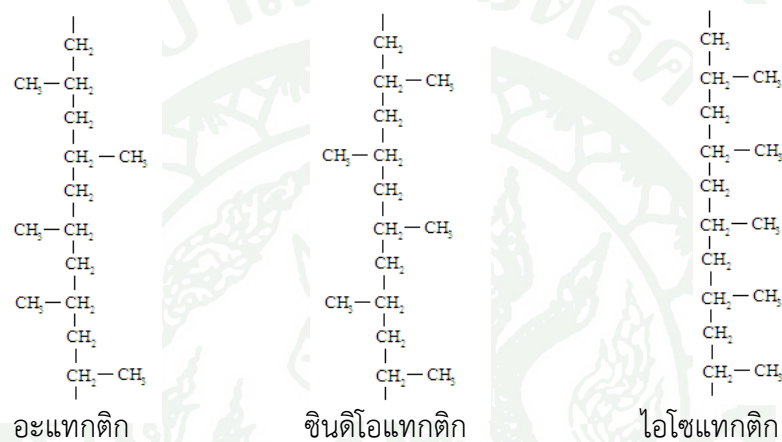
CH_3 มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ตำแหน่งของ CH_3 ที่เกาะกับอะตอมคาร์บอนเป็นแบบสุ่ม ทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานมีลักษณะเป็นยางเหนียว ไม่ค่อยพบการใช้งานทางการบรรจุ

2. ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene)

CH_3 มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ แต่ตำแหน่งของ CH_3 ที่เกาะกับอะตอมคาร์บอนอยู่สลับด้านกันของสายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดผลึกได้บ้าง แต่สมบัติทางการบรรจุดีกว่าไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

3. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene)

CH_3 มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ตำแหน่งของ CH_3 ที่เกาะกับอะตอมคาร์บอนอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์โพรพิลีน โดยใช้ Ziegler-Natta Catalyst เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดผลึกได้ง่าย และเหมาะกับการนำมาใช้งานทางการบรรจุ (งามทิพย์, 2550; ดวงฤทัย, 2550; สมพงษ์, 2550; อนินดาฯ, 2552; Stern, 2005)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนแบบสเตอริโอ

สารก่อผลึก

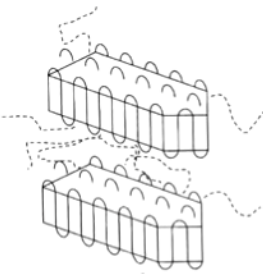
พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) คือ จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก (crystal) ซึ่งระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของพอลิเมอร์ จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของพอลิเมอร์ พันธะทุติยภูมิระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ อัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์ (cooling rate) และกรรมวิธีทางฟิสิกส์ที่กระทำต่อพอลิเมอร์

1. การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ (crystallization of semi-crystalline polymers)

1.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์จะต้องเอื้อต่อการจัดเรียงตัวของผลึก คือ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์จะต้องมีมุมข้างที่สม่ำเสมอ ไม่มีกิ่ง มีสายสายโซ่ข้างขนาดเล็ก ซึ่งจะไม่ไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์

1.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) จะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว และต้องไม่ใกล้กับอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของพอลิเมอร์เกินไป มิฉะนั้นสายโซ่พอลิเมอร์จะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก

1.3 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์จะเริ่มจากการเกิดนิวเคลียส (nucleation) และจะทำให้เริ่มมี ผลึก (crystallites) เกิดขึ้น โดยผลึกที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ เรียกว่า ลามেলা (lamellae) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์พับไปพับมา (chain-folded ribbon) แสดงดังภาพที่ 3 จากนั้นผลึกลามেলাจะจัดเรียงตัวรวมกลุ่มกัน โดยกระจายออกจากนิวเคลียสได้เป็นผลึกทรงกลม ซึ่งเรียกว่าสเฟียรูไลต์ (spherulites) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 โครงสร้างของลามেলা

ที่มา: Stern (2005)

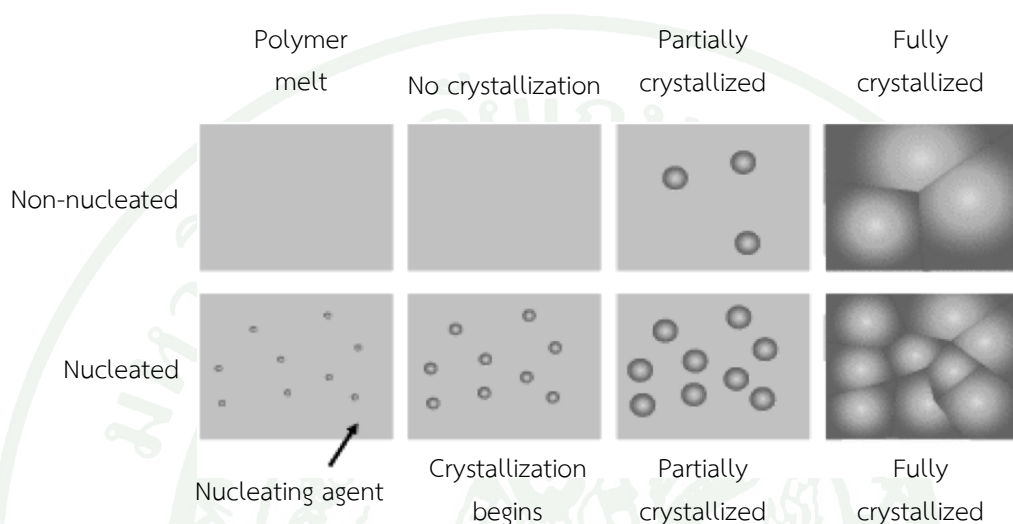


ภาพที่ 4 การเกิดผลึกสเฟียรูไลต์

ที่มา: Stren (2005)

โดยทั่วไป ผลึกที่เกิดจากนิวเคลียสแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous nucleation) จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่มั่นคงที่แน่นอน เนื่องจากผลึกมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีการกระจายในช่วงกว้าง แสดงดังภาพที่ 5 นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของผลึก อัตราการเกิดผลึก และอัตราการเติบโต

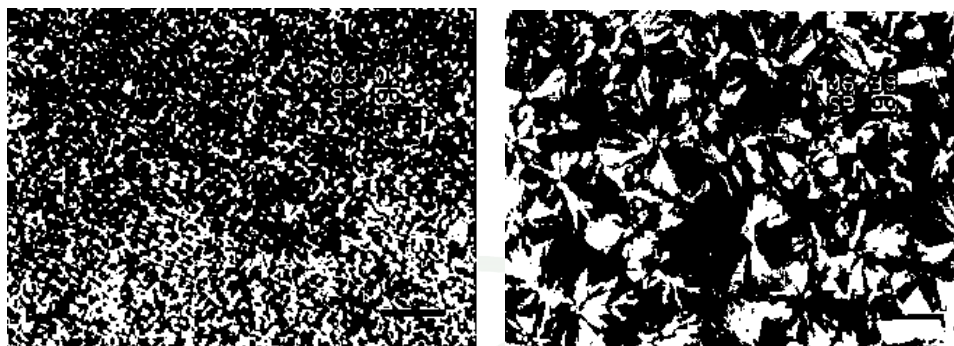
ของผลึกจะขึ้นกับอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ พอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว สเฟียรูไลต์ที่ได้จะมีขนาดเล็กจำนวนมากและมีระดับของความเป็นผลึกที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามการเย็นตัวอย่างช้าๆของพอลิเมอร์หลอม สเฟียรูไลต์ที่ได้จะมีขนาดใหญ่จำนวนน้อยและมีระดับของความเป็นผลึกที่สูง



ภาพที่ 5 ขนาดและการกระจายขนาดของผลึกในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน
บน : ไม่ได้ใส่สารก่อผลึก ล่าง : ใส่สารก่อผลึก

ที่มา: Kucarova (2010)

สำหรับพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเติบโตของผลึกปานกลาง เช่น พอลิเอไมด์ 6 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต สามารถทำให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น โดยอาศัยวิธีการเกิดนิวเคลียสแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous nucleation) จากการใส่สารก่อผลึกลงไป ซึ่งสารก่อผลึกจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเติบโตของผลึก ทำให้สเฟียรูไลต์ที่ได้มีระดับของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กลง แสดงดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6



(ก)

(ข)

ภาพที่ 6 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดของผลึกสเฟียรูไลทในพอลิโพรพิลีน

(ก) : ไม่ได้ใส่สารก่อผลึก (ข) : ใส่สารก่อผลึก

ที่มา: Romankiewicz *et al.* (2004)

2. สมบัติที่ต้องการของสารก่อผลึก

2.1 สารก่อผลึกที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

- 2.1.1 เปียกหรือดูดซับได้โดยพอลิเมอร์ แต่ไม่ละลายในพอลิเมอร์
- 2.1.2 มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเมอร์
- 2.1.3 มีความเสถียร ไม่ระเหย และไม่เกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งพอลิเมอร์ แก๊ส ออกซิเจน ความชื้น และสารเติมแต่งอื่นๆ
- 2.1.4 ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ ผลผลิตที่ได้ต้องสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้
- 2.1.5 กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์หลอมเหลวในลักษณะของอนุภาคที่ละเอียด (1 ถึง 10 ไมโครเมตร)

2.2 สำหรับสารที่นำมาใช้เป็นสารก่อผลึก

- 2.2.1 สารอินทรีย์ เช่น ทัลค์ ไมก้า แบเรียมซัลเฟต ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น
- 2.2.2 สารอินทรีย์ เช่น ซอร์บิทอล เกลือของกรดโมโน- หรือพอลิคาร์บอซิลิก ผงสี (pigments) บางชนิด เป็นต้น
- 2.2.3 พอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิเอไมด์ 6,6 สามารถใช้เป็นสารก่อผลึกสำหรับพอลิเอไมด์ 6 ได้
- 2.2.4 ไดลูเอนต์ (diluent)

3. ผลของสารก่อผลึกต่อสมบัติของพอลิเมอร์

3.1 อัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น คือ ผลึกเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ หลอมเหลวแข็งตัวเร็วขึ้น จึงใช้เวลาในกระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ (injection molding) ลดลง ส่งผล ต่อศักยภาพในการผลิตที่สูงขึ้น

3.2 ระดับของความเปราะเพิ่มขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์จะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น มีทนแรงดึง มอดูลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น

3.3 ผลึกสเฟียรูไลต์มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กลง ทำให้แสงสามารถผ่านผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงมีความใส (clarity) มากขึ้น หรือมีความมัว (haze) ลดลง (อรอุษา, 2546; Supaphol *et al.*, 2004)

4. สารก่อผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบสเตอริโอได้ 3 แบบ คือ แบบไอโซแทกติก แบบซินดีโอแทกติก และแบบอะแทกติก แต่แบบที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือแบบไอโซแทกติก โดยไอโซแทกติก พอลิโพรพิลีนสามารถเกิดผลึกได้ 4 รูปแบบที่แตกต่างกันตามการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ รูปผลึกแบบแอลฟา รูปผลึกแบบเบต้า รูปผลึกแบบแกมมา และรูปผลึกแบบสเมติก ซึ่งรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบการกระเจิงหรือ เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน การรวมกันของสารก่อผลึกกับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีน ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเกิดผลึกและสัณฐานวิทยา โดยโครงสร้าง ผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะประกอบด้วยผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ และอาจมีผลึกแบบ เบต้าบ้างเป็นส่วนน้อย ซึ่งสารก่อผลึกแอลฟาจะปรับปรุงสมบัติการดึง ความโปร่งใส (transparency) ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบแอลฟา จะมีมอดูลัสและความทนแรงดึงสูง แต่มีความทนแรงกระแทกปานกลาง ในขณะที่สารก่อผลึกเบต้า จะปรับปรุงความแข็งแรงต่อแรงกระแทก และอุณหภูมิการทนรูปทางความร้อน อย่างไรก็ตามสาร ก่อผลึกเบต้าจะลดความแข็งดึงของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้ไอโซพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึก แบบเบต้าเป็นส่วนใหญ่จะมีมอดูลัสและความทนแรงดึงต่ำกว่า แต่มีความทนแรงกระแทกและสมบัติ การยืด ผน จุดขาดสูงกว่า ดังนั้นการทำคอมพาวด์ (compounding) กับสารก่อผลึกแอลฟาและ เบต้า จะต้องคำนึงถึงความแข็งดึงและความเหนียวของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์ทั้งผลึกจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล ธรรมชาติของเฟสผลึก ขนาดของผลึก และ สเฟียรูไลต์ของผลึก

การใช้สารก่อผลึกกับพอลิโพรพิลีนจะทำให้เกิดแต่ผลึกแบบแอลฟาและแบบเบต้าเท่านั้น ในขณะที่รูปผลึกแบบแกมมาและแบบสมกติก จะเกิดจากการลดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างรวดเร็วเท่านั้น (อรอุษา, 2546, Zhang and Xin, 2007)

5. สารก่อผลึกแบบแอลฟา

สารก่อผลึกแบบแอลฟาเป็นสารก่อผลึกที่มีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamically stable) การเกิดผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะเพิ่มขึ้น โดยการใส่สารที่ทำให้เกิดนิวเคลียสแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ผลึกสเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กลง ซึ่งสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็กไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือฟองแก๊สสามารถกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสของการเกิดผลึกได้ (อรอุษา, 2546; Horvath *et al.*, 2010)

6. สารก่อผลึกแบบเบต้า

สารก่อผลึกแบบเบต้าเป็นสารก่อผลึกที่มีความกึ่งเสถียรทางเทอร์โมไดนามิก (metastable thermodynamically) จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่จำเพาะ เช่น การเย็นตัวอย่างยิ่งยวดในระดับสูง (high degree of supercooling) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (temperature gradient) หรือการเติมสารก่อผลึกแบบเบต้า สารก่อผลึกแบบเบต้าสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีหลายชนิด ได้แก่ ผงสีควินาคริโดน (quinacridone pigment) ไตรโพรโพลไดทริอาซีน (triphenol ditriazine) แคลเซียมพิมิเลต (calcium pimelate) แคลเซียมฟทาเลต (calcium phthalate) ไดโซเดียมฟทาเลต (disodium phthalate) สารผสมระหว่างกรดพิมิสิก (pimelic acid) และแคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) หรือแม้แต่การดัดแปรพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อเป็นสารเหนี่ยวนำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบเบต้า เป็นต้น ซึ่งในการทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบเบต้าจากการใช้สารก่อผลึก พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นจะมีผลึกแบบแอลฟาอยู่ร่วมด้วยเสมอไม่มากก็น้อย (อรอุษา, 2546; Labour, 2002; Xin and Shi, n.d.)

ฟิลเลอร์

ฟิลเลอร์ (fillers) เป็นสารเติมแต่งช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆ (เช่น การนำไฟฟ้า การนำความร้อน) ของพอลิเมอร์ เรียกฟิลเลอร์ประเภทนี้ว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) หรือ active fillers และมักจะเรียกฟิลเลอร์ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนแรงดึง) ให้กับพอลิเมอร์ว่า ฟิลเลอร์เสริมแรง (reinforcing fillers or reinforcements) และบางครั้งอาจใช้ฟิลเลอร์เพื่อเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extenders) หรือ inert fillers ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต อย่างไรก็ตามการใส่ฟิลเลอร์ประเภทนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย ตัวอย่างเช่น หินปูน (limestone) ซึ่งก็คือแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากธรรมชาติ ทัลค์ เคาลิน (kaolin) และผงไม้ (wood flour) เป็นต้น

ฟิลเลอร์จะมีสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งมีทั้งฟิลเลอร์อนินทรีย์ (inorganic fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต คาร์บอนแบล็ก (carbon black) ทัลค์ และเคอลิน เป็นต้น และฟิลเลอร์อินทรีย์ (organic fillers) เช่น ผงไม้ และแป้ง (starch) เป็นต้น

1. ผลของฟิลเลอร์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์

เอกซ์เทนเดอร์ฟิลเลอร์หรือฟิลเลอร์เสริมแรง เมื่อนำใช้กับพอลิเมอร์จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิเมอร์ได้แตกต่างกัน แม้ว่าฟิลเลอร์ทั้งสองประเภทจะทำให้พอลิเมอร์มีอิลาสติกมอดูลัส (elastic modulus or modulus of elasticity) เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่การใช้เอกซ์เทนเดอร์ฟิลเลอร์ไม่ได้มีผลทำให้การทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากฟิลเลอร์เสริมแรงที่เป็นเส้นใย (fiber reinforcement) ที่จะช่วยเพิ่มสมบัตินี้ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เอกซ์เทนเดอร์ฟิลเลอร์ที่มีรูปร่างของอนุภาคแบบเม็ดกลม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้คุณสมบัติการเปื่อยเบนความร้อนของพลาสติกสูงขึ้นได้ไม่มากเท่ากับการใช้เส้นใยเสริมแรง

ผลของเอกซ์เทนเดอร์ฟิลเลอร์ จะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อิลาสติกมอดูลัสเพิ่มขึ้น ความทนแรงอัด (compressive strength) ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้น คุณภาพพื้นผิว (surface quality) ดีขึ้น การหดตัวลดลง อีกทั้งทำให้คุณสมบัติการเปื่อยเบนทางความร้อนสูงขึ้น และทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพขึ้นกับอุณหภูมิน้อยลง

ผลของฟิลเลอร์เสริมแรงต่อสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก เมื่อนำฟิลเลอร์เสริมแรงมาใช้ในพอลิเมอร์ จะมีผลทำให้พอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกมีความทนแรงดึง ความทนแรงอัด ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงเฉือน (shear strength) เพิ่มขึ้น อิลาสติกมอดูลัสและความแข็งดึงเพิ่มขึ้น ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นบางส่วนและการหดตัวลดลง นอกจากนี้ยังทำให้คุณสมบัติการเปื่อยเบนทางความร้อนสูงขึ้น และทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพขึ้นกับอุณหภูมิน้อยลง

สำหรับฟิลเลอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์มากที่สุดคือ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ทั้งในอุตสาหกรรม พลาสติก ยาง สารเคลือบผิว สิ่งทอและกระดาษ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีความขาวสูง จึงสามารถใช้แทนผงสีขาวที่มีราคาแพงได้บางส่วน ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น และราคาถูก โดยเฉพาะแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากหินปูนธรรมชาติ สำหรับการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้กับพอลิเมอร์ มักทำการปรับแต่งหรือเคลือบพื้นผิวด้วยกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก เพื่อช่วยให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยแคลเซียมคาร์บอเนตนิยมใช้เป็นฟิลเลอร์ให้กับพลาสติกพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต พอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีน (ABS) เป็นต้น (อรอุษา, 2546; โอนดาซ์, 2552)

แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นฟิลเลอร์ที่มีปริมาณการใช้มากที่สุด ทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สารเคลือบผิว สิ่งทอ กระดาษ และอุตสาหกรรมอื่นๆ เนื่องจากมีความขาวสูง มีการขัดสีต่ำ มีหลายเกรด ซึ่งมีขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม และที่สำคัญ คือ หาได้ง่ายและมีราคาถูก

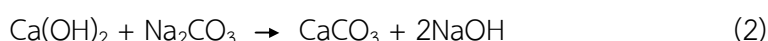
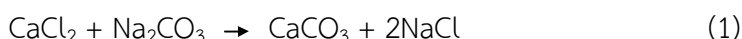
แคลเซียมคาร์บอเนต มีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดที่ได้จากการสังเคราะห์

1. แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ (natural calcium carbonate)

แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ มีอยู่ 2 ชนิด คือ ซอล์ก (chalk) หรือ whiting ซึ่งเป็นตะกอนที่ได้จากซากของสัตว์ทะเลเล็กๆ และหินปูน แคลเซียมคาร์บอเนตที่มาจากธรรมชาติจะต้องผ่านการบดก่อนนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติเป็นฟิลเลอร์ที่มีคุณภาพสูง นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกมากที่สุด โดยเฉพาะการนำมาใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่มาจากธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น มีความขาวสูง เป็นอนุภาคที่อ่อนจึงไม่เกิดการขัดสีกับเครื่องจักร พื้นผิวที่หยาบน้อย จึงมักไม่เกิดการดูดซับพลาสติกไซเซอร์ หรือสารเติมแต่งอื่นๆ (low Diothyl Phthalate (DOP) number) ไม่จับตัวกันเป็นก้อน ช่วยปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิวผลิตภัณฑ์ ลดการหลุดร่วงในระหว่างการขึ้นรูปเกิดการแยกตัวออกจากพลาสติกแล้วมาเกาะที่เครื่องจักรน้อย (plate out น้อย) และมีราคาถูกกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์

2. แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ (synthetic or precipitated calcium carbonate)

แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์หรือที่นิยมเรียกว่า PCC หรือ CCP (calcium carbonicum praecipitatum) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคลอไรด์กับโซเดียมคาร์บอเนตดังสมการที่ 1 และการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (lime-soda process) ดังสมการที่ 2



แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์มีความบริสุทธิ์สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ รวมทั้งมีความขาวที่สูงกว่า (degree of whiteness เท่ากับ ร้อยละ 95 ถึง 96) แต่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า

และสามารถผลิตขนาดของอนุภาคได้หลายเกรด ซึ่งขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ที่เล็กนี้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งตึง อีลาสติคโมดูลัส ความทนแรงกระแทก และผลิตภัณฑ์มีความเงาพื้นผิวที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ

การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ในเฮโลจีเนตพอลิเมอร์ (halogenated polymer) ช่วยทำให้พอลิเมอร์มีความทนทานแสงยูวีและสภาวะอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งมาจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และจะเป็นตัวเร่งให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น โดยปฏิกิริยาดังกล่าว คือ



การที่แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์เกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ ทำให้พอลิเมอร์สามารถทนไฟได้ โดยเฉพาะขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ละเอียดมาก (0.05 ถึง 0.10 ไมโครเมตร) จะมีประสิทธิภาพสูงในการจับแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ที่มาจากกาเผาไหม้ของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการลดแก๊สพิษในบรรยากาศ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จะช่วยเพิ่มสมบัติในการดับไฟให้กับพอลิเมอร์ จากสาเหตุข้างต้น ทำให้นิยมนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นฟิลเลอร์ในฉนวนของสายเคเบิลที่ทำมาจากพอลิไวนิลคลอไรด์ ข้อดีของแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ คือ มีพื้นที่ผิวน้ำสูงกว่า จึงไม่สามารถใช้ปริมาณที่สูงได้ ดูดซับพลาสติกไซเซอร์และสารเติมแต่งอื่นๆ สูงกว่า (DOP number เท่ากับ 32 ถึง 40 กรัมของ DOP ต่อ 100 กรัมของแคลเซียมคาร์บอเนต) และมีราคาแพงกว่า

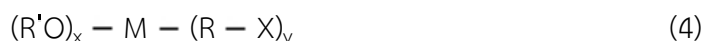
แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติและสังเคราะห์ นิยมนำมาใช้เป็นฟิลเลอร์ให้กับพลาสติกต่อไปนี้เป็นคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน เป็นต้น (อรอุษา, 2546; Rothon, 1998)

สารประสาน

สารประสานหรือสารช่วยยึด (coupling agents or adhesion promoters) ทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์ โดยเฟสทั้งสองจะมีการสร้างพันธะกัน ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสได้ดีขึ้น ซึ่งการยึดเกาะของพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์ที่ไม่ดี จะทำให้บริเวณรอยต่อเกิดความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น การกระจายตัว (dispersion) ความแข็งแรง (strength) ความทนทานต่อแรงกระแทก และการขยายตัวทางความร้อนที่ไม่เท่ากัน หรือเรียกว่า รอบทางความร้อน (thermal cycling) เป็นต้น

1. กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์โดยใช้สารประสาน

สูตรทั่วไปของสารประสาน



โดย M คือ โลหะ ได้แก่ ซิลิคอน ไททาเนียม หรือ เซอร์โคเนียม

X คือ หมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์

R คือ หมู่อินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ M

R'O คือ หมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับฟิลเลอร์

สารประสานกับฟิลเลอร์ อาจเกิดยึดกันโดยตรงระหว่าง R'O ของสารประสานกับหมู่ OH ที่พื้นผิวของฟิลเลอร์



หรืออาจเกิดการไฮโดรไลซ์ที่หมู่ R'O เพราะความชื้นที่พื้นผิวของฟิลเลอร์ ได้เป็นหมู่ OH ซึ่ง จะเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปกับฟิลเลอร์



สำหรับสารประสานกับพอลิเมอร์ จะยึดกันที่หมู่ X ของสารประสานกับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์

การใช้สารประสานมี 2 วิธี คือ การเคลือบหรือปรับแต่งพื้นผิวของฟิลเลอร์ก่อนที่จะนำไปผสมกับพอลิเมอร์ และการผสมสารประสานโดยตรงกับพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เช่น การเคลือบหรือการปรับแต่งพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกก่อนนำไปผสมกับพอลิเมอร์ โดยหมู่คาร์บอกซิลของกรดไขมันจะยึดเกาะกับแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอนจะเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ เพื่อช่วยให้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ (อรอุษา, 2546)

กรดไขมัน

กรดไขมัน (fatty acid, FA) เป็นกรดอินทรีย์ (organic acid) โมเลกุลของกรดไขมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวเป็นหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว (polar head)

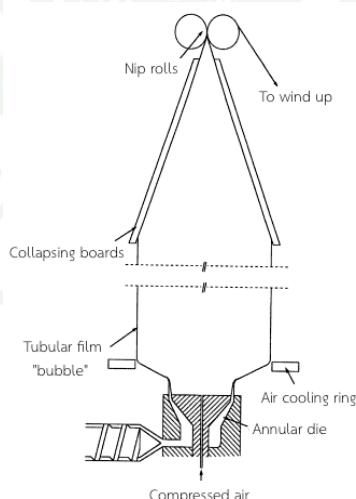
ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของกรดไขมัน	กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids)	กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids)
Long-chain (มากกว่า C12)	palmitic acid stearic acid	Oleic acid linoleic acid

ที่มา: Takeuchi *et al.* (2008)

กระบวนการเป่าขึ้นรูป

กระบวนการเป่าขึ้นรูป (blown film extruder) เป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่อง โดยผ่านเครื่องอัดรีด (extruder) แบบสกรูเดี่ยว เพื่อป้อนและหลอมเม็ดพลาสติกให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นพลาสติกหลอมจะถูกดันออกมาทางตายที่มีรูปร่างคล้ายวงแหวน (annular die) ได้เป็นท่ออ่อน ท่ออ่อนนี้จะถูกเป่าและดึงทำให้พลาสติกหลอมพองตัวออกเกิดเป็นลูกโป่งที่มีผนังบาง (thin-walled bubble) ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยหัวเป่ามีลักษณะเป็นวงแหวนรอบหัวแม่แบบชนิดเปิด (cooling ring) จากนั้นลูกโป่งจะถูกรวบด้วยบอร์ดแล้วป้อนเข้าในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง ทำให้ลูกโป่งแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น แล้วทำการม้วนเก็บฟิล์มแสดงดังภาพที่ 8 เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน เทอเลฟทาเลต พีวีซี และไนลอน เป็นต้น (อโนดาศ์, 2552)

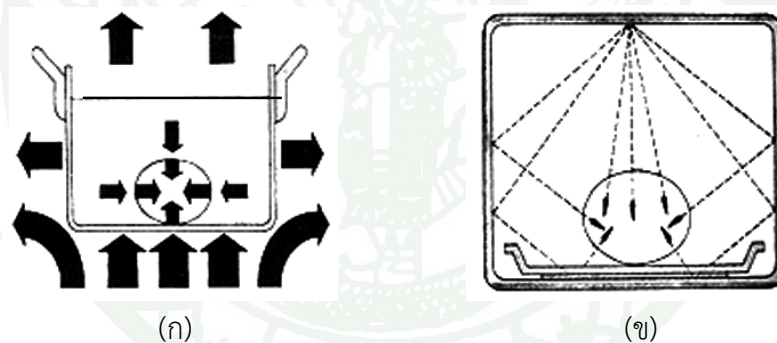


ภาพที่ 8 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

ที่มา: Wilkinson and Ryan (1999)

ตู้อบไมโครเวฟ

ตู้อบไมโครเวฟ (microwave oven) เป็นการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 จิกะเฮิร์ตซ์ หรืออยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1 เมตร ถึง 0.01 เมตร คลื่นไมโครเวฟเกิดมาจากแมกนีตรอน (magnetron) ซึ่งเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นไมโครเวฟเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากขั้วแคโทด (ขั้วลบ) วิ่งเข้าหาขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ใช้ การให้ความร้อนด้วยเครื่องอบธรรมดา (traditional heat) มีความแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยตู้อบไมโครเวฟ คือ การส่งผ่านความร้อน โดยความร้อนของเครื่องอบธรรมดาจะแพร่ไปยังพื้นผิวและส่งต่อเข้าไปภายในของวัสดุ (bulk) ทำให้การส่งผ่านความร้อนมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ (temperature gradient) แต่สำหรับตู้อบไมโครเวฟความร้อนจะแพร่ไปยังวัสดุพร้อมๆ กันทั้งพื้นผิวและภายในวัสดุ เพราะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สามารถเข้าไปยังภายในของวัสดุได้โดยตรง คลื่นไมโครเวฟจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และกลายสภาพเป็นความร้อน ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยเครื่องอบธรรมดา แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การให้ความร้อน (ก) แบบธรรมดา (ข) แบบไมโครเวฟ

ที่มา: วิไล (2552)

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นที่เดินทางเป็นเส้นตรง สามารถทะลุผ่านภาชนะบรรจุประเภท แก้ว พลาสติก กระดาษ หรือไม้ได้ แต่สำหรับโลหะจะถูกสะท้อนกลับ ซึ่งการสะท้อนกลับนี้จะทำให้อาหารที่อยู่ภายในไม่ได้รับความร้อน โดยอาหารจะร้อนก็ต่อเมื่อมีการดูดซับคลื่นหรือพลังงานงานเอาไว้ที่ภาชนะบรรจุ อย่างไรก็ตามการดูดซับพลังงานไมโครเวฟมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (lossy) ของวัตถุ ซึ่งความหนาแน่นที่มากจะทำให้ภายในโมเลกุลของวัตถุสามารถเคลื่อนที่ได้มาก ส่งผลต่อวัตถุที่มีความร้อนมากตามมาด้วย ดังนั้นรูปแบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจึงต่างกันตามภาชนะบรรจุ (วิไล, 2552; Mousavi and Rafizadeh, 2007; Wong, 2008; Cha-um *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2012)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการประยุกต์ใช้งานของภาชนะบรรจุที่สามารถเข้าไมโครเวฟ วัสดุที่นำมาใช้ต้องสามารถทนความร้อน มีสมบัติเพียงพอต่อการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ โดยปกติภาชนะบรรจุสำหรับไมโครเวฟ นิยมผลิตมาจากพอลิโพรพิลีน เนื่องจากมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง แต่เนื่องจากในโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนมีอะตอมคาร์บอนเป็นตติยภูมิ (tertiary carbon atom) ซึ่งเป็นจุดอ่อนแอและถูกแทนที่ได้ง่าย ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ถูกตัด โมเลกุลมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของภาชนะบรรจุลดลง จึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน โดยปกติแล้วพอลิโพรพิลีนจะมีรูปผลึกแบบแอลฟา จะมีมอดูลัสความทนแรงดึงสูง แต่มีความทนแรงกระแทกปานกลาง จึงต้องการเปลี่ยนพอลิโพรพิลีนให้มีรูปผลึกแบบเบต้า เพราะมีความทนแรงกระแทก ความเหนียว และอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนได้ดีกว่ารูปผลึกแบบแอลฟา ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยหลายท่านที่ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับรูปแบบผลึกของพอลิโพรพิลีน เช่น ในงานวิจัยของ Romankiewicz *et al.* (2004) ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกแอลฟา และผลึกเบต้าของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน งานวิจัยนี้ใช้ซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึกแอลฟาและใช้สารประกอบเอไมด์เป็นสารก่อผลึกเบต้า พบว่าการเติมสารก่อผลึกแอลฟาและสารก่อผลึกเบต้าทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น โดยสารก่อผลึกแอลฟาและสารก่อผลึกเบต้ามีประสิทธิภาพการเกิดผลึกเท่ากับร้อยละ 73.4 และ ร้อยละ 55.9 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเกิดผลึกจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของสารก่อผลึก จากการทดสอบสัญญาณวิทยาด้วยแสงโพลาไรซ์ (polarize light) พบว่าการเติมสารก่อผลึกจะทำให้ขนาดของสเฟียรูไลต์ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลง โดยจะเป็นการเพิ่มความเปราะให้แก่อไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้รูปแบบสัญญาณวิทยาดของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีรูปแบบที่มากขึ้น ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยรูปแบบลามลลา (lamellae) ของผลึกแบบแอลฟาและผลึกแบบเบต้า มีความแตกต่างกัน คือผลึกแบบแอลฟาเป็นแบบ radial และ tangential lamellae ส่วนผลึกแบบเบต้ามีเพียง radial lamellae ซึ่งทำให้ผลึกแบบเบต้าสามารถทนแรงกระแทกได้สูงกว่ารูปผลึกแบบแอลฟา

Jacoby (2007) ได้ศึกษาการเกิดผลึกเบต้าซึ่งทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเพิ่มขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้มีการเติมสารก่อผลึกเบต้าในเมทริกซ์โพรพิลีน 3 ชนิด คือ โโฮโมพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีน (homopolymer polypropylene, HPP) อิมแพคโคพอลิเมอร์โพรพิลีน (impact copolymer propylene, ICP) และเอทิลีน/โพรพิลีนโคพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีแบบแผน (ethylene/propylene random copolymer, RCP) พบว่า ทุกสูตรมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ ICP จะมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งปกติ ICP จะมีความเปราะ (brittleness) ที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อมีการเติมสารก่อผลึกเบต้า ทำให้ ICP สามารถทนแรงกระแทกได้ถึงอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จากการนำถั่วพอลิโพรพิลีนที่เติมผลึกเบต้าและไม่เติมผลึกเบต้า (พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแอลฟา) มาบรรจุซอสมะเขือเทศ แล้วนำเข้าเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 5 นาที พบว่า ถั่วพอลิโพรพิลีนที่เติมผลึกเบต้าจะไม่เกิดการเสีรูป แต่สำหรับถั่วพอลิโพรพิลีนที่ไม่เติมผลึกเบต้าจะเกิดการเสีรูป เนื่องจากรูปผลึกแบบแอลฟามีอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ระดับ

การหล่อตัวสูงเมื่อมีแรงมากกระทำ (high level of moulded in stress) สำหรับรูปผลึกแบบเบต้ามีอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนที่สูงกว่า ส่งผลให้การเหนียวทำให้เกิดการจัดเรียงตัวต่ำเมื่อมีแรงกระทำ (lower stress-induced orientation) ทำให้พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบเบต้าสามารถใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบแอลฟา จากการทดสอบการต้านทานแรงกด (crush strength) ของเมทริกซ์โพรพิลีนทั้ง 3 ชนิด ที่มีการเติมสารก่อผลึกแบบเบต้าและไม่เติมสารก่อผลึกเบต้า พบว่าเมทริกซ์ทุกชนิดที่มีการเติมสารก่อผลึกแบบเบต้าสามารถต้านทานแรงกดได้มากกว่าแสดงว่าการทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดรูปผลึกแบบเบต้า จะช่วยปรับปรุงความคงรูป (rigidity) ของบรรจุภัณฑ์

Zhang *et al.* (2012) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารก่อผลึกต่อสมบัติของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน งานวิจัยนี้ใช้ซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึก จากการทดสอบสัมพันธภาพพบว่าความเข้มข้นของสารก่อผลึกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างสเฟียรูไลต์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กลง โดยการเติมสารก่อผลึกจะทำให้เกิดนิวเคลียสแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดนิวเคลียส (nuclei) จำนวนมาก และทำให้อัตราการเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น จากการทดสอบระดับความเป็นผลึกพบว่าไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีรูปผลึกแบบแอลฟาเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.48 เมื่อมีการเติมซอร์บิทอลเข้มข้นร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก แสดงว่าซอร์บิทอลช่วยเหนียวทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดรูปผลึกแบบแอลฟา จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมซอร์บิทอลทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวและอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความเสถียรทางความร้อนของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติเชิงกลพบว่าการเติมซอร์บิทอลจะทำให้ความทนแรงกระแทก ความทนต่อการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความต้านทานต่อแรงโค้งงอของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับระดับความเป็นผลึก ขนาดของสเฟียรูไลต์ และรูปแบบการกระจายตัวของสเฟียรูไลต์ โดยผลึกขนาดเล็กจะทนแรงกระแทกได้ดี นอกจากนี้สารก่อผลึกจะช่วยให้การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์และช่วยปรับปรุงอัตราการเกิดผลึก ทำให้กระบวนการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมมีการผ่อนคลายมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของโมเลกุลเกิดการยึดกันแน่น เชื่อมโยงกันระหว่างสเฟียรูไลต์และเชื่อมโยงกันภายในสเฟียรูไลต์ ทำให้เกิดการพันกัน (entanglement) ของโมเลกุลระหว่างเกรนผลึก (crystal grains) ลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของกลุ่มสเฟียรูไลต์ที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุทนต่อแรงกระแทกได้มากยิ่งขึ้น แสดงว่าสมบัติการเกิดผลึกจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

Han *et al.* (2010) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติทางผลึก และสมบัติเชิงกลของสารก่อผลึกที่เป็นอนุพันธ์ของซอร์บิทอล (DMDBS) ที่เติมลงในพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการเติม CaCO_3 และ/หรือ DMDBS ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิในการหลอมเหลว สำหรับความเป็นผลึกพบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (PP/CaCO_3) ทำให้ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ทว่าการเติม DMDBS ทำให้ความเป็นผลึกทั้ง PP/DMDBS และ $\text{PP}/\text{CaCO}_3/\text{DMDBS}$ เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่ง $\text{PP}/\text{CaCO}_3/\text{DMDBS}$ ได้รับ

อิทธิพลมากจากการเติม DMDBS สำหรับสมบัติทางกายภาพพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นของการเกิดนิวเคลียส (nucleation density) เพิ่มขึ้น และขนาดของเฟอริรูไลท์ลดลง โดย PP/DMDBS และ PP/CaCO₃/DMDBS มีขนาดของเฟอริรูไลท์ที่เล็กกว่า มีความเป็นเนื้อเดียวกันและเฟอริรูไลท์มีการกระจายตัวที่ดีกว่า เนื่องมาจาก DMDBS ทำให้พอลิโพรพิลีนมีประสิทธิภาพในการเกิดนิวเคลียส (excellent nucleation efficiency) สำหรับสมบัติเชิงกลพบว่า PP/CaCO₃, PP/DMDBS และ PP/CaCO₃/DMDBS มีค่ามอดุลัส ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน เนื่องมาจากพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

Lam *et al.* (2009) ได้ศึกษาขนาดและการดัดแปรพื้นผิวแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ (precipitated calcium carbonate, PCC) ที่มีผลต่อวัสดุเชิงประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตผสมพอลิโพรพิลีน งานวิจัยนี้ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ระดับไมโครที่ไม่มีการดัดแปรพื้นผิว (t-PCC) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3.1 ตารางเมตรต่อกรัม แคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนที่ไม่มีการดัดแปรพื้นผิว (n-PCC) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 6.2 ตารางเมตรต่อกรัม และแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนที่มีการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมสเตียเรท (sodium stearate) (ns-PCC) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 22.5 ตารางเมตรต่อกรัม จากการทดสอบระดับการรวมกลุ่ม (agglomerate degree) ของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตระดับไมโคร แคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโน และแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมสเตียเรทมีระดับการรวมกลุ่มเท่ากับ 16-77 22-57 และ 5-7 ตามลำดับ โดยแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมสเตียเรทมีพื้นที่ผิวมากที่สุด แต่มีระดับการรวมกลุ่มน้อยที่สุด เนื่องจากที่พื้นผิวถูกดัดแปรด้วยโซเดียมสเตียเรท ซึ่งโซเดียมสเตียเรทจะทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวและมีความเข้ากันได้ดีในเมทริกซ์ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิโพรพิลีนค่าความทนต่อการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) และมอดุลัสของยัง (Young's modulus) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมจะช่วยกระจายแรงไปยังส่วนต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมสเตียเรทมีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและมอดุลัสยังมากที่สุด เนื่องจากการดัดแปรพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้มีการกระจายตัวและความเข้ากันได้ดี เกิดปฏิกิริยาที่แข็งแรงระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับพอลิโพรพิลีน ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมในการเติมนาโนฟิลเลอร์ (nanofiller) ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาค

Mihajlović *et al.* (2009) ได้ศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของแคลไซต์ด้วยกรดสเตียริก พบว่าการดัดแปรพื้นผิวของแคลไซต์ด้วยกรดสเตียริกไม่ทำให้โครงสร้างของแคลไซต์เปลี่ยนแปลง แต่ทำให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น (hydrophobic) ในกระบวนการดัดแปรพื้นผิวที่ประกอบด้วยแคลไซต์ น้ำกลั่น และคลอโรฟอร์ม โปรตรอนของกรดสเตียริกจะเกิดการแตกตัวกลายเป็นสเตียเรทไอออน ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}^-$) จากนั้นจะไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของแคลไซต์และอยู่ในรูปของ

แคลเซียมสเตียเรท $((\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO})_2\text{Ca})$ โดยภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรพื้นผิวของแคลไซต์ ด้วยกรดสเตียริกอยู่ระหว่างร้อยละ 1.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนัก

Avella *et al.* (2006) ได้ศึกษาการเกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน งานวิจัยนี้ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการดัดแปรผลึกแตกต่างกัน คือ แคลไซต์ที่มีรูปร่างแบบ trigonal-rhombohedral มีการเคลือบด้วยพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (S-PPMA) แคลไซต์ที่มีรูปร่างแบบ trigonal-scalenohedral มีการเคลือบด้วยพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (E-PPMA) แคลไซต์ที่มีรูปร่างแบบ trigonal-rhombohedral มีการเคลือบด้วยกรดไขมัน (S-FA) แคลไซต์ที่มีรูปร่างแบบ trigonal-scalenohedral มีการเคลือบด้วยกรดไขมัน (E-FA) และอะราโกไนต์ที่มีรูปร่างแบบ ortho-rhombic มีการเคลือบด้วยกรดไขมัน (AR-FA) จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าปริมาณร้อยละ 3 ของ S-PPMA การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการเคลือบแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย PPMA แม้ว่าจะมีรูปร่างแตกต่างกัน การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความคล้ายกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่เคลือบด้วยกรดไขมัน แคลเซียมคาร์บอเนตจะมีแนวโน้มการรวมกลุ่มกัน (cluster) ภายในเมทริกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งทั้ง PPMA และกรดไขมันเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ทำให้มีการยึดติดกัน (adhesion) ระหว่างเมทริกซ์กับฟิลเลอร์ที่ดี แต่การเคลือบด้วย PPMA มีการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตภายในพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่าการเคลือบด้วยกรดไขมัน จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า การเคลือบแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน จะทำให้การเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีการรวมกลุ่มกัน ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดผลึกลดลงเป็นผลมาจากความเฉพาเจาะจงของพื้นที่ผิวที่มีค่าลดลง ดังนั้นความสามารถในการเป็นสารก่อผลึกของฟิลเลอร์ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนขึ้นอยู่กับระดับการกระจายของอนุภาคในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งอัตราการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเคลือบด้วยกรดไขมันจะขึ้นอยู่กับจำนวน รูปร่าง และการดัดแปรผลึกของฟิลเลอร์ มีรายงานว่า การเติมแคลไซต์ร้อยละ 10 ที่เคลือบด้วยกรดสเตียริกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้การเกิดผลึกเกิดขึ้นช้า เนื่องจากกรดสเตียริกหรือฟิลเลอร์จะไปขัดขวางหรือทำลายจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน สำหรับการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเคลือบด้วย PPMA ร้อยละ 3 จะเริ่มเกิดผลึกที่อุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบกับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 อุณหภูมิการเสื่อมสลายเริ่มต้น (onset) ของการเปลี่ยนสถานะ (phase transition) จะเกิดขึ้นช้าเล็กน้อย แสดงว่าแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 เป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึก เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน พบว่าแคลไซต์เป็นสารก่อผลึกสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่าอะราโกไนต์ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์สารเชิงประกอบไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนจะแตกต่างกันเมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมมีการดัดแปรแตกต่างกัน ซึ่งผลึกจะเกิดขึ้นช้าสำหรับอะราโกไนต์และแคลไซต์ที่เคลือบด้วยกรดไขมัน (AR-FA, S-FA และ E-FA) แต่การเคลือบแคลไซต์

ด้วย PPMA การเกิดผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะดีกว่าการเคลือบด้วยกรดไขมัน โดย S-PPMA จะเกิดผลึกดีกว่า E-PPMA เพียงเล็กน้อย

Shentu *et al.* (2006) ได้ศึกษาผลของการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดโอเลอิก (oleic acid) ต่อพฤติกรรมผลึกและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับพอลิโพรพิลีน โดยผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่เกิดจากรอยต่อระหว่างพื้นผิว (interface) ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหรืออนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรช่วยเหนี่ยวนำให้พอลิโพรพิลีนเกิดรูปผลึกแบบเบต้าได้มากกว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ดัดแปร สำหรับสมบัติเชิงกลพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทก (impact strength) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ของพอลิโพรพิลีนได้ประมาณร้อยละ 65 และร้อยละ 20 ตามลำดับ เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

Buasri *et al.* (2012) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีนประมาณร้อยละ 65 ความแข็งประมาณร้อยละ 5 การดัดแปรพื้นผิวของฟิลเลอร์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะการยึดเหนี่ยว (interfacial bonding strength) และความสามารถในการเปียกผิว (wettability) ระหว่างฟิลเลอร์กับเมทริกซ์ ส่งผลต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกล จากการทดสอบพบว่าค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนคือ 117.56 และ 164.75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว แต่ช่วยลดค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกและค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอม เนื่องจากพอลิโพรพิลีนบางส่วนถูกแทนที่ด้วยอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของขอบเขตที่เป็นผลึก (crystal domain) และโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (amorphous structure) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ภายในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนเป็นสาเหตุสำคัญในการลดลงของขอบเขตที่เป็นผลึก การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวที่ดี แต่สำหรับการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งการเติมปริมาณอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง สำหรับค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกับเมทริกซ์พอลิเมอร์

Supaphol *et al.* (2004) ได้ศึกษาผลของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตต่อพฤติกรรมผลึก และสมบัติเชิงกลของซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ ความแข็งแรงของซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลง เนื่องจากการยึดติดกัน (interfacial adhesion) ที่ต่ำระหว่างพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกับเมทริกซ์ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน ส่งผลต่อ การส่งผ่านแรงที่ไม่ดี ขณะที่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากผล ของการคงรูป (stiffening effect) ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (เฟสกระจาย) ที่อยู่ภายใน เมทริกซ์ของซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน ประกอบกับการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สำหรับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ด้วยกรดสเตียริกและพาราฟินทำให้ความแข็งแรงและมอดูลัสของซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลง แต่ช่วยเพิ่มความทนต่อแรงกระแทก สมบัติสัญญาณวิทยาพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่ได้ดัดแปรเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) เนื่องจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมี ขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมากซึ่งเป็นสาเหตุของการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย จากการศึกษาผิวรอยแตก (fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า พื้นผิวของซินดีโอแทกติก พอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีพื้นผิวที่เรียกว่าการเติมอนุภาคแคลเซียม คาร์บอเนตดัดแปร แสดงว่าพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกับเมทริกซ์ซินดีโอแทกติก พอลิโพรพิลีนมีการยึดติดกันที่ไม่ดี ซึ่งการดัดแปรพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยให้อนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน ช่วยลด การขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) กล่าวคือรอยต่อระหว่างพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียม คาร์บอเนตจะช่วยดูดซับพลังงานที่มากระทำ

Yang *et al.* (2006) ได้ศึกษาสมบัติสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเมทริกซ์ที่ใช้คือ พอลิโพรพิลีน โคพอลิเมอร์ของ โพรพิลีน-เอทิลีน และพอลิโพรพิลีนผสมกับโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีน-เอทิลีน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้มีขนาด 0.07 ไมโครเมตร ซึ่งพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตถูกดัดแปรด้วย ไฮเลน จากการทดสอบพบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 2-10 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรง ณ จุดคราก มีค่ามากกว่าพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักค่าความแข็งแรง ณ จุดครากมีค่าลดลง สำหรับค่าความเค้นโค้งงอ ความยืดหยุ่น มอดูลัส (flexural modulus) และความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของแคลเซียม คาร์บอเนตเพิ่มขึ้น สำหรับโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีน-เอทิลีนที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับพอลิโพรพิลีนผสมกับโคพอลิเมอร์ ของโพรพิลีน-เอทิลีน เมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและ ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง แต่ความเค้นโค้งงอและความยืดหยุ่นมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น วัสดุเชิง ประกอบพอลิโพรพิลีนมีการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากเกิดพันธะระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับ พอลิโพรพิลีน ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะเพียงพอลิงทำให้ความแข็งแรง ณ จุดครากเพิ่มขึ้น ขณะที่ วัสดุเชิงประกอบโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีน-เอทิลีน และพอลิโพรพิลีนผสมโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีน- เอทิลีน แม้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีการกระจายตัวที่ดี แต่ความแข็งแรงของพันธะระหว่าง

โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีน-เอทิลีน หรือพอลิโพรพิลีนผสมโคพอลิเมอร์ของโพรพิลีน-เอทิลีนกับ แคลเซียมคาร์บอเนตไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากลดลง แคลเซียมคาร์บอเนต ที่มากเกินไปจะทำให้การกระจายตัวไม่ดี เนื่องจากมีพลังงานที่พื้นผิวสูงจึงเกิดการรวมกลุ่มกัน ซึ่งจะ ทำให้พันธะถูกทำลายได้ง่าย ดังนั้นจึงมีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากลดลง โครงสร้างของสเฟียรูไลท์ ถูกทำลายและมีขนาดของผลึกลดลงที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ดังนั้น รูปแบบของสเฟียรูไลท์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณที่มากเกินไป

Lin *et al.* (2010) ได้ศึกษากลไกความเหนียว (toughening mechanism) ของพอลิเมอร์ผสมวัสดุเชิงประกอบนาโน ซึ่งมีพอลิโพรพิลีนและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก งานวิจัยนี้ใช้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน คือ 55,000 กรัมต่อโมล สำหรับ H-PP และ 88,000 กรัมต่อโมล สำหรับ E-PP แคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาด 70 นาโนเมตร ซึ่งพื้นผิว ถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริก จากการทดสอบพบว่า E-PP มีอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำที่สุด เพราะว่ น้ำหนักโมเลกุลที่สูงจะไปขัดขวางกระบวนการเกิดผลึก การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตใน H-PP และ E-PP จะมีระดับการเกิดผลึกแตกต่างกันเล็กน้อย จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่ามอดูลัสและความทนต่อแรงดึงของ E-PP มีค่ามากกว่า H-PP ทั้งๆ ที่ความเป็นผลึกของ H-PP มีค่ามากกว่า เนื่องจากค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นผลึกเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของผลึกอีกด้วย ซึ่งการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยปรับปรุงมอดูลัส เนื่องจาก แคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะแข็ง (rigid) สำหรับค่าความทนต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับความหนาของ ลามลลา การเชื่อมโยงกันระหว่างลามลลา (interlamellae) และการเชื่อมโยงกันระหว่าง สเฟียรูไลท์ (interspherulites) โดยปกติแล้วน้ำหนักโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนที่มากจะมีความ เข้มข้นของโมเลกุลสูง ซึ่งจะทำให้ลามลลาใกล้ชิดกัน (adjacent lamellae) และเกิดกลุ่มของ สเฟียรูไลท์ (spherulitic boundaries) ปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาความทนต่อแรงดึงคือ ระดับ การจัดเรียงตัวของสายโซ่ กรณีของความทนต่อการยืดตัวจะพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุลของ พอลิเมอร์ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริกจะมีการกระจายตัวที่ดี แม้ว่าเมทริกซ์ จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีความตึงผิว (surface tension) น้อยมาก ซึ่งการกระจายตัวจะส่งผลต่อความสามารถทนแรงกระแทก โดยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลเพิ่มขึ้นจะมีความสามารถทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองคือ E-PP สามารถทนแรงกระแทกได้ดีกว่า H-PP เนื่องจากความแข็งแรงของสายโซ่มาจากน้ำหนักโมเลกุล ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถทนต่อการแตกหักขนาดใหญ่ (macrocrack) และการขยายตัว (expansion) ของการเสีรูปพลาสติกได้และเมื่อมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิโพรพิลีนจะทำให้สามารถทน แรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น

Zebrajad *et al.* (2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคฟิลเลอร์ต่อกลไกการเสีรูปและ การแตกหัก (fracture) ของไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน จากการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเติมฟิลเลอร์ ในพอลิโพรพิลีนจะทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเฟสกระจายมีการก่อผลึกเกิดขึ้น ซึ่งพอลิโพรพิลีนมีระดับความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 50-52 สำหรับความร้อนของการหลอมเหลว

วัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง เนื่องจากเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนถูกแทนที่ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงว่าความร้อนของการหลอมเหลวในวัสดุเชิงประกอบส่วนมากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) และความทนต่อการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากการให้แรงดึงส่งผลทำให้ผิวสัมผัสระหว่างฟิลเลอร์กับเมทริกซ์แยกออกจากกัน (debonding) และเกิดรอยแตก (craze) ขึ้น ส่งผลทำให้พื้นผิวมีประสิทธิภาพในการทนความเค้นได้ลดลง ขณะที่มอดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอดูลัสของแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามากกว่าพอลิโพรพิลีนทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ความเค้น ณ จุดคราก ความยืดหยุ่นของมอดูลัส และความทนต่อการยืดตัว ขึ้นอยู่กับการปรับสภาพผิว (surface treatment) ของแคลเซียมคาร์บอเนต คือ ผิวสัมผัสระหว่างฟิลเลอร์กับเมทริกซ์ ความสามารถในการผสมเข้ากัน (compatibility) และการยึดติดกันระหว่างฟิลเลอร์กับเมทริกซ์ จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของตัวอย่างที่ผ่านการดึง (stretching) พบว่าบริเวณความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) เกิดรอยแตกอย่างชัดเจน แสดงว่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นหรือระดับการเสีรูปีที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ตัวอย่างเกิดความเสียหาย โดยรอยแตกจะเริ่มเกิดบริเวณอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต และกระจายออกไปในทิศทางที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดรอยแตกชัดเจนบริเวณพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้นมาจากความแข็งแรงในการยึดติดที่ไม่เพียงพอของผิวสัมผัสระหว่างฟิลเลอร์กับเมทริกซ์ ทำให้เมทริกซ์เกิดการเสีรูเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยแตกกระจายออกไปได้ง่ายและทำให้ความเหนียวมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

Mirabedini *et al.* (2004) ได้ศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟต่อลักษณะพื้นผิวพอลิโพรพิลีน พบว่าคลื่นไมโครเวฟส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนพื้นผิวของพอลิโพรพิลีน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเพิ่มขึ้นของเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟทำให้ค่ามอดูลัสของหยดน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิโพรพิลีน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีขั้ว (polar component) โดยพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนจะเกิดหมู่คาร์บอนิลและหมู่แอลคีน ส่งผลให้พื้นผิวมีพลังงานอิสระที่เพิ่มขึ้น

Siripatrawan *et al.* (2000) ได้ศึกษาผลของพอลิโพรพิลีนภายหลังการใช้งานภายใต้ตู้ไมโครเวฟ พบว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ตู้ไมโครเวฟพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ใหม่ ทำให้ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ Chandrasekaran *et al.* (2012) พบว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟพอลิโพรพิลีนเกิดการดูดซับคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ โดยโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้ว (dipolar polarization) ทำให้โมเลกุลมีการหมุนกลับไปกลับมาส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนของพอลิโพรพิลีน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1 เม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (iPP resin) (Moplen HP525N, HMC Poly mers Company Limited, ประเทศไทย)
- 1.2 อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) (Polyline Co., Ltd., ประเทศไทย)
- 1.3 กรดสเตียริก (stearic acid, SA) (Panreac Quaimica S.L.U., Bcelona, ประเทศสเปน)
- 1.4 กรดปาล์มิติก (palmitic acid, PA) (Sigma-Aldrich Co., LLC, ประเทศเยอรมนี)
- 1.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Ajax Finechem Pty Ltd, ประเทศนิวซีแลนด์)
- 1.6 น้ำกลั่น (distilled water)

2. เครื่องมือ

- 2.1 โถดูดความชื้น (desiccator)
- 2.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก (sartorius analytical balances) (Model CP 224S, Sartorius AG, ประเทศเยอรมนี)
- 2.3 เครื่องแม่เหล็กสเตอร์เรอร์ (hotplate magnetic stirrer)
- 2.4 โกร่งบดสาร (mortar)
- 2.5 ตู้อบ (hot air oven) (Model ED53/E2, Scientific Promotion Co., Ltd., ประเทศไทย)
- 2.6 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) (Model CTE-D20L800, Chareon TUT Co., Ltd., ประเทศไทย)
- 2.7 เครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extruder) (Model LF-400-COEX, Lab Tech Engineering Co., Ltd., ประเทศไทย)
- 2.8 เครื่องวัดความหนา (micro-thickness gauge) (Model ID-C112BS, Mitutoyo, ประเทศญี่ปุ่น)
- 2.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (fourier transformed infrared spectrometer, FTIR) (Model Bruker TENSOR 27 GmbH, ประเทศเยอรมนี)
- 2.10 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี (X-ray diffractometer spectroscopy, XRD) (Model Bruker AXS Advanced X-ray Solutions GmbH, ประเทศเยอรมนี)
- 2.11 เครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชีน (instron universal testing machine) (Model 5965, Instron Co., Ltd., ประเทศไทย)

2.12 เครื่องทดสอบสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (oxygen permeation analyzer, OP) (Model 8500, Illinois instruments, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.13 เครื่องทดสอบสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapour permeation tester, WVP) (PERMATRAN-W 398, MOCON, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.14 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry analyzer, DSC) (Model Mettler Toledo DSC1 STAR SYSTEMS, ประเทศเยอรมนี)

2.15 เครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลซิส (dynamic mechanical thermal analyze DMTA) (GABO QUALIMETER testanlagen GmbH, ประเทศเยอรมนี)

2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (Model XL30, Philip, ประเทศเยอรมนี)

2.17 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) (AxioLab, Carl Zeiss Microscopy, LLC, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.18 ตู้อบไมโครเวฟ (commercial microwave oven) (Model NE-1356, Panasonic, ประเทศญี่ปุ่น)

วิธีการ

1. การตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน การวิเคราะห์พื้นผิว และการวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกตัดแปร

อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ที่มีพลังงานพื้นผิวสูง ทำให้มีการกระจายตัวที่ยากในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างอนุภาค โดยจะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Osman *et al.*, 2004) การตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน จะช่วยให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โดยชนิดของกรดไขมันที่ศึกษา คือ กรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก ซึ่งประสิทธิภาพการเกาะติดของกรดไขมันบนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตพิจารณาได้จากการสันของกรดไขมันที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและผลึกของกรดไขมันในอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของการตัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน

สูตรที่	ปริมาณสาร (กรัม)		
	แคลเซียมคาร์บอเนต	กรดไขมัน	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
1	20	1	79
2	20	3	77
3	20	5	75

1.1 นำกรดไขมันความเข้มข้นแตกต่างกันคือ ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มากระจายตัวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พร้อมกับให้ความร้อนด้วยเครื่องแมกเนติกสเตอร์เรอร์ เพื่อช่วยการกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีการกระจายตัวเข้ากันเป็นเวลา 30 นาที นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดัดแปรพื้นผิว (treated CaCO_3) ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ($\text{CaCO}_3/1\% \text{FA}$, $\text{CaCO}_3/3\% \text{FA}$ และ $\text{CaCO}_3/5\% \text{FA}$) (ดัดแปลงจาก Arbatan *et al.*, 2011) (ภาคผนวก ก)

1.2 ศึกษาลักษณะการเกาะติดของกรดไขมันบนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทำการศึกษาที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T) (ภาคผนวก ข)

1.3 ศึกษาลักษณะผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกดัดแปรด้วยกรดไขมันด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา (ภาคผนวก ค)

1.4 การเลือกอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่ดีที่สุดของแต่ละกรดไขมันเพื่อนำไปขึ้นรูป

2. การขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็ง ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรทางเคมี นอกจากนี้เป็นอนุภาคที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่นๆ (อรอุษา, 2546) การนำอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมาผสมกับพลาสติก จะช่วยเพิ่มความแข็งตึง อีลาสติซิโมดูลัส ความทนแรงกระแทก และช่วยลดความหดตัวให้กับพลาสติก โดยอัตราส่วนของการผสมพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของการผสมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

สูตรที่	สารเคมี (phr)			อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ดัดแปร
	เม็ดพลาสติก (iPP)	อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร กรดสเตียริก	อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร กรดปาล์มิติก	
1	100	-	-	-
2	100	-	-	0.5
3	100	-	-	1.0

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สูตรที่	สารเคมี (phr)			
	เม็ดพลาสติก (iPP)	อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร		อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ดัดแปร
		กรดสเตียริก	กรดปาล์มติก	
4	100	-	-	1.5
5	100	0.5	-	-
6	100	1.0	-	-
7	100	1.5	-	-
8	100	-	0.5	-
9	100	-	1.0	-
10	100	-	1.5	-

หมายเหตุ phr (parts per hundred resin) คือ ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน

2.1 นำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดัดแปรพื้นผิว (treated CaCO_3) ของแต่ละกรดไขมัน และอนุภาคแคลเซียมที่ไม่ดัดแปรพื้นผิว (untreated CaCO_3) ในปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นนำไปตัดเป็นเม็ดพลาสติก (pellet) จะได้เม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดไขมัน คือ กรดปาล์มติก และกรดสเตียริก (iPP/ CaCO_3 -PA และ iPP/ CaCO_3 -SA) ตามลำดับ (ภาคผนวก ง)

2.2 นำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (iPP virgin) เม็ดพลาสติกที่ผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ดัดแปรพื้นผิวและดัดแปรพื้นผิว มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (iPP/ CaCO_3) และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดัดแปรพื้นผิว โดยฟิล์มทุกตัวอย่างมีความหนา 40 ไมโครเมตร (ภาคผนวก ง)

3. การทดสอบสมบัติของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล ทำการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดุลัส และร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชีน โดยใช้มาตรฐาน ASTM D882 (ภาคผนวก จ)

3.2 การทดสอบสมบัติการสกัดกัน

3.2.1 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3985 (ภาคผนวก จ)

3.2.2 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน โดยใช้มาตรฐาน ASTM E96 (ภาคผนวก จ)

3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.3.1 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว และอุณหภูมิในการเกิดผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน ด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และเพิ่มอุณหภูมิจาก -30 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส ถึง -30 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 8 มิลลิกรัม และทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (ภาคผนวก จ)

3.3.2 การตรวจสอบค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว ค่า $\tan \delta$ และค่ามอดูลัสสะสมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน ด้วยเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลซิส โดยควบคุมอุณหภูมิการให้ความร้อนคงที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก -50 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (ภาคผนวก จ)

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดในช่วงคลื่น 4000 ถึง 500 cm^{-1} ใช้โหมดแบบส่องผ่าน (ภาคผนวก ข)

3.4.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา (ภาคผนวก ค)

3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ภาคผนวก จ)

3.5 เลือกฟิล์มที่มีสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละกรดไขมันเพื่อนำไปใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

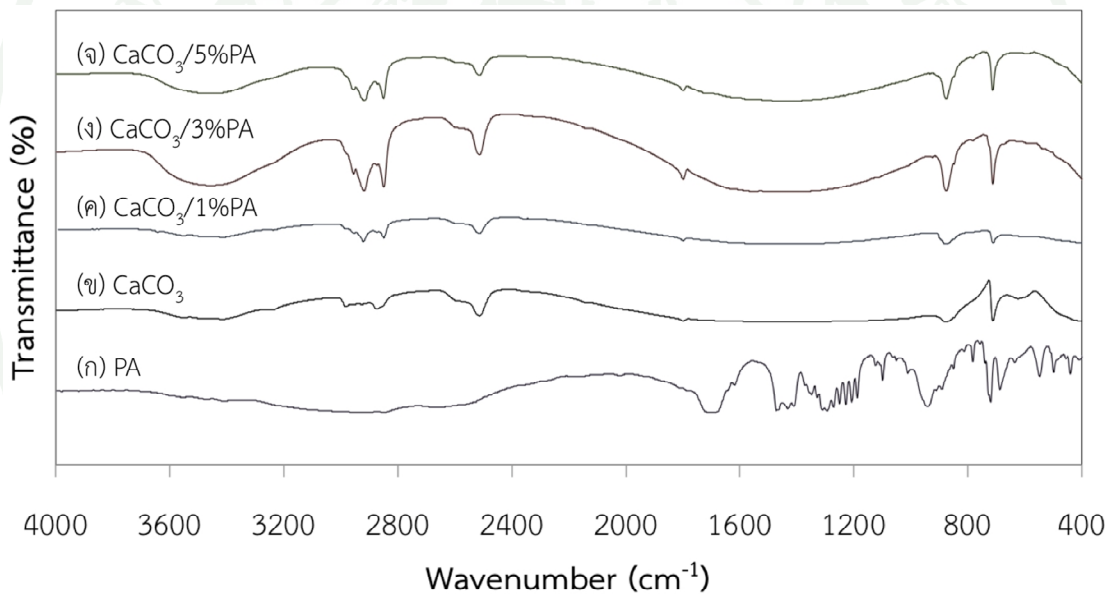
4. การใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

นำฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกเข้าตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 340 650 และ 1300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟิล์มก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ (Sukhavattanakul *et al.*, 2013)

ผลและวิจารณ์ผล

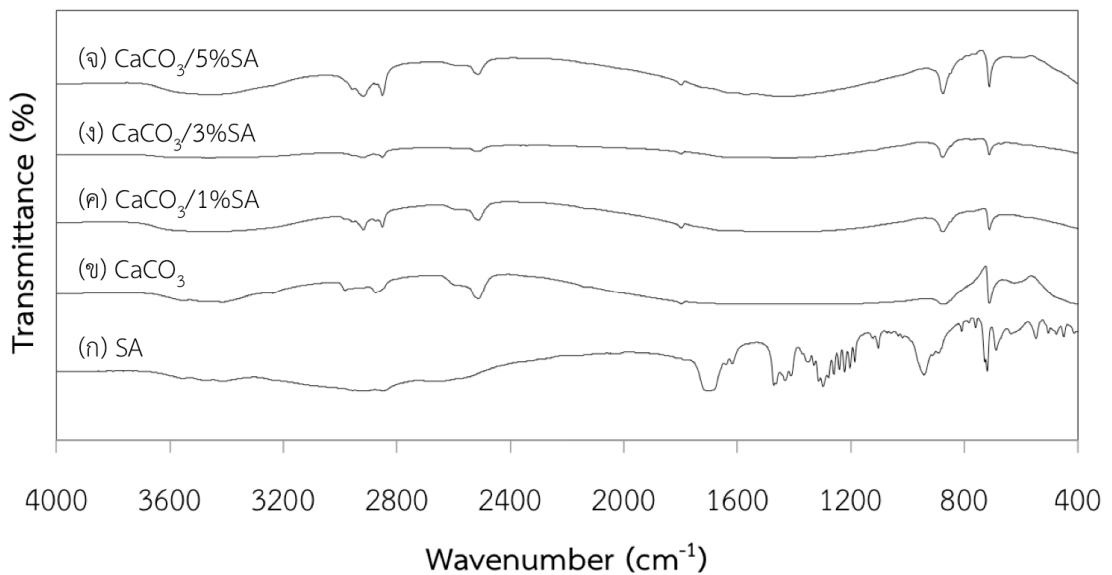
1. ภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน

อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ มีพลังงานพื้นผิวสูง ทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างอนุภาค เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Osman *et al.*, 2004) ทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวได้ไม่ดีในพอลิเมอร์ ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ด้อยลง พื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตนิยมดัดแปรด้วยสารประสานซิลาน (silane coupling agents) สารประสานฟอสเฟต (phosphate coupling agents) และกรดไขมัน (Mihajlović *et al.*, 2009) ซึ่งการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน นอกจากจะช่วยเรื่องกระจายตัว ยังช่วยเป็นสารเหนียวนำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบเบต้า (Labour *et al.*, 2002)



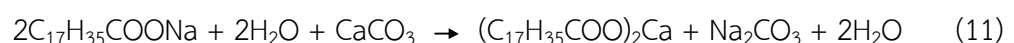
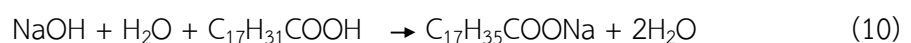
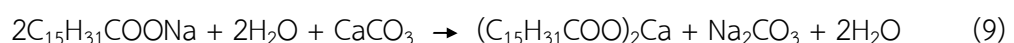
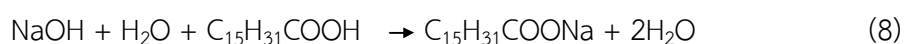
ภาพที่ 10 FTIR สเปกตรัมของ (ก) PA (ข) CaCO₃ (ค) CaCO₃ /1%PA (ง) CaCO₃ /3%PA และ (จ) CaCO₃ /5%PA

จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตสโคปีในช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 ซม⁻¹ แสดงดังภาพ ที่ 10 และ ภาพที่ 11 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริก ตามลำดับ พบว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ดัดแปรจะแสดงลักษณะเฉพาะในช่วงเลขคลื่น 2513 ซม⁻¹ 1798 ซม⁻¹ 877 ซม⁻¹ และ 712 ซม⁻¹ ตามลำดับ อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดปาล์มิติกจะแสดงลักษณะเฉพาะในช่วงเลขคลื่น 2955 ซม⁻¹ 2919 ซม⁻¹ 2873 ซม⁻¹ 2850 ซม⁻¹ 2513 ซม⁻¹ 1799 ซม⁻¹ 876 ซม⁻¹ และ 712 ซม⁻¹ ตามลำดับ



ภาพที่ 11 FTIR สเปกตรัมของ (ก) SA (ข) CaCO₃ (ค) CaCO₃ /1%SA (ง) CaCO₃ /3%SA และ (จ) CaCO₃ /5%SA

ส่วนอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกจะแสดงลักษณะเฉพาะในช่วงเลขคลื่น 2956 ซม⁻¹ 2918 ซม⁻¹ 2874 ซม⁻¹ 2851 ซม⁻¹ 2515 ซม⁻¹ 1799 ซม⁻¹ 876 ซม⁻¹ และ 713 ซม⁻¹ ตามลำดับ (Kim and Lee, 2002; Osman *et al.*, 2002; Wu and Lu, 2003; Poompradub *et al.*, 2011; Yoğurtçuoğlu and Uçurum, 2011) สำหรับเลขคลื่น 2955-2956 ซม⁻¹ (CH₃ asymmetric stretching vibration) 2918-2919 ซม⁻¹ (CH₂ symmetric stretching vibration) 2873-2874 ซม⁻¹ (CH₂ symmetric stretching vibration) และ 2850-2851 ซม⁻¹ (CH₂ symmetric stretching vibration) แสดงถึงการสั่นของสารอินทรีย์ (กรดไขมัน) ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (Mihajlović *et al.*, 2009) ซึ่งพบว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ปรากฏเลขคลื่นดังกล่าว แสดงว่าทั้ง 3 ความเข้มข้นของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกมีความสามารถในการเกาะติดบนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาเคมีของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกแสดงดังสมการที่ 8-9 และ 10-11 ตามลำดับ (Yoğurtçuoğlu, 2011)

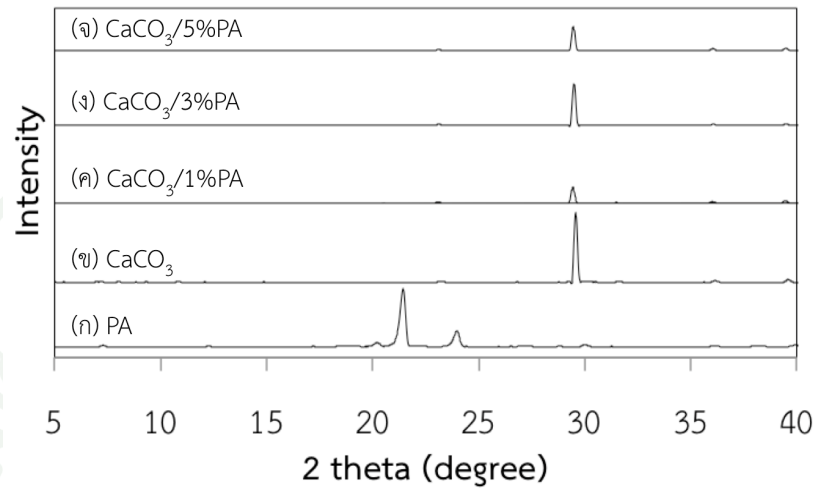


ตารางที่ 4 ตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

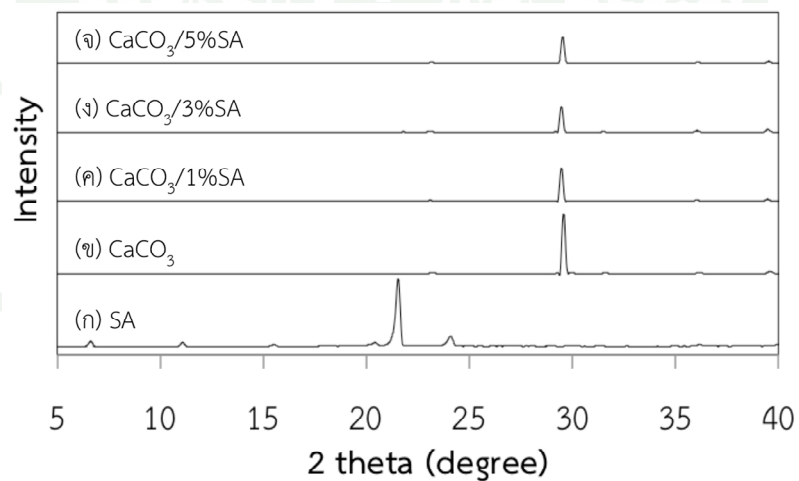
หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm ⁻¹)	ลักษณะเฉพาะตัว
การสั่นยืดหดแบบสมมาตรของ CH ₂ (CH ₂ symmetric stretching vibration)	3000-2900	Fatty acid
การสั่นยืดหดแบบไม่สมมาตรของ CH ₃ (CH ₃ asymmetric stretching vibration)	2972-2952	Fatty acid
การสั่นยืดหดแบบสมมาตรของ CH ₂ (CH ₂ symmetric stretching vibration)	2885-2860 2862-2843	Fatty acid
การสั่นแบบซับซ้อน (combination 1080 cm ⁻¹ and 1440 cm ⁻¹)	2400-2550	CaCO ₃
การสั่นแบบซับซ้อน (combination 1080 cm ⁻¹ and 713 cm ⁻¹)	1700-1800	CaCO ₃
การยืดหดของ C-O (C-O stretching mode)	1400-1500	CaCO ₃
การงอในระนาบของ C-O (C-O in-plane bending)	850-880	CaCO ₃
การงอออกนอกระนาบของ C-O (C-O out-plane bending)	690-740	CaCO ₃

ที่มา: Mohan (2004); Lv *et al.* (2012)

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงสแกน 5 ถึง 40 องศา แสดงดังภาพที่ 12 และภาพที่ 13 ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก ตามลำดับ



ภาพที่ 12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) PA (ข) CaCO_3 (ค) CaCO_3 /1%PA (ง) CaCO_3 /3%PA และ (จ) CaCO_3 /5%PA



ภาพที่ 13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) SA (ข) CaCO_3 (ค) CaCO_3 /1%SA (ง) CaCO_3 /3%SA และ (จ) CaCO_3 /5%SA

พบว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ดัดแปร มีรูปแบบผลึกเป็นรอมโบฮีดรอน (rhombohedron) เมื่อทำการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก ไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนแปลง (Mihajlović

et al., 2009) ซึ่งจากการวิเคราะห์อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรพบบองค์ประกอบของผลึก 2 ชนิด ในการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดด้วยกรดสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งจากผลการทดสอบไม่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตสโคปี อาจเนื่องมาจากกรดไขมันดูดซับอยู่บนพื้นผิวมากกว่า ภายในโครงสร้างผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (Shen et al., 2007)

ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมของการดัดแปรพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติกคือที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากพบผลึกของกรดปาล์มิติกอยู่ในอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร และพบการสั้นของกรดปาล์มิติกที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับความเข้มข้นที่เหมาะสมของการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกคือที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากพบผลึกของกรดสเตียริกอยู่ในอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ก็พบผลึกเช่นเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาการสั้นของกรดสเตียริกที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีมากกว่า

ตารางที่ 5 องค์ประกอบผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรพื้นผิวด้วยกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริก

อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร	2θ	องค์ประกอบผลึก
CaCO ₃	29	แคลเซียมคาร์บอเนต
CaCO ₃ /1%PA	29	แคลเซียมคาร์บอเนต
CaCO ₃ /3%PA	29	แคลเซียมคาร์บอเนต
CaCO ₃ /5%PA	29 และ 21, 23	แคลเซียมคาร์บอเนต และกรดปาล์มิติก
CaCO ₃ /1%SA	29	แคลเซียมคาร์บอเนต
CaCO ₃ /3%SA	29 และ 7, 23	แคลเซียมคาร์บอเนต และกรดสเตียริก
CaCO ₃ /5%SA	29 และ 7, 23	แคลเซียมคาร์บอเนต และกรดสเตียริก

2. ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตและการขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

2.1 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิต

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ดัดแปร โดยมีปริมาณ

การผสมที่แตกต่างกัน คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เป็น 40:1 พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปคือ 60 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 190-220 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้ในส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 6 จากนั้นเส้นพลาสติกคอมพอลิท์จะไหลออกมาจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยผ่านรางน้ำเพื่อช่วยลดอุณหภูมิและจะถูกตัดโดยใช้ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ได้เป็นเม็ดพลาสติกไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม

ตารางที่ 6 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์โดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ภาวะควบคุม	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป					
โซน	1	2	3	4	5	6
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	200	190	200	210	220	220

2.2 ภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน

ภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน โดยมีปริมาณการผสมที่แตกต่างกัน คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ด้วยเครื่องเป่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เป็น 30:1 พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปคือ 50 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 170-180 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้ในส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 7 จากนั้นนำฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติการสกัดกัน สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพ เพื่อหาฟิล์มที่มีสมบัติดีที่สุดของแต่ละกรดไขมัน และนำไปใช้งานภายใต้ไมโครเวฟต่อไป

ตารางที่ 7 อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันโดยเครื่องเป่าฟิล์ม

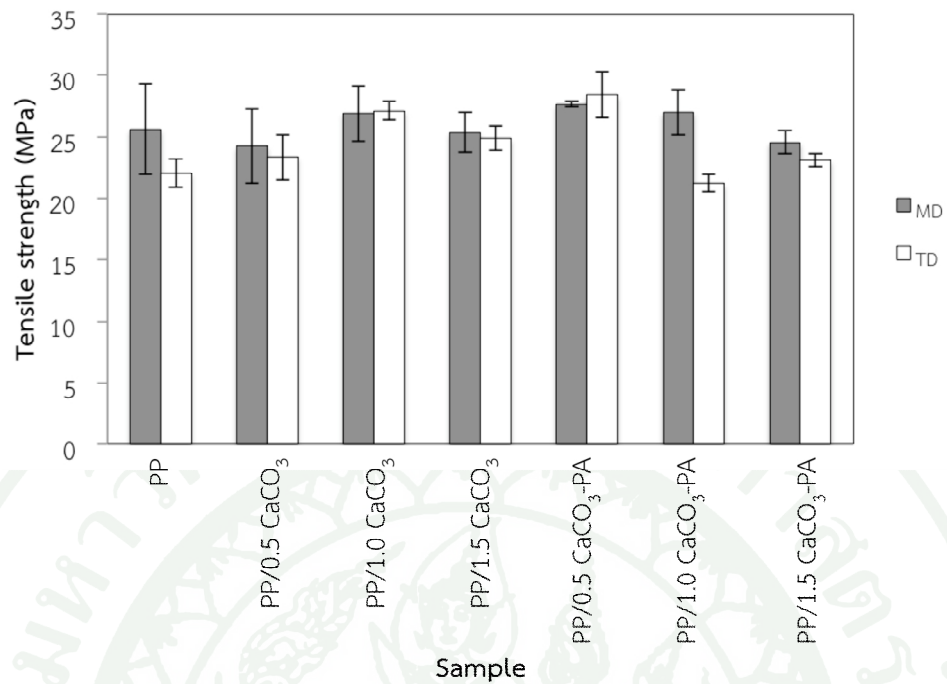
ภาวะควบคุม	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป			
โซน	1	2	3	4
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	170	170	180	180

2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

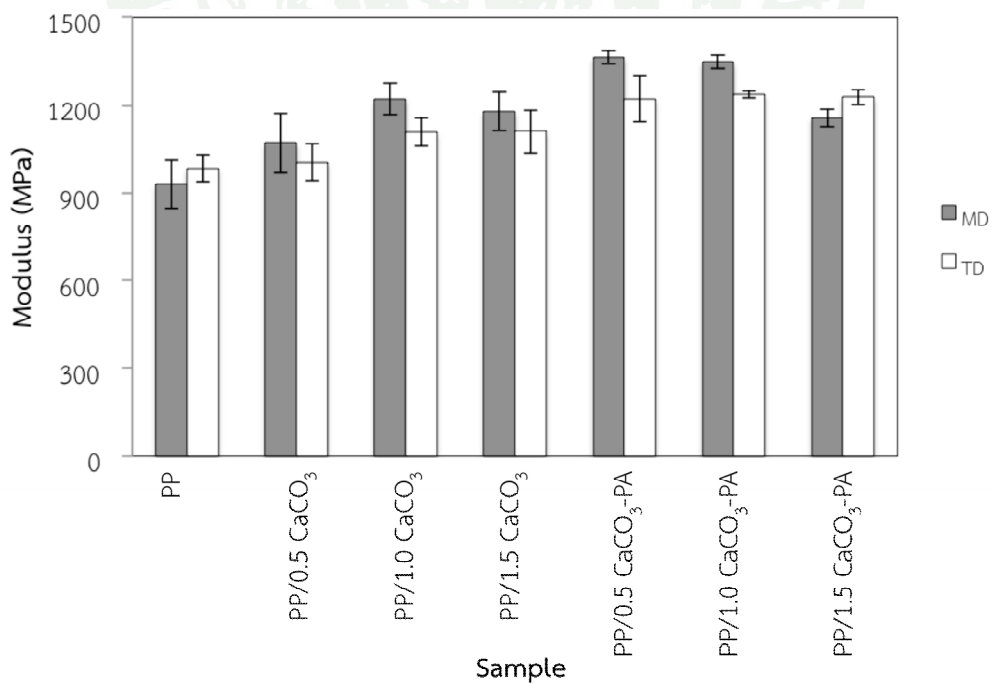
2.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และมอดุลัส แสดงดังภาพที่ 14 และ 15 ตามลำดับ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องจากผลของการคงรูป (stiffening effect) ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (เฟสกระจาย) ที่อยู่ภายในเมทริกซ์ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำหน้าที่รับแรงดึงที่มากระทำและส่งผ่านแรงไปยังส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของฟิล์ม จึงทำให้ฟิล์มมีความต้านทานต่อแรงดึงและมอดุลัสที่ดีขึ้น (Supaphol *et al.*, 2004) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไป (1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน) จะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสที่ลดลง (Eiras and Pessan, 2009) เมื่ออนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตถูกดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก พบว่ามีแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ดัดแปร เนื่องจากการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติกช่วยปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น หรือแสดงความเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ากันได้ดีกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมากขึ้น (Lam *et al.*, 2009; Deshmukh *et al.*, 2010) อีกทั้งการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตยังช่วยให้มีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของฟิล์ม เมื่อมีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรเพิ่มขึ้น พบว่าแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเป็นปริมาณที่มากเกินไปของการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

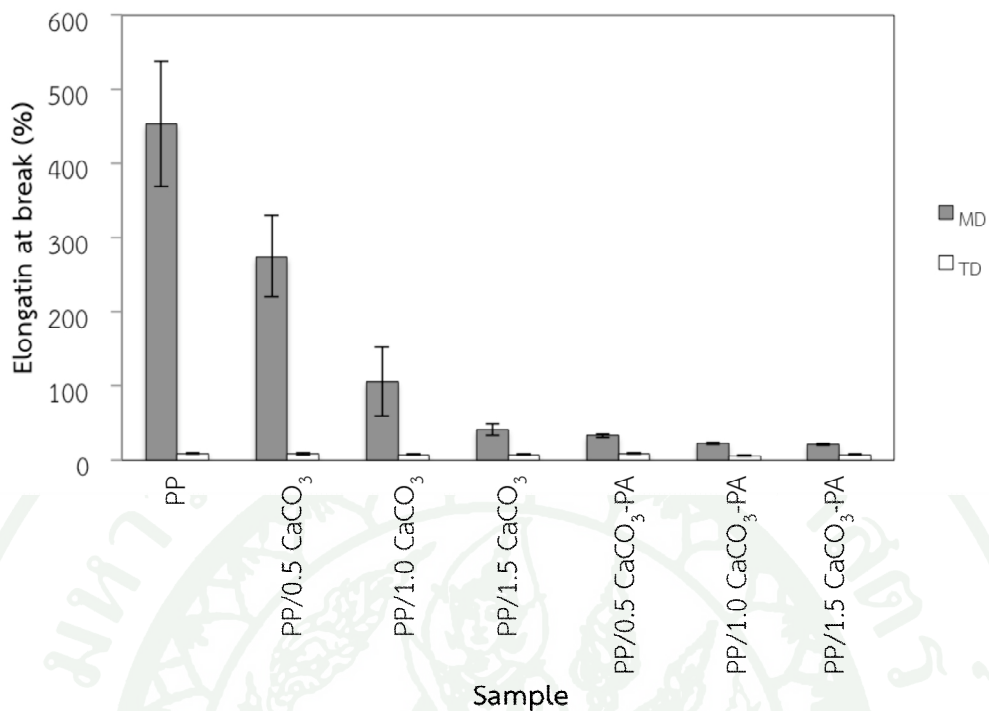
ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุด แสดงดังภาพที่ 16 พบว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน เนื่องจากการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มมีการดึงยืดที่ลดน้อยลง



ภาพที่ 14 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก



ภาพที่ 15 ค่ามอดุลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก

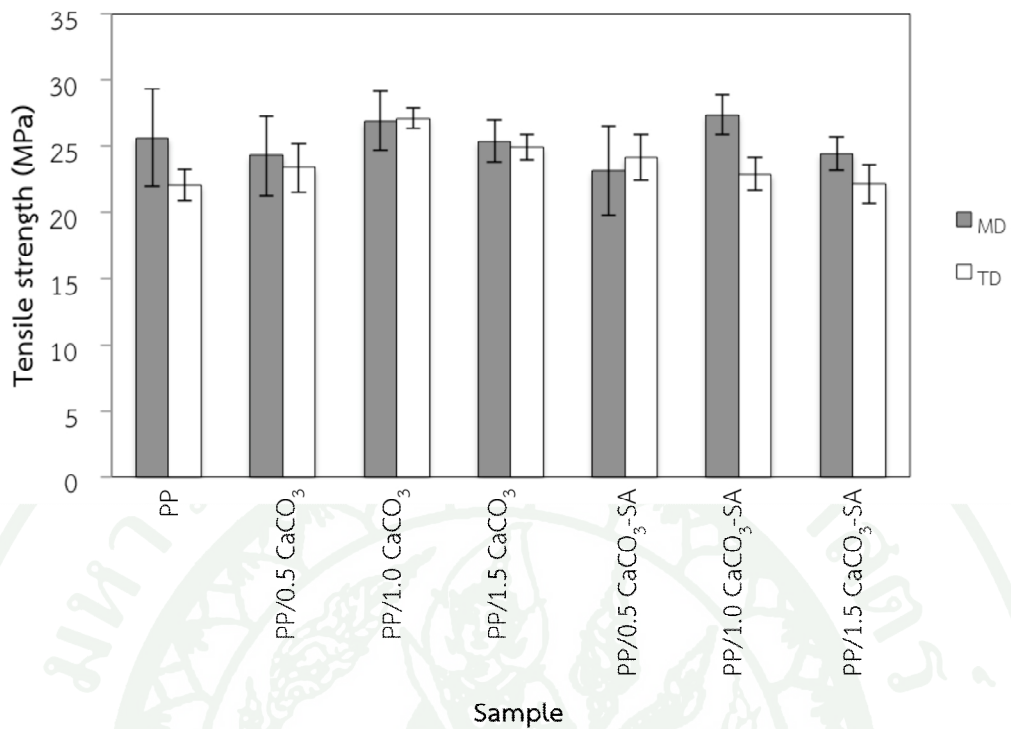


ภาพที่ 16 ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

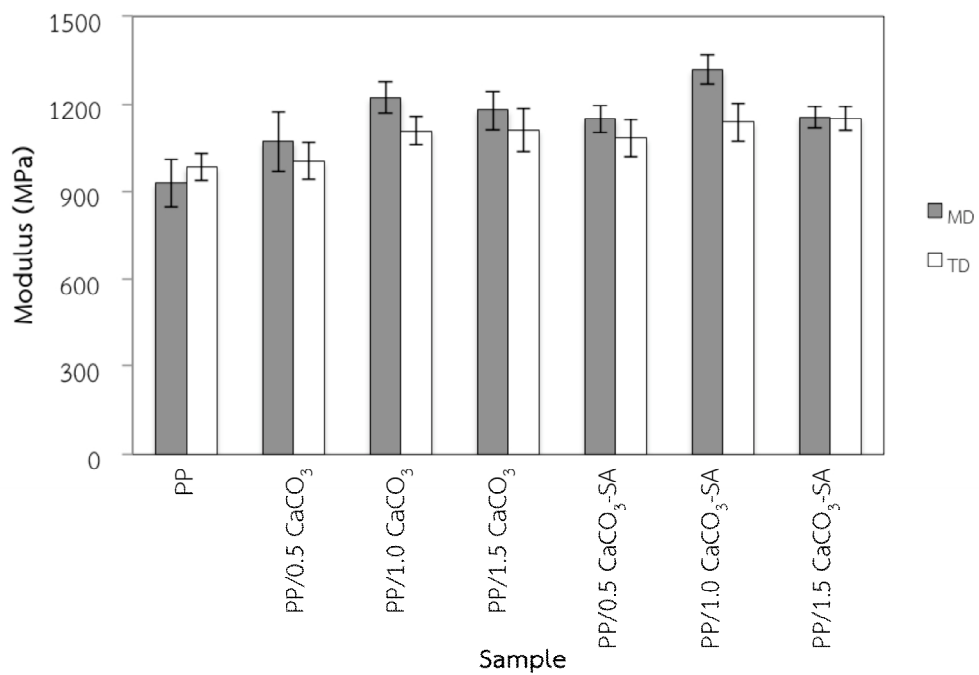
นอกจากนี้พบว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก มีความต้านทานต่อแรงดึง มอดุลัส และความสามารในการยืดตัวสูงสุดในทิศทางเครื่องจักร (machine direction, MD) สูงกว่าทิศทางขวางเครื่องจักร (transverse direction, TD) ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจากการได้รับแรงดึงในการม้วนเก็บฟิล์มมากกว่าลมที่เป่าให้ฟิล์มพองตัว (bubble) (อุไร และ อิทธิพล, 2555) โดยโครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ซึ่งส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์จะเกิดการพันตัวกันหรือที่เรียกว่า ลามেলা ในทิศทางขวางเครื่องจักร และจัดเรียงตัวซ้อนกันในทิศทางเครื่องจักร ส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์จะทำหน้าที่ในการเชื่อมกันของแต่ละลามেলাหรือที่เรียกว่า สายโซ่ประสาน (tie-chain) (อรรถพล, 2551; Zhang *et al.*, 2004) ดังนั้นเมื่อมีแรงมากกระทำในทิศทางเครื่องจักรทำให้ต้องใช้แรงที่สูงในการทำลายชั้นของลามেলাที่จัดเรียงตัวซ้อนกัน และเนื่องจากไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกที่สูง ทำให้มีการจัดเรียงตัวซ้อนกันของลามেলাที่มากกว่าส่วนของสายโซ่ประสานที่เป็นส่วนของอสัณฐาน จึงส่งผลให้การยืดตัวในส่วนของชั้นลามেলাสามารถยืดตัวได้สูงกว่าส่วนของสายโซ่ประสาน

2.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัส และร้อยละในการยืดตัวสูงสุด แสดงดังภาพที่ 17 18 และ 19 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ดัดแปร เนื่องจากการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก ช่วยปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นเช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก ส่งผลให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเข้ากันได้ดีกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมากขึ้น จึงมีความต้านทานต่อแรงดึง และมอดูลัสที่เพิ่มขึ้น (Lam *et al.*, 2009; Deshmukh *et al.*, 2010) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร พบว่าแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน แสดงว่าเป็นปริมาณที่มากเกินไปของการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

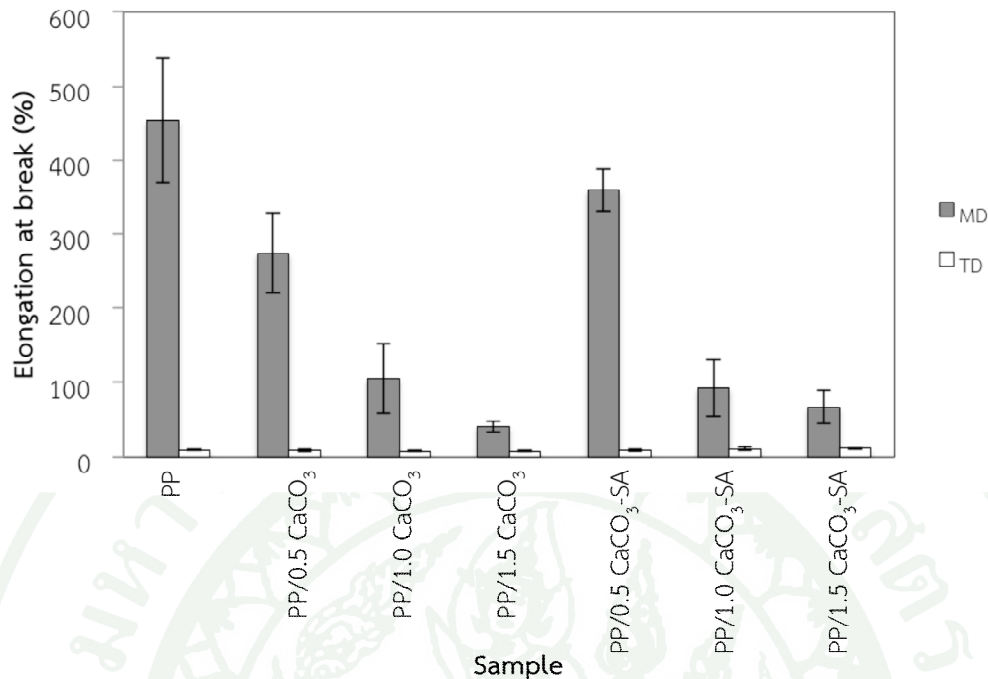
ร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน เนื่องจากการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มมีการดึงยืดที่ลดน้อยลง โดยความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีค่ามากกว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก เนื่องมาจากกรดสเตียริก (18C) มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่ากรดปาล์มิติก (16C) (Rustan and Drevon, 2005) เป็นสาเหตุให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นที่มากกว่า นอกจากนี้พบว่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัส และร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกในทิศทางเครื่องจักรสูงกว่าทิศทางขวางเครื่องจักรเช่นเดียวกับฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก



ภาพที่ 17 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสแตียริก



ภาพที่ 18 ค่ามอดุลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสแตียริก



ภาพที่ 19 ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

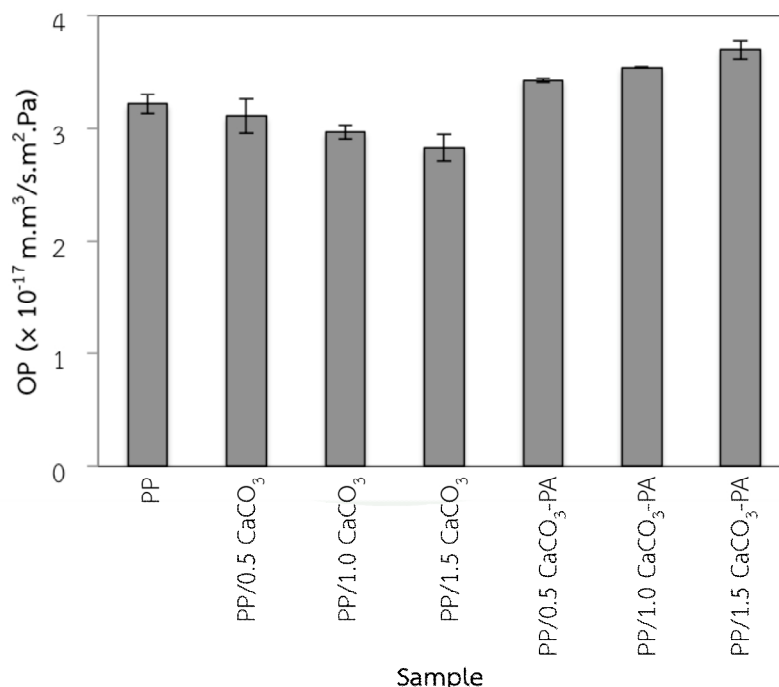
2.4 สมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

การวิเคราะห์สมบัติการสกัดกั้นทั้งการสกัดกั้นแก๊สออกซิเจนและการสกัดกั้นไอน้ำของฟิล์ม จะรายงานผลเป็นค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำตามลำดับ ซึ่งจะมีการนำความหนาของฟิล์ม และค่าความแตกต่างของความดันมาเกี่ยวข้องด้วย

2.4.1 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก แสดงดังภาพที่ 20 โดยสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สผ่านวัสดุพอลิเมอร์ (polymeric materials) เกี่ยวข้องกับอัตราการดูดซับ (adsorption rate) ของโมเลกุลแก๊สภายในเมทริกซ์ที่เป็นอสัณฐาน และอัตราการแพร่ (diffusion rate) ของโมเลกุลแก๊สที่แพร่ผ่านเมทริกซ์ โดยอัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอัตราของปริมาณช่องที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ไปได้ (free volume holes) ในพอลิเมอร์ ซึ่งการเคลื่อนที่จะเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random) หรือการเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motions) ของสายโซ่พอลิเมอร์ สำหรับอัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ข้ามโมเลกุลแก๊สไปยังช่องว่างที่อยู่ใกล้เคียง (neighboring holes) ดังนั้นสภาพให้ซึมผ่านได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับขนาดของปริมาณช่องที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ไปได้ (free volume hole sizes) ระดับการเคลื่อนที่ของ

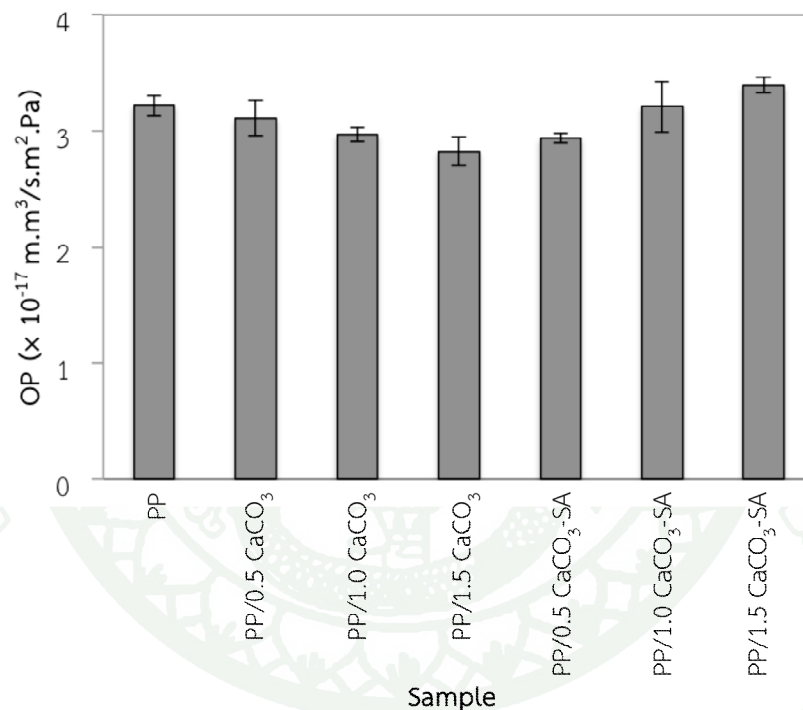
พอลิเมอร์ (degree of polymer motion) ความเฉพาะเจาะจงของพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ (specific polymer-polymer) และความเฉพาะเจาะจงของพอลิเมอร์กับอันตรกิริยาของแก๊ส (specific polymer gas interaction) ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นปัจจัยภายในที่มาจากเคมีพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกที่มาจากอุณหภูมิและความดันอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยโดยตรงที่มีผลต่อการแพร่ของแก๊สคือความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มที่มีความหนาน้อยจะมีการแพร่ของแก๊สได้ง่ายกว่าฟิล์มที่มีความหนาที่มากกว่า (Duncan, 2011)

จากการทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนพบว่า แนวโน้มสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนมีแนวโน้มที่ลดน้อยลงเมื่อมีปริมาณของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น เนื่องจากการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยปรับปรุงสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊ส โดยจะไปเพิ่มการเดินทางผ่านของแก๊ส (tortuous path) (Avella *et al.*, 2013) นอกจากนี้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นฟิลเลอร์อินทรีย์ที่แก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้ (impermeable inorganic filler) (Móczó and Pukánszky, 2008) ส่งผลให้โมเลกุลของแก๊สใช้เวลาในการเดินทางผ่านฟิล์มมากขึ้น สำหรับการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดัดแปรปริมาณมากขึ้นลงในฟิล์ม ทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติการสกัดกั้นที่ลดลง (Tomé *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013)



ภาพที่ 20 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

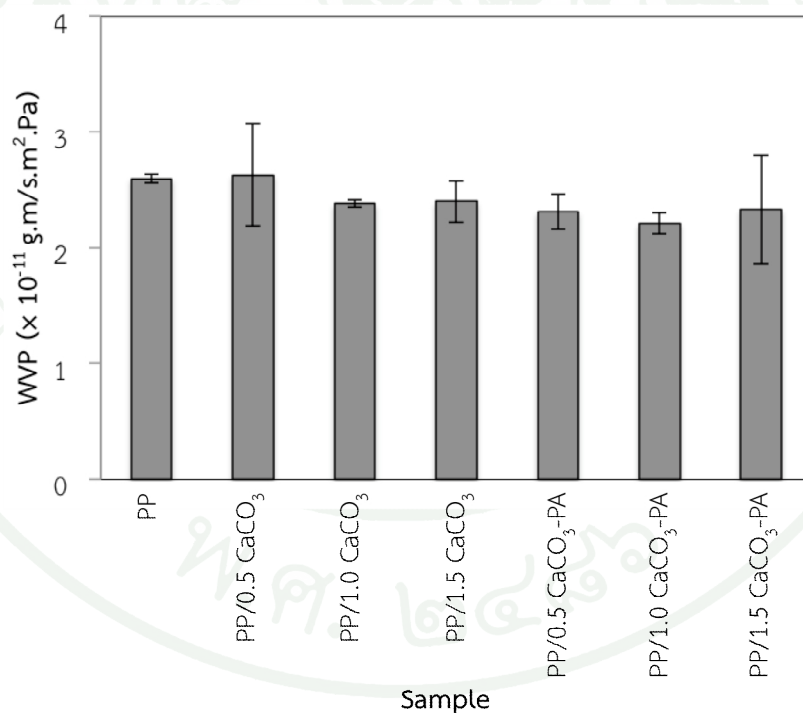
2.4.2 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แสดงดังภาพที่ 21 พบว่าการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติการสกัดกั้นที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ดัดแปร และเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรเพิ่มขึ้น ทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก เนื่องจากการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน (ทั้งกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก) ทำให้พื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สที่เพิ่มขึ้น (Tomé *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013)



ภาพที่ 21 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

2.4.3 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก แสดงดังภาพที่ 22 พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรมีผลทำให้แนวโน้มของค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำถูกขัดขวางด้วยอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ทำให้การแพร่ผ่านของโมเลกุลน้ำผ่านฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีความคงค้ำย

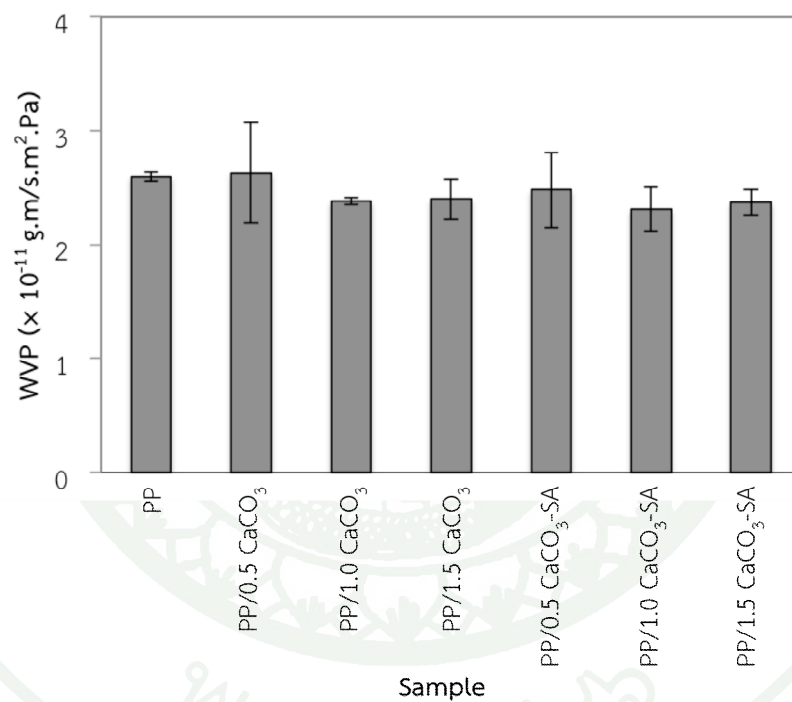
(tortuosity) ซึ่งจะช่วยให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ส่งผลให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลง (Nobrega *et al.*, 2012) นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำน้อยกว่าฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงว่าการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสาเหตุให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลง เนื่องจากสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ของกรดพาล์มิติกที่เกาะติดบนพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (Tomé *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013) ส่วนการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ส่งผลให้แนวโน้มของสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลงและเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซินของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร แสดงว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรอาจเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลต่อการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดช่องว่างที่โมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านไปได้มากขึ้น สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 22 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดพาล์มิติก

2.4.4 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แสดงดังภาพที่ 23 พบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนไม่มีความ

แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ดัดแปร และเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน เช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก แต่การดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมากกว่าการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก อาจเนื่องมาจากกรดสเตียริกมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่ากรดปาล์มิติก จึงทำให้ฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีความยืดหยุ่นมากกว่า เป็นสาเหตุให้โมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านได้มากกว่า (Rustan and Drevon, 2005; Tom *et al.*, 2011)



ภาพที่ 23 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

2.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

2.5.1 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก แสดงดังตารางที่ 8 โดยอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) เป็นอุณหภูมิที่

พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์ อุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการก่อผลึกของพอลิเมอร์ เมื่ออุณหภูมิลดลง และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอม (ΔH_m) จะสัมพันธ์กับปริมาณของผลึก (Zhang *et al.*, 2008) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ มีสาเหตุมาจากการเกิดผลึกนิวเคลียส (nucleation effect) และการดูดซับ (adsorption effect) พลังงานความร้อน โดยทั่วไปจะมีการเติมสารก่อผลึกในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มการเกิดผลึกนิวเคลียส ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานของสารก่อผลึกถูกกำหนดโดยปัจจัย 3 อย่าง คือ พลังงานพื้นผิวของฟิลเลอร์ (surface activity of filler) โครงสร้างของฟิลเลอร์ (topology of filler) และการดัดแปรพื้นผิวของฟิลเลอร์ (surface modification) (Ren *et al.*, 2001)

จากการทดสอบพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่เติมลงไป จะช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของสายโซ่ที่ลดลง ทำให้สายโซ่ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีความยืดหยุ่น (flexibility of chain) ลดลง (Aso *et al.*, 2007; Buasri *et al.*, 2012) แสดงดังภาพที่ 16 ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ยากขึ้น

ค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตฟิล์มมีอัตราเร็วในการเย็นตัว (undercooling) สูงขึ้น ทำให้เกิดสเฟียรูไลท์ขนาดเล็กลง (Pogodina and Winter, 1998; Luyt *et al.*, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะสัมพันธ์ทางวิทยาศาสตร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าขนาดสเฟียรูไลท์ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีขนาดที่เล็กลงและมีจำนวนมากขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร โดยปกติแล้วฟิลเลอร์อนินทรีย์ (mineral filler) จะแสดงพฤติกรรมเป็นสารก่อผลึกในกระบวนการแข็งตัว (solidification process) ของวัสดุจะช่วยลดขนาดของสเฟียรูไลท์ ส่งผลให้ความเป็นผลึกของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น (Aso *et al.*, 2007)

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวของคอมพอสิตฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน การลดลงของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวอธิบายได้ว่าไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบางส่วนถูกแทนที่ด้วยอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหรืออนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของขอบเขตที่เป็นผลึก (crystal domain) และโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน

(amorphous structure) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่อยู่ภายในเมทริกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเป็นสาเหตุสำคัญในการลดลงของขอบเขตที่เป็นผลึกหรืออาจกล่าวได้ว่าผลึกมีขนาดเล็กลง ซึ่งการเล็กลงของผลึกนี้ส่งผลให้พลังงานความร้อนสามารถแพร่ผ่านไปยังเมทริกซ์เพื่อหลอมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนได้ง่ายขึ้น (Buasri *et al.*, 2012)

ตารางที่ 8 ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ชิ้นงานทดสอบ	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)
PP	156.16	120.07	101.17
PP/0.5 CaCO ₃	159.87	119.57	86.26
PP/1.0 CaCO ₃	159.11	119.32	77.04
PP/1.5 CaCO ₃	161.42	119.83	79.18
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	160.37	119.62	79.59
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	160.95	119.72	77.42
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	162.94	119.56	88.01

2.5.2 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แสดงดังตารางที่ 9 พบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีแนวโน้มที่เหมือนกับการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก คือการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ทำให้ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มของอุณหภูมิในการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น โดยผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้มีขนาดของสเฟียรูไลท์ที่เล็ก จึงทำให้ฟิล์มมีอัตราเร็วในการเย็นตัวสูง ส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกที่ลดลง นอกจากนี้ขนาดที่เล็กของสเฟียรูไลท์จะช่วยให้ฟิล์มมีความสามารถในการแพร่ผ่านพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้ฟิล์มมีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 9 ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ชิ้นงานทดสอบ	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)
PP	156.16	120.07	101.17
PP/0.5 CaCO ₃	159.87	119.57	86.26
PP/1.0 CaCO ₃	159.11	119.32	77.04
PP/1.5 CaCO ₃	161.42	119.83	79.18
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	159.89	119.11	77.43
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	161.53	119.76	79.32
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	160.44	118.94	80.69

2.5.3 การตรวจสอบค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว ค่า $\tan \delta$ และค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก โดยเทคนิคไดนามิกเมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลซิส เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของวัสดุ จะมีแรงกระทำกับวัสดุพร้อมกับการให้ความถี่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ใช้ในการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว (T_g) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ (Renger *et al.*, 2001) ค่า $\tan \delta$ บอกลถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ (transition) อันเนื่องมาจากเกิดการคลายตัว (relaxation) ของโมเลกุล และค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus) ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสามารถในการสะสมพลังงานของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic) หรือแบบแข็งตึง (Sharma and Nayak, 2009; Han *et al.*, 2010; Benmesli and Riahi, 2014)

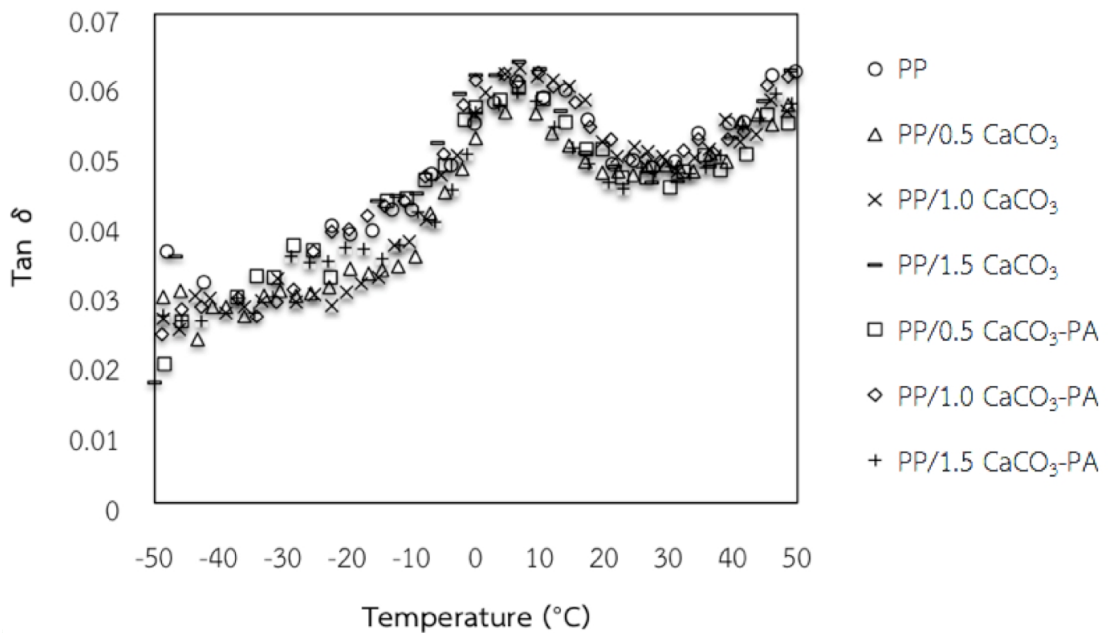
จากการทดสอบพบว่า ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์ม แสดงดังตารางที่ 10 ได้มาจากอุณหภูมิที่มีค่า $\tan \delta$ สูงที่สุด (Jin and Park, 2009) ซึ่งเป็นตำแหน่งของการทรานซิชันแบบเบต้า (β-transition peak) (Dikobe and Luyt, 2009) การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ส่งผลให้แนวโน้มของค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลงเล็กน้อย แสดงว่าการเกิดทรานซิชันแบบเบต้าสามารถเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลต่อการเกิดผลึกแบบเบต้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์พฤติกรรมผลึก แสดงดังภาพที่ 30 จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์ม มีค่า 6.5-6.9 องศาเซลเซียส แสดงว่าฟิล์มสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารแช่เย็น (chilled food packaging) ได้ (ประมาณ 8 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า) (กิตติยา และ โสบุญชัย, 2545; Stringer,

2003) โดยทั่วไปแล้ว การแสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของการเติมอนุภาคในพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ปริมาณของอนุภาค และการกระจายตัวของอนุภาค

ตารางที่ 10 ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์ม ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

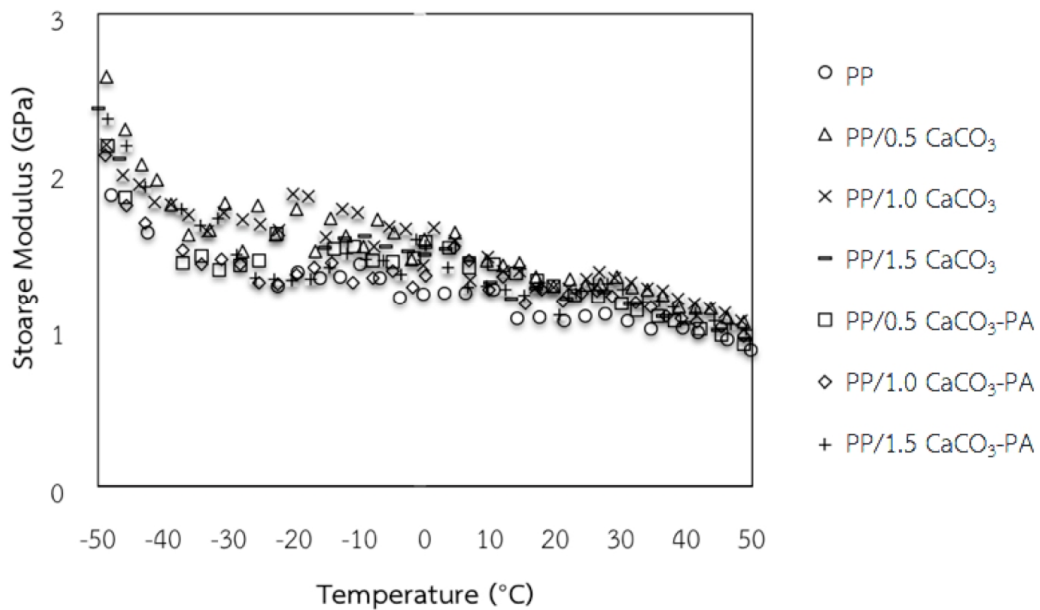
ชิ้นงานทดสอบ	T_g (°C)
PP	6.9 ± 0.07
PP/0.5 CaCO ₃	6.8 ± 0.14
PP/1.0 CaCO ₃	6.6 ± 0.07
PP/1.5 CaCO ₃	6.7 ± 0.21
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	6.6 ± 0.21
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	6.5 ± 0.38
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	6.7 ± 0.21

ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์ม แสดงดังภาพที่ 24 โดยกราฟ $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะแสดงพฤติกรรมการคลายตัวได้ 3 แบบ คือ การคลายตัวแบบแกมมา (γ -relaxation) อุณหภูมิประมาณ -45 องศาเซลเซียส (Luyt *et al.*, 2009) การคลายตัวแบบเบต้า (β -relaxation) อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (López-Manchado and Arroyo, 2000; Jayanarayanan *et al.*, 2008; Ahankari *et al.*, 2011) และการคลายตัวแบบแอลฟา (α -relaxation) อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส (López-Manchado and Arroyo, 2000) สำหรับในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะการคลายตัวแบบเบต้า ซึ่งเป็นตำแหน่งของอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว พบว่าค่า $\tan \delta$ มีใกล้เคียงกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์มมีพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวเกิดการคลายตัวมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่า $\tan \delta$ ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มมากขึ้น สำหรับการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ทำให้การคลายตัวของโมเลกุลเกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีค่า $\tan \delta$ ที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเช่นกันเมื่อมีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Rezaei *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2010)



ภาพที่ 24 ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก

ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอลิฟิล์ม แสดงดังภาพที่ 25 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยกราฟมอดุลัสสะสมจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ช่วงแรกเป็นช่วงที่อุณหภูมิต่ำสุดอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) มีค่ามอดุลัสสะสมสูง ช่วงที่สองเป็นช่วงเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ค่ามอดุลัสสะสมลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงนี้เป็นช่วงที่สายโซ่เริ่มเคลื่อนที่ ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว และช่วงที่สามเป็นช่วงที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วมีค่ามอดุลัสสะสมที่ต่ำ เพราะวัสดุอยู่ในสถานะคล้ายยาง (Benmesli and Riahi, 2014) สำหรับการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรเหนี่ยวนำให้พอลิเมอร์เกิดเฟสที่แข็งตัว (rigid phase) และทำให้ฟิล์มเกิดความแข็งตึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ลดลง (Renger *et al.*, 2001 ; Nowaczyk *et al.*, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

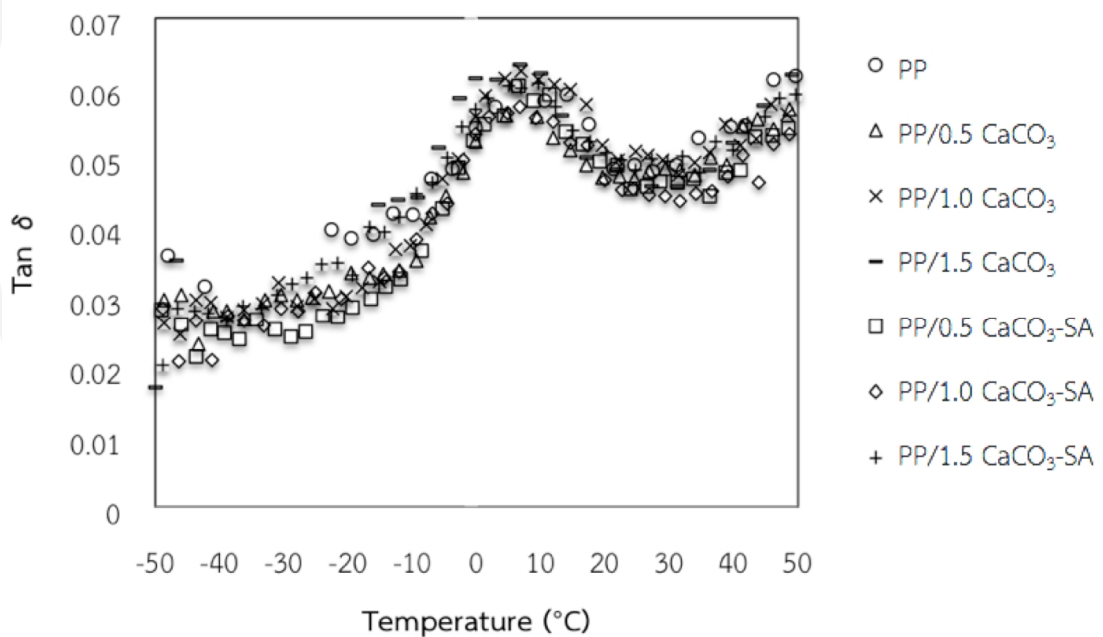


ภาพที่ 25 ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก

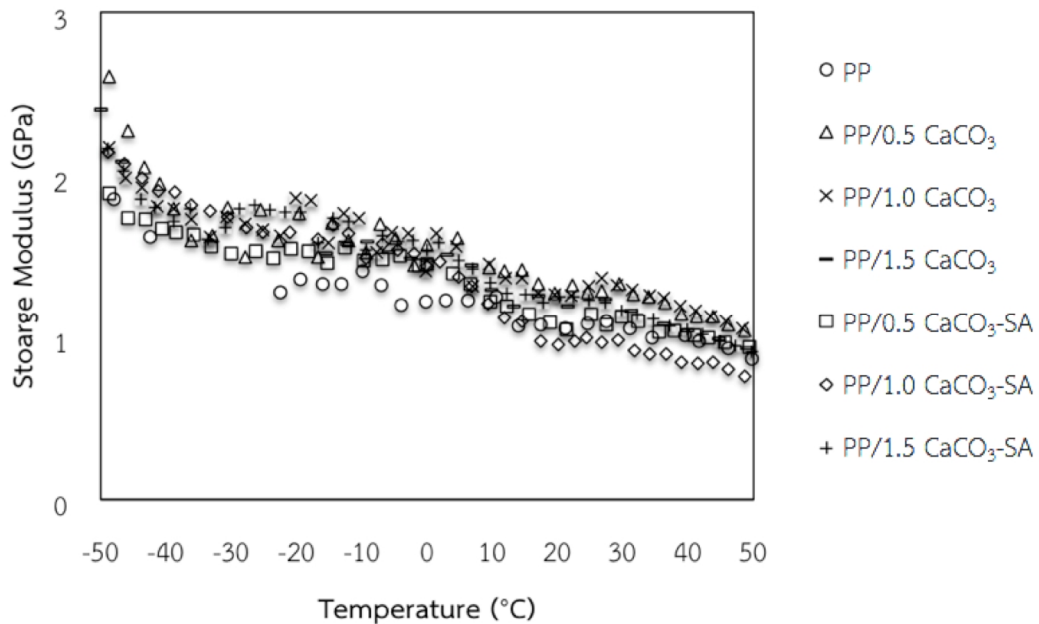
2.5.4 การตรวจสอบค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว ค่า $\tan \delta$ และค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แสดงดังตารางที่ 11 ภาพที่ 26 และภาพที่ 27 ตามลำดับ พบว่าค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและคอมพอสิตฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่า $\tan \delta$ และค่ามอดุลัสสะสม โดยการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนส่งผลให้มี $\tan \delta$ ลดลงเพียงเล็กน้อย และค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยการลดลงของค่า $\tan \delta$ และการเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสสะสม เนื่องมาจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ทำให้ฟิล์มมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะลดการเกิดการคลายตัวของโมเลกุล ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ลดลง (Renger *et al.*, 2001; Nowaczyk *et al.*, 2004; Rezaei *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2010)

ตารางที่ 11 ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์ม ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ชิ้นงานทดสอบ	T_g (°C)
PP	6.9 ± 0.07
PP/0.5 CaCO ₃	6.8 ± 0.14
PP/1.0 CaCO ₃	6.6 ± 0.07
PP/1.5 CaCO ₃	6.7 ± 0.21
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	6.8 ± 0.28
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	6.5 ± 0.42
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	6.6 ± 0.07



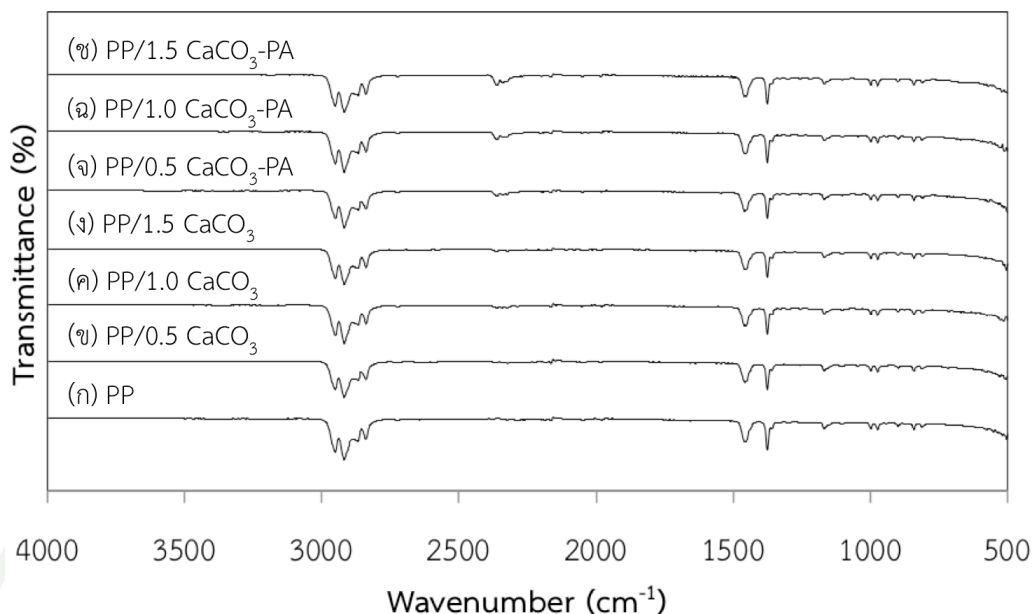
ภาพที่ 26 ค่า tan δ ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก



ภาพที่ 27 ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

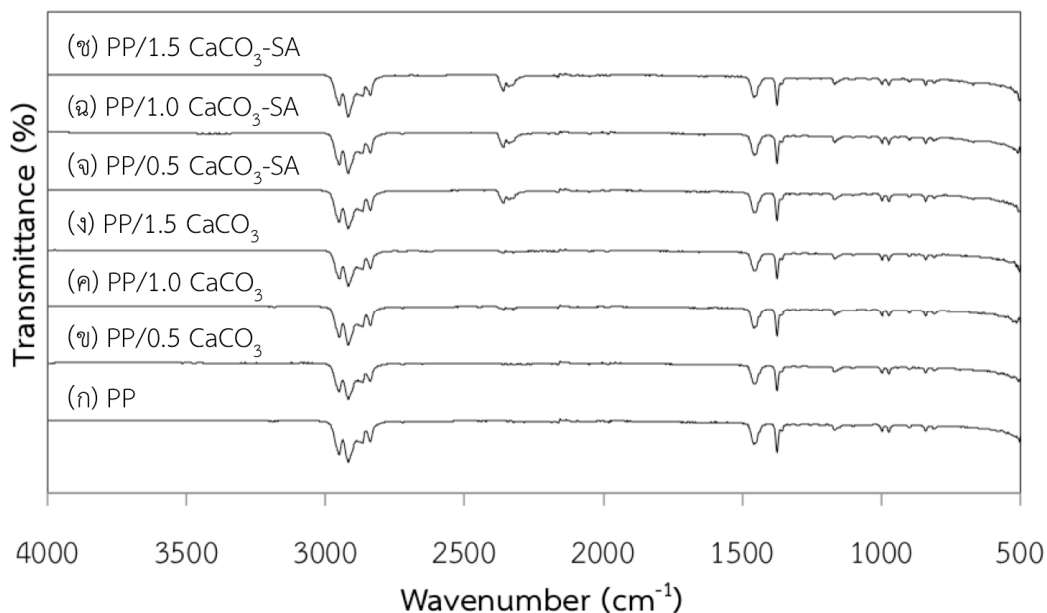
2.6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

2.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก ในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 500 แสดงดังภาพที่ 28 พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2350 cm^{-1} และ 2345 cm^{-1} แสดงถึงการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปรากฏในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกทั้ง 3 ความเข้มข้น คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซินตามลำดับ โดยความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเดียวกับความเข้มข้นของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสามารถถูกดูดซับได้ง่ายด้วยสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) (Fermo *et al.*, 2006; Alkan *et al.*, 2011; El-Bahy, 2013) ซึ่งกรดปาล์มิติกจะทำหน้าที่ปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีความสามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ โดยหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ของกรดปาล์มิติกจะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต โดยสร้างพันธะไอออนิก ส่วนหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) ของกรดปาล์มิติกจะเข้าทำปฏิกิริยากับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนโดยสร้างพันธะโควาเลนต์ ส่งผลให้การยึดเกาะกันได้ดีระหว่างอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน



ภาพที่ 28 FTIR สเปกตรัมของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (จ) PP/0.5 CaCO₃-PA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-PA และ (ช) PP/1.5 CaCO₃-PA

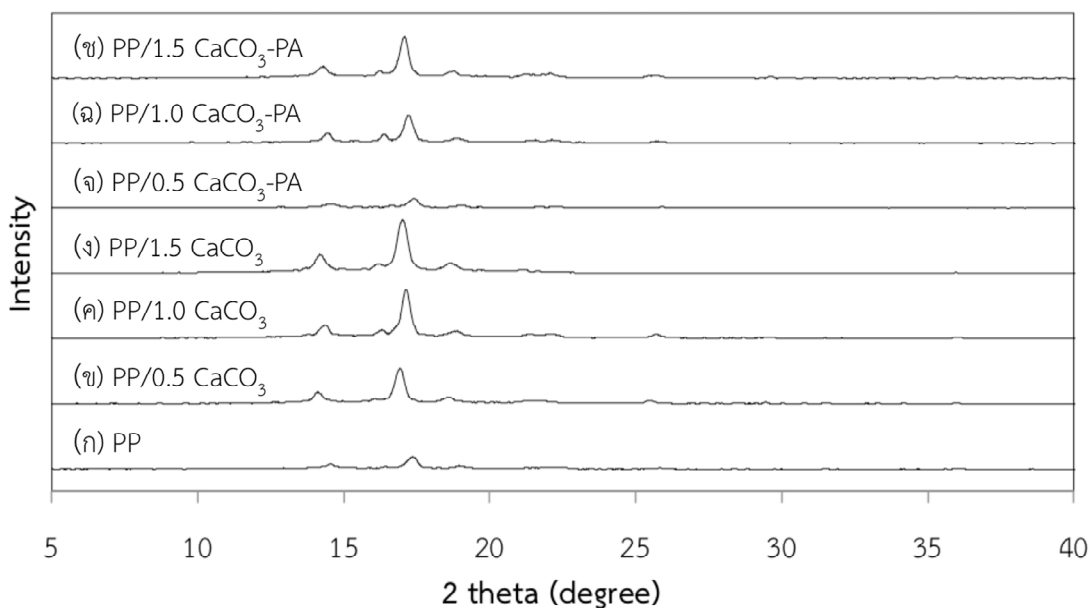
2.6.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 500 แสดงดังภาพที่ 29 พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2360 cm^{-1} และ 2345 cm^{-1} แสดงถึงการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Fermo *et al.*, 2006; Alkan *et al.*, 2011; El-Bahy, 2013) ปรากฏในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกทั้ง 3 ความเข้มข้นคือ 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ตามลำดับ โดยความเข้มของพีคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรเช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก แต่ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีความเข้มของพีคการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกมีสายไฮโดรคาร์บอนมากกว่ากรดปาล์มิติก (Rustan and Drevon, 2005) ซึ่งส่วนนี้ช่วยต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ



ภาพที่ 29 FTIR สเปกตรัมของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (จ) PP/0.5 CaCO₃-SA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-SA และ (ข) PP/1.5 CaCO₃-SA

2.6.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก แสดงดังภาพที่ 30 และตารางที่ 12 การวิเคราะห์ผลึกหรือการวิเคราะห์วัสดุ (polymorphic materials) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่อาศัยการตกกระทบของรังสีเอกซ์บนวัสดุเพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบน (X-ray diffraction pattern) โดยรูปแบบของการเลี้ยวเบนสามารถบ่งชี้ลักษณะเฉพาะและปริมาณเฉพาะหรือเฟสในวัสดุได้ ซึ่งมุมเซต้า (theta degree) จะสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างอะตอมที่เป็นผลึก (crystalline atomic structure) (ปิ่นสุภา, 2545; Yellepeddi and Thomas, 2006)

โดยทั่วไป ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนสามารถเกิดผลึกได้ 4 รูปแบบ คือ รูปผลึกแบบแอลฟา (monoclinic, α -form) รูปผลึกแบบเบต้า (trigonal, β -form) รูปผลึกแบบแกมมา (orthorhombic, γ -form) และรูปผลึกแบบสเมติก (smectic) ซึ่งรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบการกระเจิงหรือเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน จะประกอบด้วยรูปผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่เสถียรและอาจมีรูปผลึกแบบเบต้าบ้างเล็กน้อย ซึ่งการเกิดรูปผลึกแบบแอลฟาและรูปผลึกแบบเบต้าเกิดขึ้นได้ จากการใช้สารก่อผลึกกับพอลิโพรพิลีน ขณะที่รูปผลึกแบบแกมมาและรูปผลึกแบบสเมติกจะเกิดจากการลดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมอย่างรวดเร็ว (อรอุษา, 2546; Yang *et al.*, 2012)



ภาพที่ 30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (จ) PP/0.5 CaCO₃-PA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-PA และ (ข) PP/1.5 CaCO₃-PA

ซึ่งตำแหน่งที่แสดงถึงรูปผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนอยู่บนระนาบ (110) (040) และ (130) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 2 เซต่า เท่ากับ 14.3° 16.8° และ 18.4° ตามลำดับ (Romankiewicz *et al.*, 2004; Harváth *et al.*, 2010; Ding *et al.*, 2012) ส่วนตำแหน่งที่แสดงถึงรูปผลึกแบบเบต้าของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนอยู่บนระนาบ (300) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 2 เซต่า เท่ากับ 16.0° (Labour *et al.*, 2002; Romankiewicz *et al.*, 2004; Harváth *et al.*, 2010) จากการทดสอบพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่ความเข้มข้น 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนทำให้มีรูปผลึกแบบเบต้าเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 12 ซึ่งส่งผลต่อการมีความทนแรงกระแทก ความเหนียว และอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยความเป็นผลึกเบต้าของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจากการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรมีมากกว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ดัดแปร แสดงให้เห็นถึงการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติกเป็นสารเหนียวนำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบเบต้า (Labour, 2002)

ในการวิเคราะห์ค่าร้อยละความเป็นผลึกพบว่า ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรมีค่ามากกว่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติก

พอลิโพรพิลีน เนื่องจากการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของร้อยละความเป็นผลึก โดยผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่เกิดจากรอยต่อระหว่างพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร (Shentu *et al.*, 2006) แต่อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มของร้อยละความเป็นผลึกลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากขึ้นเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะไปลดจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึก (crystallization sites) (Lv *et al.*, 2013) สำหรับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มของร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนมีค่าร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

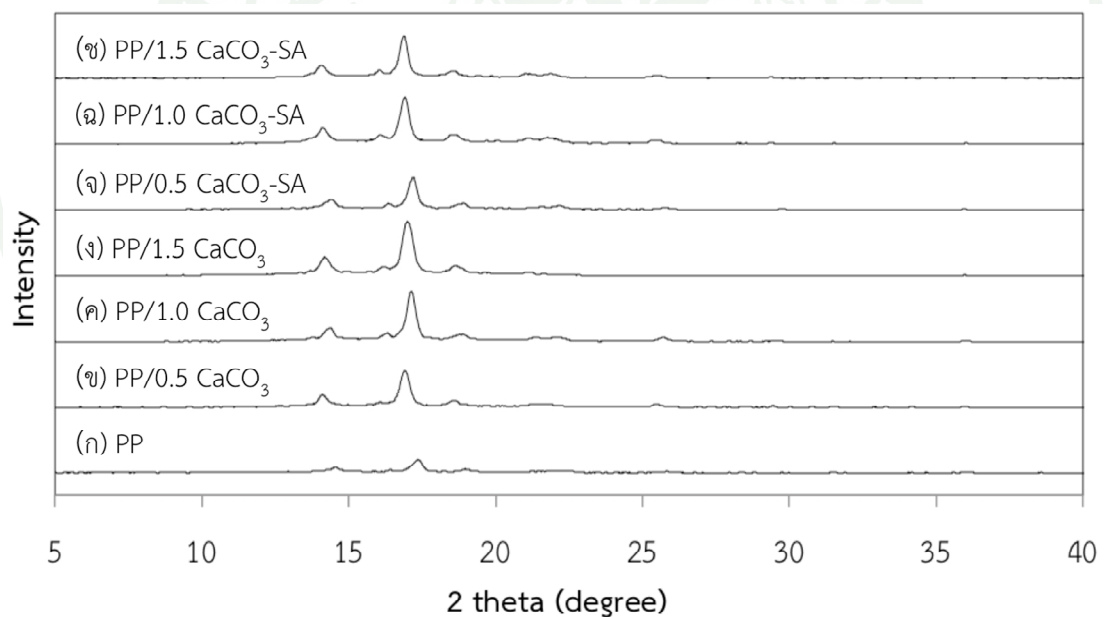
ตารางที่ 12 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก

ชิ้นงานทดสอบ	β -Crystallinity (%)	Crystallinity (%)
PP	1.55	53.61
PP/0.5 CaCO ₃	1.56	60.25
PP/1.0 CaCO ₃	2.60	57.33
PP/1.5 CaCO ₃	2.36	55.05
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	1.60	60.12
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	4.87	60.51
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	2.41	65.42

2.6.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แสดงดังภาพที่ 31 และตารางที่ 13 พบว่า ตำแหน่งที่แสดงถึงรูปผลึกแบบแอลฟาของไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนอยู่บนระนาบ (110) (040) และ (130) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต่า เท่ากับ 14.3° 16.8° และ 18.4° ตามลำดับ (Romankiewicz *et al.*, 2004; Harváth *et al.*, 2010; Ding *et al.*, 2012) ส่วนตำแหน่งที่แสดงถึงรูปผลึกแบบเบต้าของไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนอยู่บนระนาบ (300) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต่า เท่ากับ 16.0° (Labour *et al.*, 2002; Romankiewicz *et al.*, 2004; Harváth *et al.*, 2010) จากการทดสอบพบว่า การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ลงในฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้มีรูปผลึกแบบเบต้าเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 13 โดยฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรมีพีคของ

ตำแหน่งรูปผลึกเบต้ามากกว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงให้เห็นถึงการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกเป็นสารเหนียวนำไปไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบเบต้า (Labour, 2002) เช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก

ในการวิเคราะห์ค่าร้อยละความเป็นผลึกพบว่า ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรมีค่ามากกว่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โดยการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกทำให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก แต่มีค่าร้อยละความเป็นผลึกที่น้อยกว่า (Rustan and Drevon, 2005) อาจเนื่องมาจากกรดสเตียริกมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มากกว่า ทำให้มีจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึกที่น้อยกว่าส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกที่มากกว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก (Borisov, 2001)

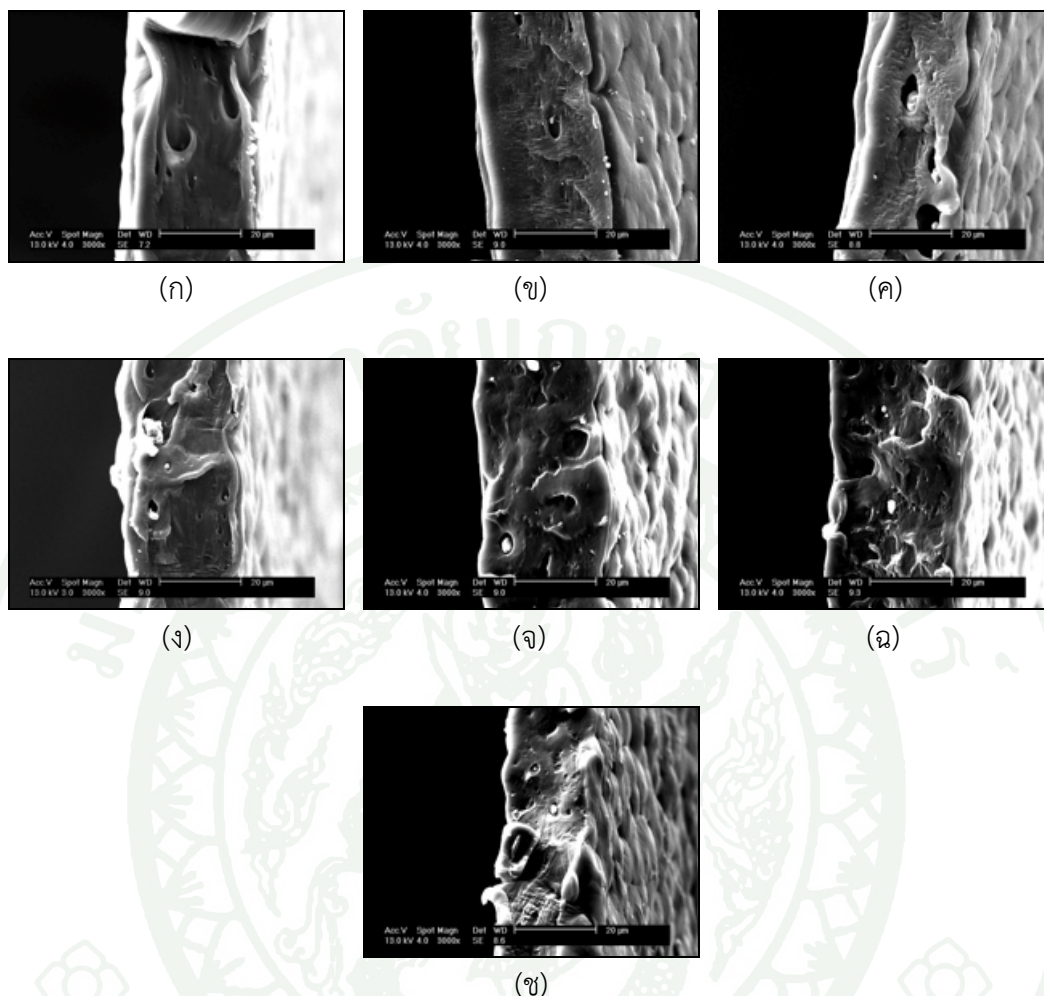


ภาพที่ 31 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (จ) PP/0.5 CaCO₃-SA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-SA และ (ข) PP/1.5 CaCO₃-SA

ตารางที่ 13 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ชิ้นงานทดสอบ	β -Crystallinity (%)	Crystallinity (%)
PP	1.55	53.61
PP/0.5 CaCO ₃	1.56	60.25
PP/1.0 CaCO ₃	2.60	57.33
PP/1.5 CaCO ₃	2.36	55.05
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	2.81	51.15
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	3.22	57.57
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	2.52	60.59

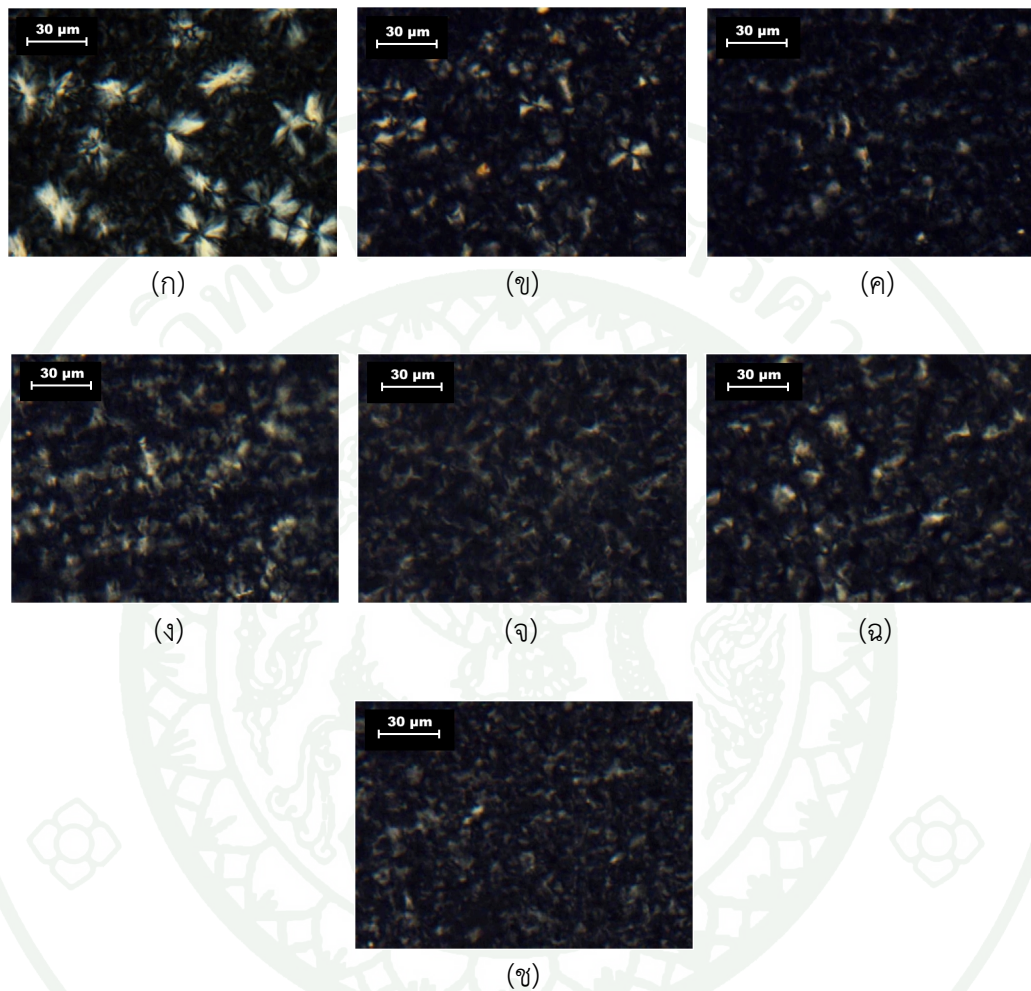
2.6.5 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 32 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุ รวมถึงการกระจายตัวของสารเติมแต่งในเนื้อวัสดุ (ปิ่นสุภา, 2545) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (ภาพที่ 32 (ข)-(ง)) มีความเรียบกว่าพื้นผิวของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร (ภาพที่ 32 (จ)-(ช)) (Supaphol *et al.*, 2004) เนื่องจากการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ากันได้ดีกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมากขึ้น (Phueakbuakhao *et al.*, 2008; Deshmukh *et al.*, 2010) จึงทำให้การเตรียมตัวอย่างแบบภาพตัดขวาง (cross section) หนีออกจากกันได้ยาก สำหรับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน (ภาพที่ 32 (ง)) อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากเป็นปริมาณที่มากเกินไปของการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน



ภาพที่ 32 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (ฉ) PP/0.5 CaCO₃-PA (จ) PP/1.0 CaCO₃-PA และ (ช) PP/1.5 CaCO₃-PA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงดังภาพที่ 33 พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (ภาพที่ 33 (ข)-(ง)) และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร (ภาพที่ 33 (จ)-(ช)) ลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้ขนาดของสเฟียรูไลต์ (spherulites) ในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึก (Lv et al., 2013) ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ (Romankiewicz et al., 2004) เช่น สมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสเฟียรูไลต์ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากสามารถช่วยกระจายแรงไปยังเมทริกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเกาะกลุ่มกันของขนาดสเฟียรูไลต์ที่เล็กลง

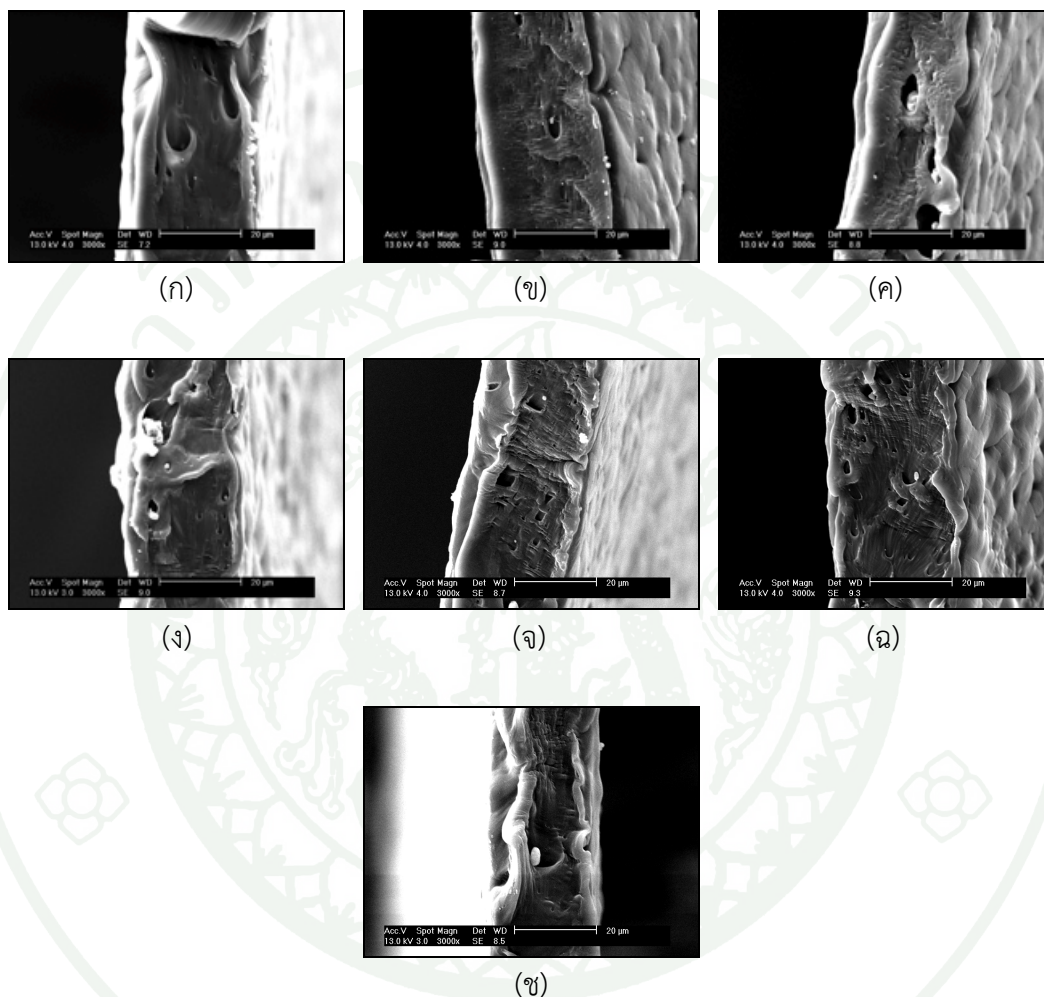
(ภาพที่ 33 (ง), (ฉ) และ (ช)) อันเป็นผลมาจากปริมาณที่มากเกินไปของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลง



ภาพที่ 33 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (ฉ) PP/0.5 CaCO₃-PA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-PA และ (ช) PP/1.5 CaCO₃-PA ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.6.6 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 34 พบว่าพื้นผิวของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (ภาพที่ 34 (ข)-(ง)) มีความเรียบกว่าพื้นผิวของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร (ภาพที่ 34 (ฉ)-(ช)) เช่นเดียวกับการดัดแปรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก เนื่องจากการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกับฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน อันเป็นผลมาจาก

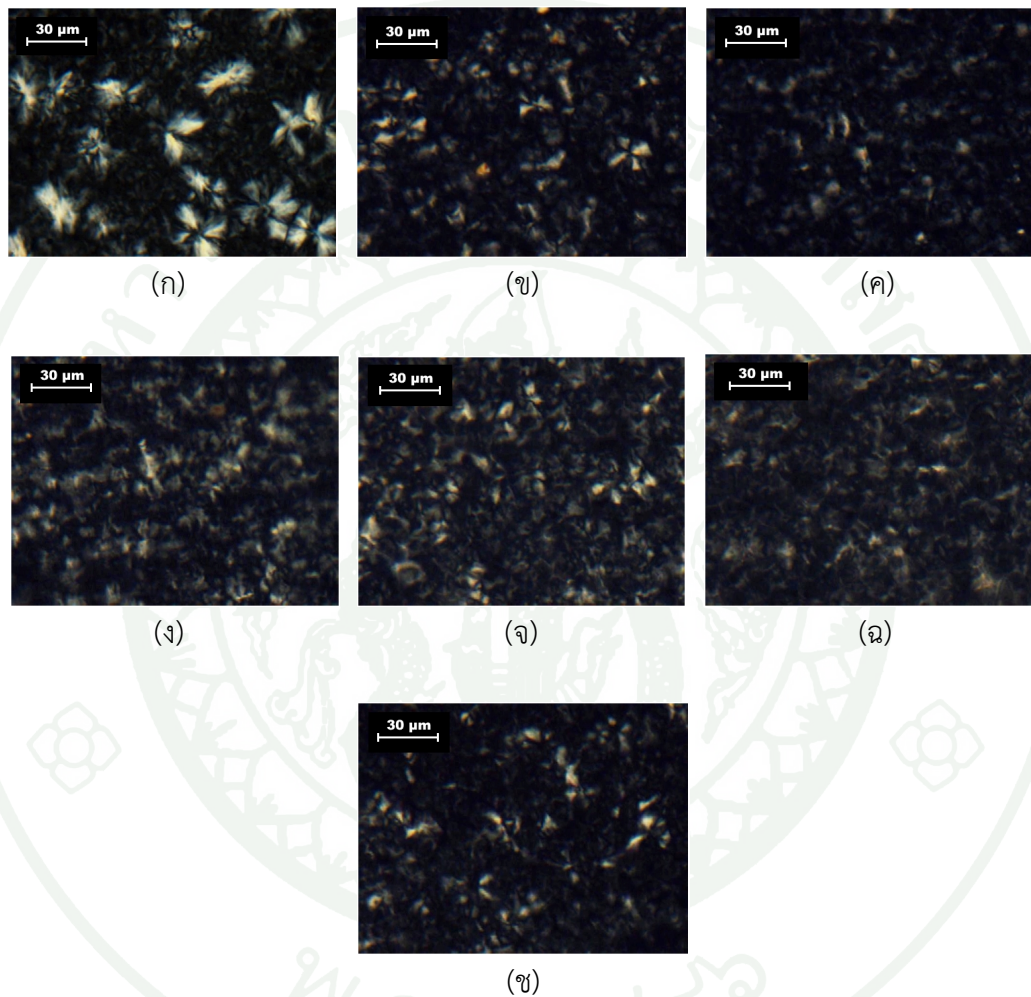
กรดสเตียริกทำหน้าที่ปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีความเข้ากันได้ดีกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิพรอสีนมากขึ้น (Phueakbuakhao *et al.*, 2008; Deshmukh *et al.*, 2010) จึงทำให้การเตรียมตัวอย่างแบบภาพตัดขวางฉีกออกจากกันได้ง่าย



ภาพที่ 34 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (จ) PP/0.5 CaCO₃-SA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-SA และ (ข) PP/1.5 CaCO₃-SA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน (ภาพที่ 34 (จ) และ (ฉ)) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรเช่นเดียวกับฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรที่ความเข้มข้น 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน (ภาพที่ 34 (ข)) อันเนื่องมาจากการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต และปริมาณการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรส่งผลต่อการกระจายตัวในเมทริกซ์ของฟิล์ม กล่าวคือการดัดแปรพื้นผิว

จะช่วยให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเข้ากันได้กับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวที่ดีในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณที่มากเกินไปของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาค ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลด้อยลง



ภาพที่ 35 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) PP (ข) PP/0.5 CaCO₃ (ค) PP/1.0 CaCO₃ (ง) PP/1.5 CaCO₃ (จ) PP/0.5 CaCO₃-SA (ฉ) PP/1.0 CaCO₃-SA และ (ช) PP/1.5 CaCO₃-SA ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูปด้วยกรดสเตียริกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงดังภาพที่ 35 พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (ภาพที่ 35 (ข)-(ง)) และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรรูป (ภาพที่ 35 (จ)-(ช)) ลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้ขนาดสเฟียรูไลต์ของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลงและมีจำนวนมากขึ้น เช่นเดียวกับการตัดแปรรูปอนุภาคแคลเซียม

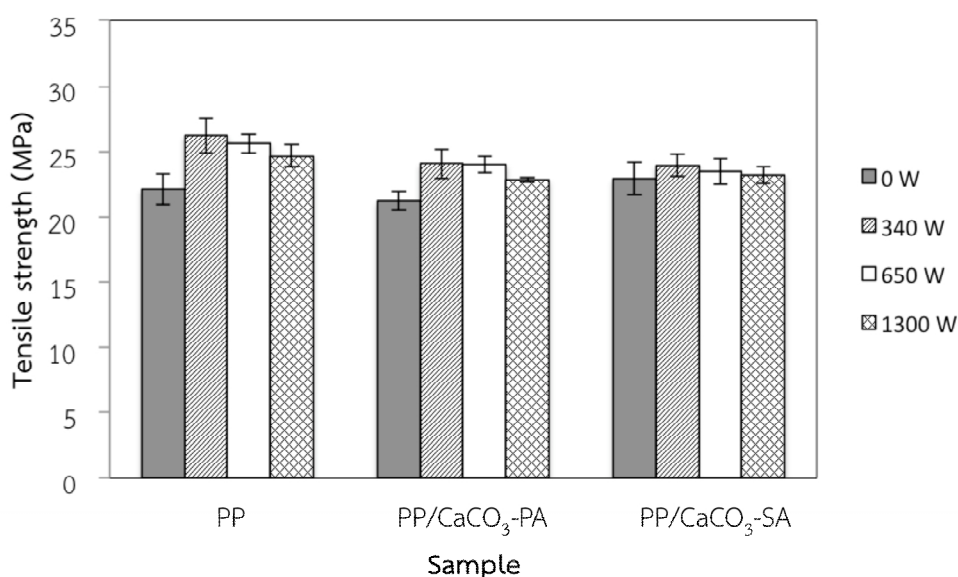
คาร์บอนेटด้วยกรดปาล์มติก เนื่องจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดเริ่มต้นในการก่อผลึก (Lv *et al.*, 2013) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณที่มากเกินไปของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेट (ภาพที่ 35 (ง)) และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปร (ภาพที่ 35 (ข)) จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของสเฟียรูไลท์ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ด้อยลง

ฟิล์มที่มีสมบัติดีที่สุดขอแต่ละกรดไขมันเพื่อนำไปใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ คือ ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรด้วยกรดปาล์มติกที่ความเข้มข้น 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรด้วยกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน

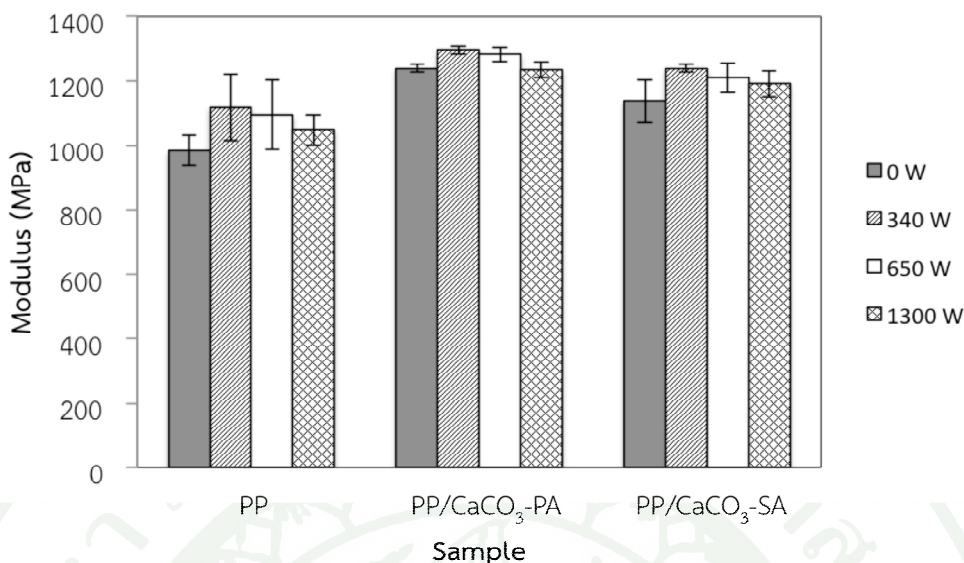
3. การใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรด้วยกรดไขมัน

นำฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรด้วยกรดไขมันเข้าตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 650 และ 1300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

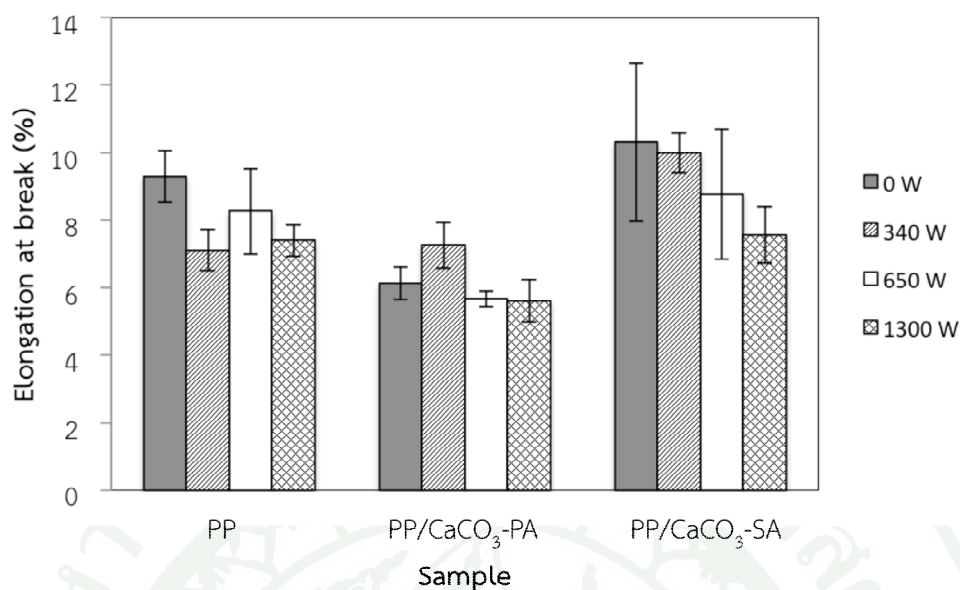


ภาพที่ 36 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอนेटดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ



ภาพที่ 37 ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียม คาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัส แสดงดังภาพที่ 36 และ ภาพที่ 37 ตามลำดับ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสแตียริก มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ แต่อย่างไรก็ตามการลดลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสของฟิล์มยังคงมีค่ามากกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ยังไม่ผ่านการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ อาจเนื่องมาจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟขนาด 340 650 และ 1300 วัตต์ มีผลทำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ทำให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้น สำหรับแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ (650 และ 1300 วัตต์) อาจมีสาเหตุมาจากความร้อนที่ได้รับเริ่มทำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงตัวที่น้อยลง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความร้อนที่มากเกินไปของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟขนาด 340 วัตต์



ภาพที่ 38 ค่าความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

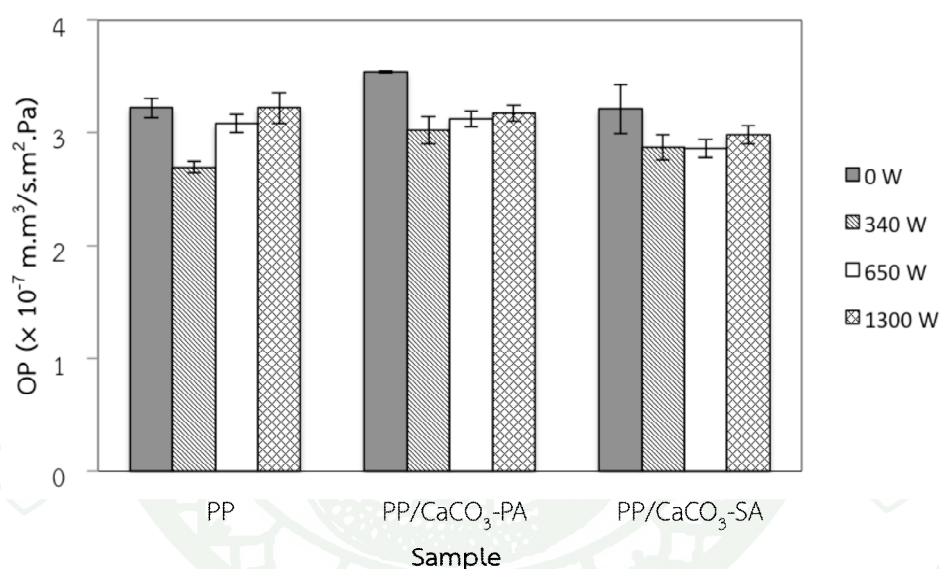
ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุด แสดงดังภาพที่ 38 พบว่า ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แนวโน้มของค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ อาจเนื่องมาจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟขนาด 340 650 และ 1300 วัตต์ มีผลทำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ทำให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความสามารถในการยืดตัวสูงสุดที่ลดลง

3.2 สมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

การวิเคราะห์สมบัติการสกัดกั้นทั้งการสกัดกั้นแก๊สออกซิเจนและการสกัดกั้นไอน้ำของฟิล์ม จะรายงานผลเป็นค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำตามลำดับ ซึ่งจะมีการนำความหนาของฟิล์ม และค่าความแตกต่างของความดันมาเกี่ยวข้องด้วย

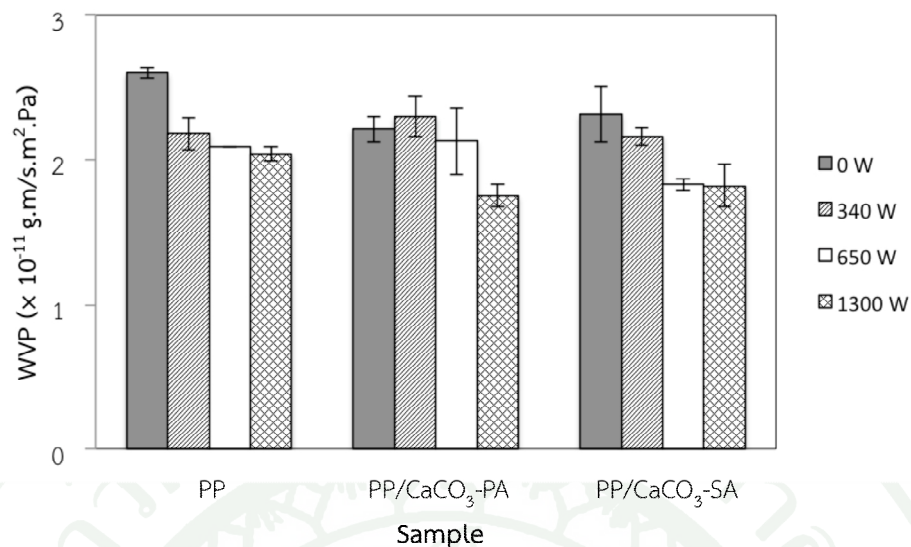
3.2.1 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 39 พบว่าฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของ แก๊สออกซิเจนของฟิล์มยังคงมีค่าน้อยกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ยังไม่ผ่านการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ โดยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนที่ลดลงภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ อาจเนื่องมาจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟขนาด 340 650 และ 1300 วัตต์ มีผลทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ทำให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนที่ลดลง สำหรับ แนวนอนของค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนที่มีแนวนอนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ (650 และ 1300 วัตต์) อาจมีสาเหตุมาจากความร้อนที่ได้รับเริ่มทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงตัวที่น้อยลง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความร้อนที่มากเกินไปของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟขนาด 340 วัตต์



ภาพที่ 39 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3.2.2 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 40 พบว่าฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ อาจเนื่องมาจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟขนาด 340 650 และ 1300 วัตต์ มีผลทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ทำให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำที่ลดลง



ภาพที่ 40 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3.3.1 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังตารางที่ 14 จากการทดสอบพบว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟทำให้ไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ฟิล์มจึงมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ลดลง (Buasri *et al.*, 2012) เป็นสาเหตุให้ไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ยากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการหลอมเหลวภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยสำหรับฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก แสดงว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ทำให้ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น

ค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกพบว่า ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟของฟิล์ม ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ทำให้ค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกลดลงเล็กน้อย แสดงว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด มีอัตราเร็วในการเย็นตัวที่สูงขึ้น ทำให้เกิดสเฟียรูไลท์ขนาดเล็กลง (Pogodina and Winter, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า ขนาดสเฟียรูไลท์ของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ ไมโครเวฟมีขนาดที่เล็กลงและมีจำนวนมากขึ้น

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟพบว่า มีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ เนื่องจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง (Somashekarappa *et al.*, 2013) โดยจะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึก ซึ่งมีหน้าที่คล้ายกับเป็นสารก่อผลึกให้กับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Roy *et al.*, 2007) ทำให้สเฟียรูไลท์มีขนาดที่เล็กลง แสดงดังตารางที่ 27 ซึ่งการเล็กลงของสเฟียรูไลท์ส่งผลให้พลังงานความร้อนสามารถแพร่ผ่านไปยังเมทริกซ์เพื่อหลอมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 14 ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ชิ้นงานทดสอบ	กำลังวัตต์ (W)	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_m (J/g)
PP	0	156.16	120.07	101.17
	340	162.58	119.08	81.58
	650	158.17	118.67	79.87
	1300	160.75	118.92	81.81
PP/CaCO ₃ -PA	0	160.95	119.72	77.42
	340	161.42	119.00	68.98
	650	161.67	118.75	77.20
	1300	161.67	119.17	58.26
PP/CaCO ₃ -SA	0	161.53	119.76	79.32
	340	161.83	119.67	74.18
	650	161.75	119.75	81.31
	1300	161.50	118.83	74.84

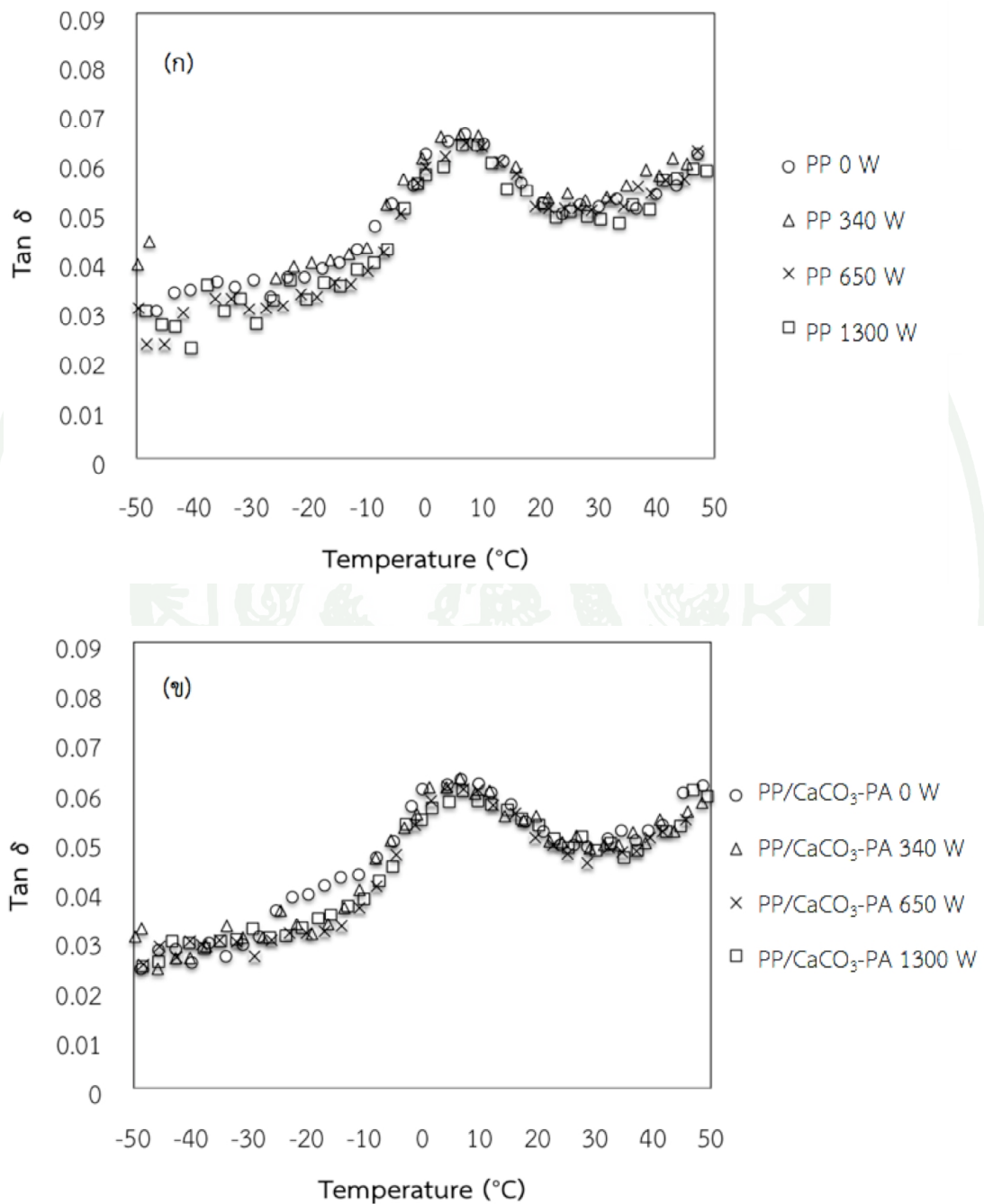
3.3.2 การตรวจสอบค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้ว ค่า $\tan \delta$ และค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ จากการทดสอบพบว่าค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังตารางที่ 15 ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 15 ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร ด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

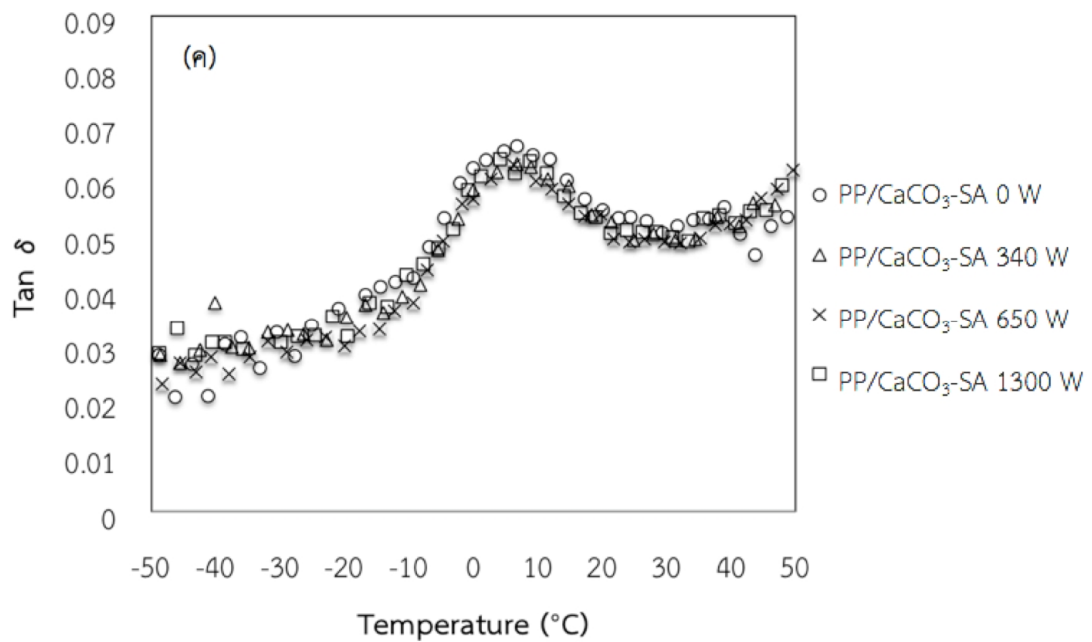
ชิ้นงานทดสอบ	กำลังวัตต์ (W)	T_g (°C)
PP	0	6.9 ± 0.07
	340	6.4 ± 0.57
	650	6.6 ± 0.64
	1300	6.5 ± 0.21
PP/CaCO ₃ -PA	0	6.5 ± 0.38
	340	6.3 ± 0.85
	650	6.4 ± 0.42
	1300	6.4 ± 0.28
PP/CaCO ₃ -SA	0	6.5 ± 0.42
	340	6.3 ± 0.00
	650	6.4 ± 0.14
	1300	6.5 ± 0.07

ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 41 พบว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มลดลง เนื่องจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟ ทำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ฟิล์มจึงมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

ซึ่งเป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการคลายตัวที่ยากขึ้น ส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ ลดลง (He and Zhang 2008; Rezaei *et al.*, 2009)

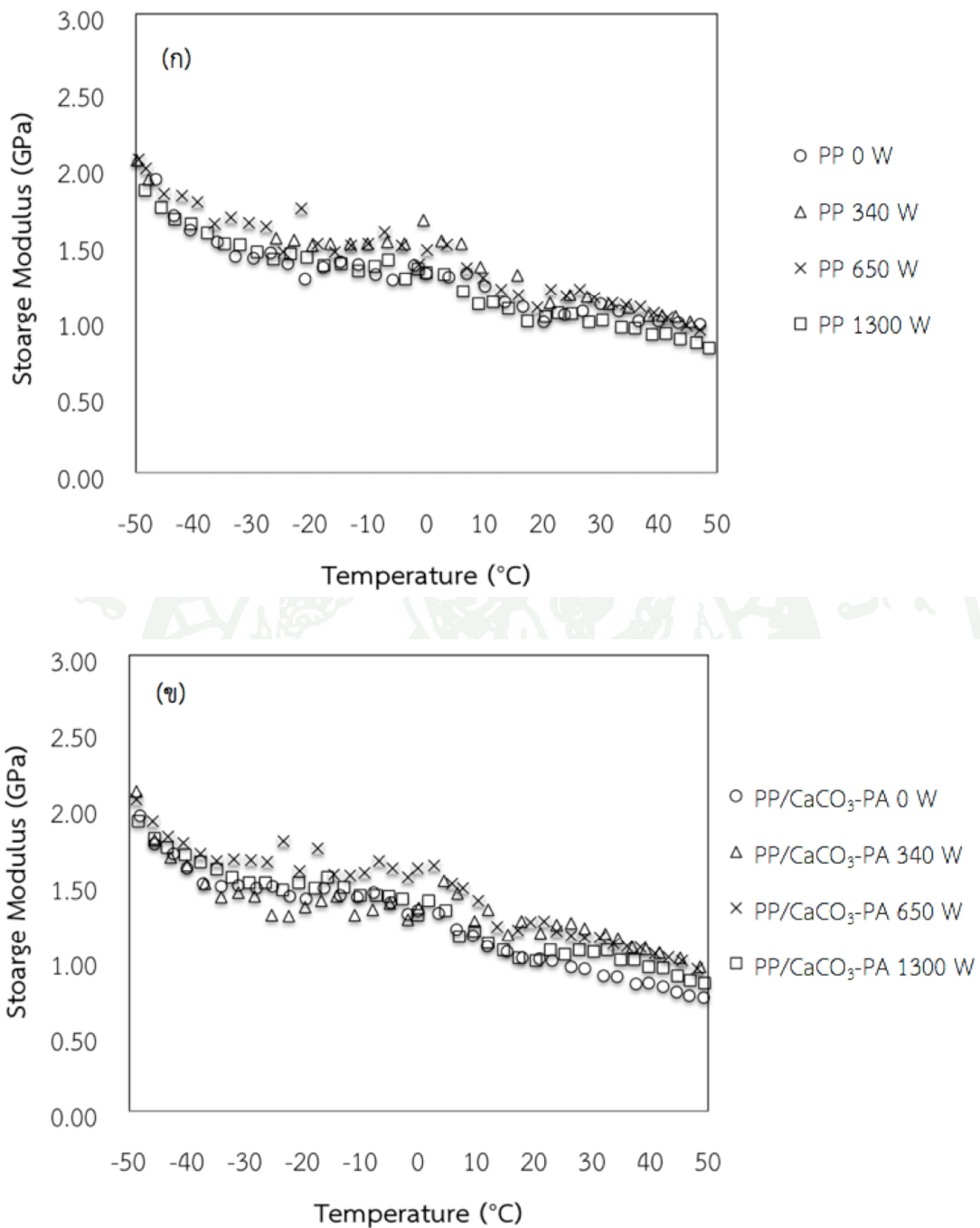


ภาพที่ 41 ค่า $\tan \delta$ ของ (ก) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และ (ค) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดสเตียริก หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

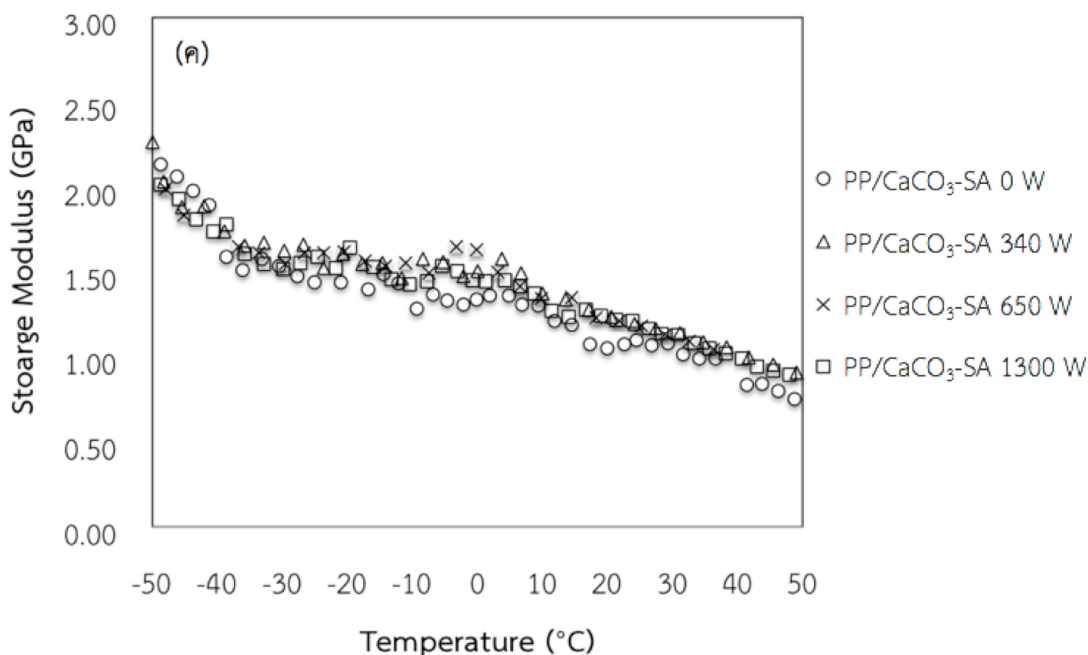


ภาพที่ 41 (ต่อ)

ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดสเตียริก หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 42 พบว่า ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสมของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (He and Zhang 2008) เนื่องจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟ ทำให้ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ฟิล์มจึงมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ ฟิล์มมีความต้านทานต่อแรงดึงและมอดุลัสที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 42 ค่ามอดุลัสสะสมของ (ก) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และ (ค) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดสเตียริก หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

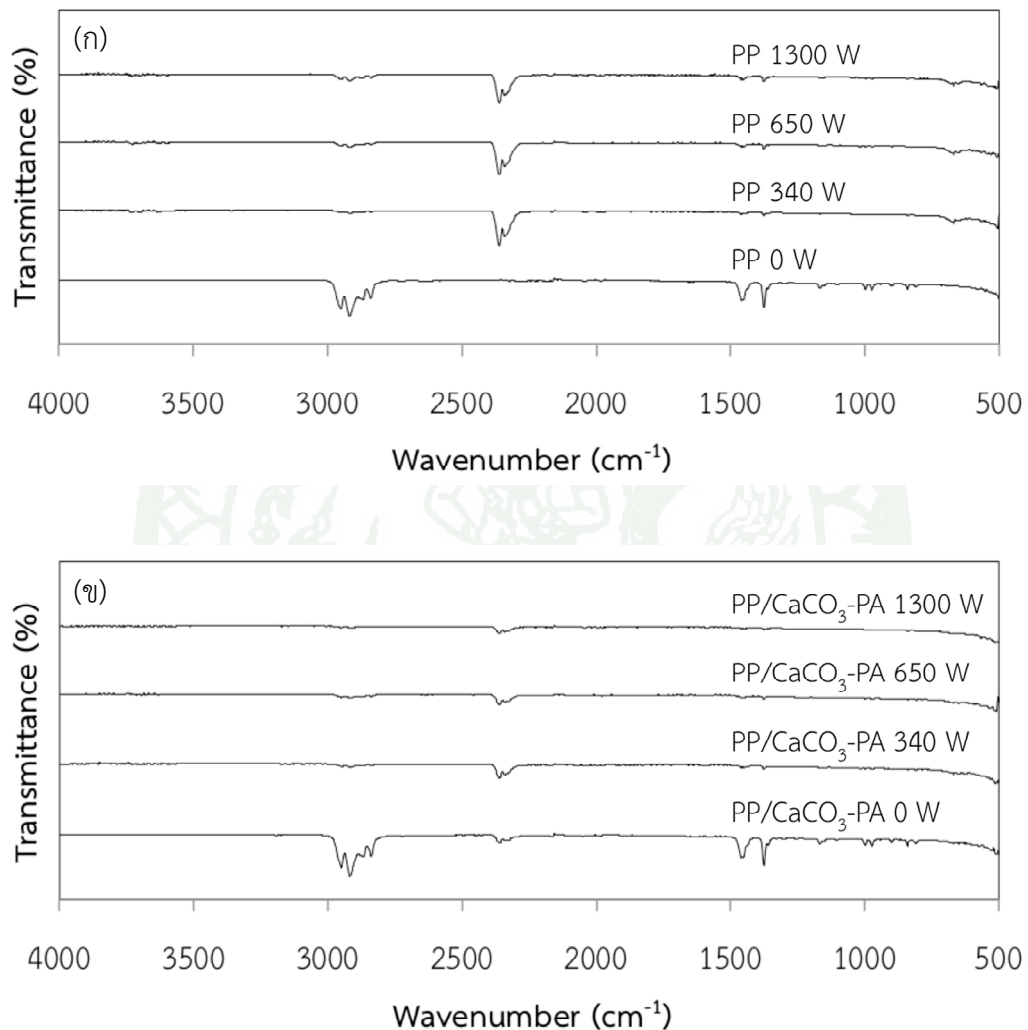


ภาพที่ 42 (ต่อ)

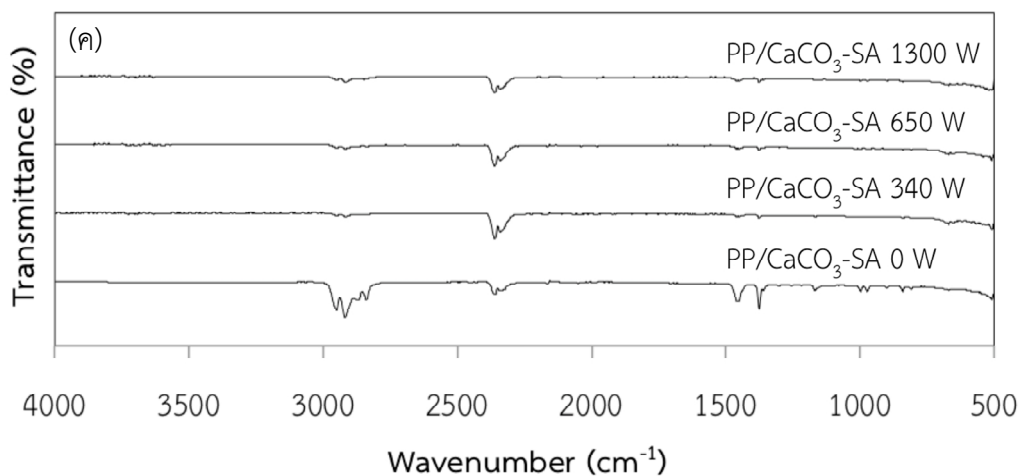
3.4 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ ในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 500 แสดงดังภาพที่ 43 พบว่า ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 650 และ 1300 วัตต์ มีความเข้มพีคลดลงอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2951 cm^{-1} 2918 cm^{-1} 2868 cm^{-1} และ 2839 cm^{-1} แสดงถึงการดูดซับของพีค C-H (Yoon *et al.*, 2000) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1456 cm^{-1} และ 1376 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ CH₃ (Shadpour *et al.*, 2001) เนื่องจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟจะช่วยเพิ่มพันธะ H-H ภายในโมเลกุล (intramolecular) และระหว่างโมเลกุล (intermolecular) จนกระทั่งเกิดการแยกออกจากกันของพันธะ ทำให้โมเลกุลมีขนาดที่เล็กลง (Somashekarappa *et al.*, 2013) ส่งผลต่อการดูดซับของเลขคลื่นดังกล่าวที่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟมีการเพิ่มขึ้นของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2360 cm^{-1} และ 2345 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Fermo *et al.*, 2006; Alkan *et al.*, 2011; El-Bahy, 2013) โดยฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนมีตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้ทราบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรด

สตีเรียก มีโอกาสเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในโครงสร้างเคมีของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลง ส่งผลให้ฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกและฟิล์มที่เติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสตีเรียกมีเสถียรภาพทางเคมีที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติม (พงษ์พัฒน์, 2556)

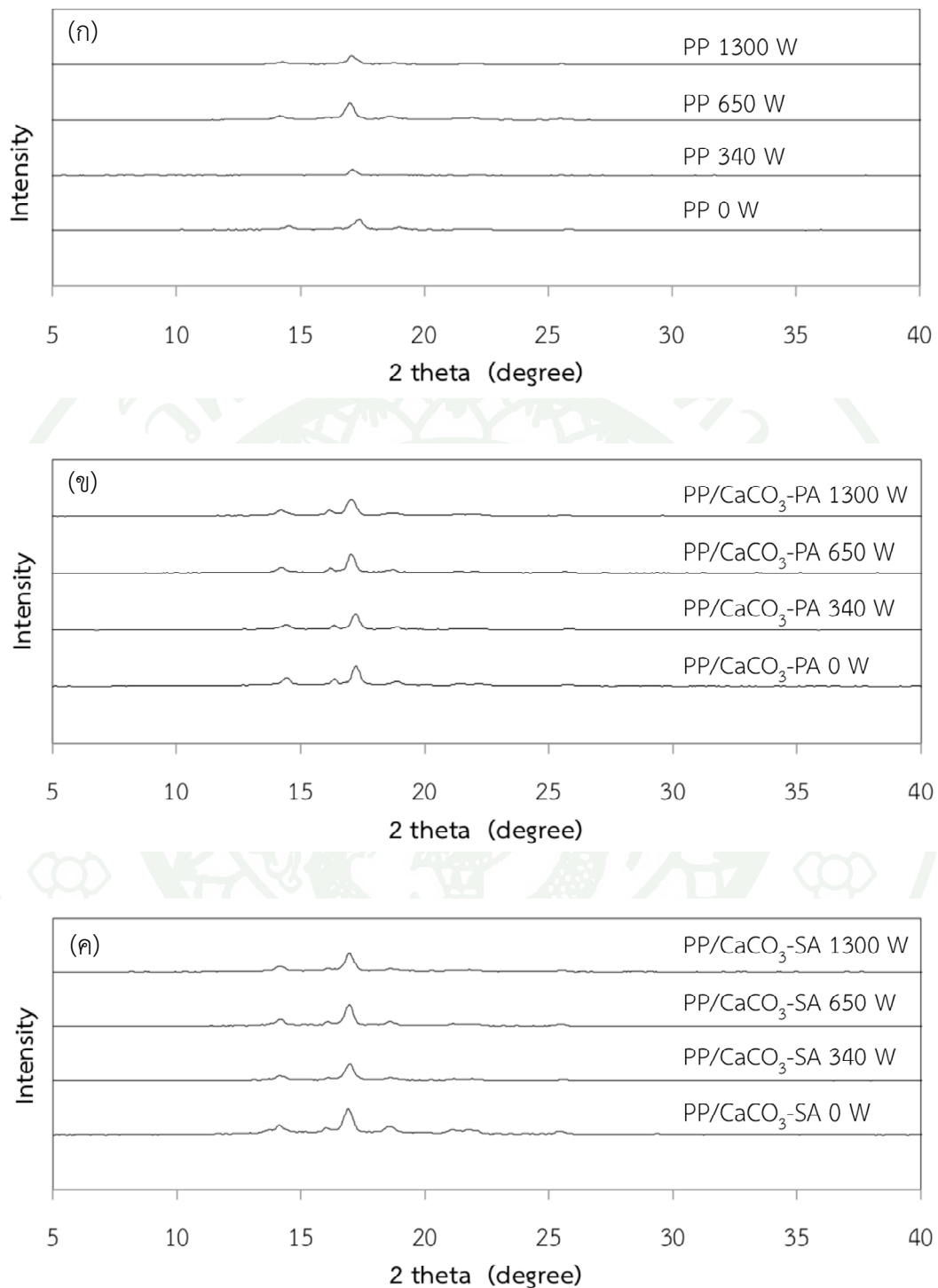


ภาพที่ 43 FTIR สเปกตรัมของ (ก) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และ (ค) ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสตีเรียก หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ



ภาพที่ 43 (ต่อ)

2.6.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ แสดงดังภาพที่ 44 และตารางที่ 16 พบว่าภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด คลื่นไมโครเวฟไม่ทำให้รูปผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนแปลง โดยรูปผลึกแบบแอลฟาอยู่บนระนาบ (110) (040) และ (130) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต่า เท่ากับ 14.3° 16.8° และ 18.4° ตามลำดับ (Romankiewicz *et al.*, 2004; Harváth *et al.*, 2010; Ding *et al.*, 2012) รูปผลึกแบบเบต้าอยู่บนระนาบ (300) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต่า เท่ากับ 16.0° (Labour *et al.*, 2002; Romankiewicz *et al.*, 2004; Harváth *et al.*, 2010) ซึ่งการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกและการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกส่งผลให้ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางผลึกที่ดีกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติม สังเกตได้จากภาพ 44 (ก) เมื่อได้รับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟพฤติกรรมผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



ภาพที่ 44 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (ก) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (ข) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และ (ค) फिल्मไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก หลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ในการวิเคราะห์ค่าร้อยละความเป็นผลึกพบว่า ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟมีแนวโน้มมากกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ผ่านการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ เนื่องจากความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟจะช่วยเพิ่มพันธะ H-H ภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลจนกระทั่งเกิดการแยกออกจากกันของพันธะ ส่งผลให้โมเลกุลมีขนาดที่เล็กลง (Somashekarappa *et al.*, 2013) ซึ่งโมเลกุลที่เล็กลงนี้จะเริ่มจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึกหรือทำหน้าที่คล้ายกับเป็นสารก่อผลึกให้กับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Roy *et al.*, 2007) นอกจากนี้ความร้อนที่ได้จากคลื่นไมโครเวฟยังทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ (Siripatrawan *et al.*, 2000) ทำให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับเริ่มทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดการจัดเรียงตัวที่น้อยลงหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความร้อนที่มากเกินไปของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์

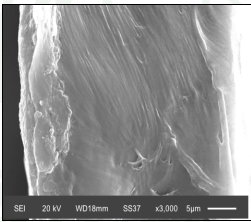
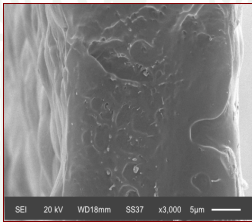
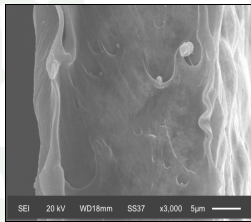
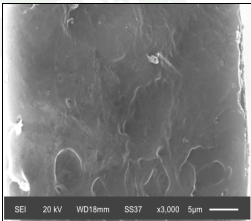
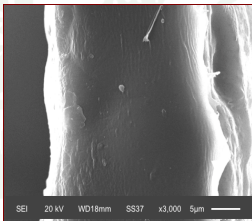
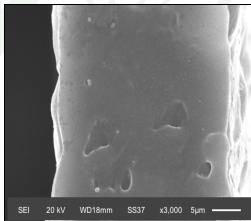
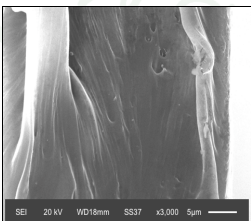
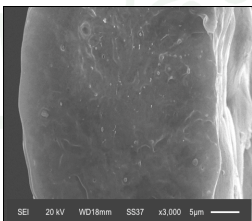
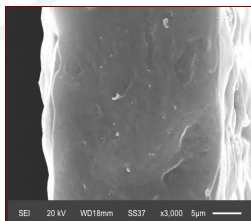
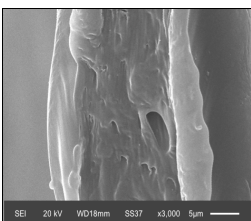
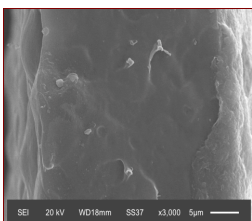
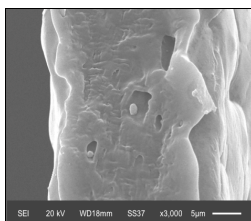
ตารางที่ 16 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ชิ้นงานทดสอบ	กำลังวัตต์ (W)	β -Crystallinity (%)	Crystallinity (%)
PP	0	1.55	53.61
	340	1.44	47.79
	650	1.75	62.86
	1300	1.31	58.57
PP/CaCO ₃ -PA	0	4.87	57.57
	340	4.82	61.51
	650	4.71	59.51
	1300	4.58	56.84
PP/CaCO ₃ -SA	0	3.22	60.51
	340	2.93	63.29
	650	3.11	63.00
	1300	2.97	60.86

2.6.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังตารางที่ 17 พบว่าฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

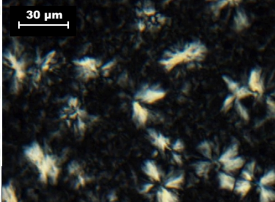
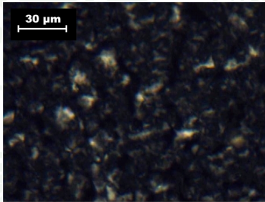
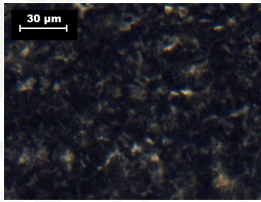
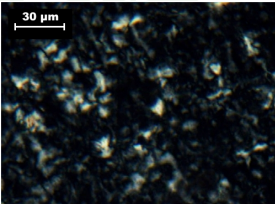
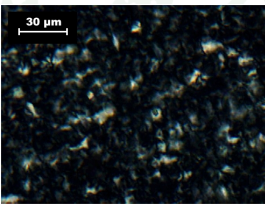
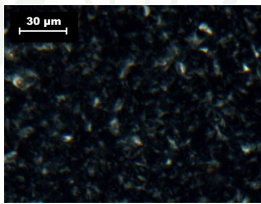
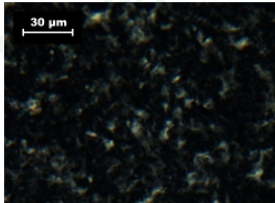
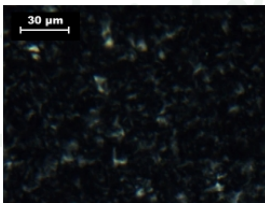
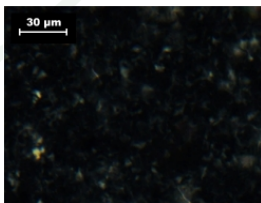
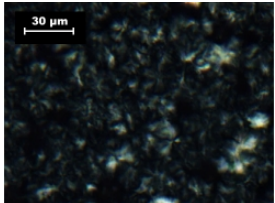
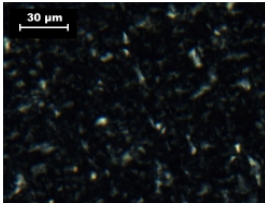
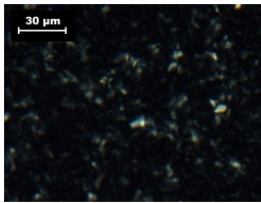
ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก ภายหลังจากใช้งานภายใต้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าทั้ง 340 650 และ 1300 วัตต์ ไม่ส่งผลต่อ การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ (Somashekarappa *et al.*, 2013) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเป็นการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้ว (dipolar polarization) ของโมเลกุล (Chandrasekaran *et al.*, 2012) ซึ่งจะส่งผลต่อ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นผิวไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน (Mirabedini *et al.*, 2004) ทำให้ ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวภายหลังจากการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตารางที่ 17 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด

กำลังวัตต์ (W)	ชิ้นงานทดสอบ		
	PP	PP/CaCO ₃ -PA	PP/CaCO ₃ -SA
0			
340			
650			
1300			

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงดังตารางที่ 18 พบว่าฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มติก และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกภายหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟสเฟียร์รูโลที่มีขนาดที่เล็กลงและมีจำนวนมากขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟช่วยเพิ่มพันธะ H-H ภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลจนกระทั่งเกิดการแยกออกจากกันของพันธะ ส่งผลให้โมเลกุลมีขนาดที่เล็กลง ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึกทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ดีขึ้น (Romankiewicz *et al.*, 2004; Roy *et al.*, 2007; Somashekarappa *et al.*, 2013)

ตารางที่ 18 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กำลังวัตต์ (W)	ชิ้นงานทดสอบ		
	PP	PP/CaCO ₃ -PA	PP/CaCO ₃ -SA
0			
340			
650			
1300			

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การศึกษาชนิด และปริมาณของกรดไขมันที่เหมาะสมในการตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต โดยชนิดของกรดไขมันที่ศึกษา คือ กรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งประสิทธิภาพการเกาะติดของกรดไขมันบนพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตพิจารณาได้จาก ผลึกของกรดไขมันและการสั่นของกรดไขมันที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของการตัดแปรพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดปาล์มิติก คือ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นที่เหมาะสมของการตัดแปรพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก คือ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

2. การศึกษาสมบัติของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน เพื่อเลือกฟิล์มที่มีสมบัติดีที่สุดของแต่ละกรดไขมันเพื่อนำไปใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ พบว่าการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันทั้งกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มเพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจากการตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน ช่วยปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ากันได้ดีกับฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมากขึ้น อีกทั้งการตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตยังช่วยให้มีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของฟิล์ม ซึ่งจะไปเพิ่มจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึก ทำให้ฟิล์มมีร้อยละความเป็นผลึกและอุณหภูมิในการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น การเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันยังส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนลดลง แสดงว่าการเกิดทรานซิชันแบบเบต้าสามารถเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลต่อการเกิดผลึกแบบเบต้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์พฤติกรรมผลึก คือ การตัดแปรพื้นผิวอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมันเป็นสารเหนี่ยวนำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดรูปผลึกแบบเบต้าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณที่มากเกินไปของการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันลงในฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะส่งผลต่อสมบัติที่ลดลง โดยฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกที่ความเข้มข้น 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3. การศึกษาสมบัติของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันภายหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 650 และ 1300 วัตต์

เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเมื่อฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริกผ่านการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ ทำให้ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วลดลง แสดงว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เกิดการจัดเรียงตัวสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ ทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการสกัดกั้น และอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ (650 และ 1300 วัตต์) พบว่าสมบัติของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนที่มากเกินไปของการจัดเรียงตัวสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟขนาด 340 วัตต์ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติที่ลดลงของฟิล์มเมื่อมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟยังคงมีสมบัติที่ดีกว่าฟิล์มก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ โดยฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติกมีสมบัติที่ดีกว่าฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาฟิล์มปิดผนึกสำหรับบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟ ยังไม่มีการทดสอบในส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้จริงกับอาหารแช่เย็น ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยอาจจะมีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการปิดผนึกร่วมกับกรดสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารเพิ่มเติม รวมถึงการศึกษาเปรียบเทียบกับฟิล์มปิดผนึกที่ใช้ทางการค้าทั่วไป เพื่อหาข้อดีและข้อเสียสำหรับนำมาพัฒนาและปรับปรุงสูตรการผลิตในอนาคตเพื่อให้ได้ฟิล์มปิดผนึกสำหรับไมโครเวฟที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตตยา สมยาภักดี และ โสบุญชัย กิตติเสรีบุตร. 2545. **โครงการศูนย์บริการข้อมูลเกี่ยวกับความปลอดภัยในอาหาร (E-Center for Food Safety)**. 12 หน้า.
- งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. **การบรรจุอาหาร (Food Packaging)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท เอส พี เอ็ม การพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- ปุ่นและสมพร คงเจริญเกียรติ. 2551. **บรรจุภัณฑ์โลหะ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท อมร โปรดักชั่น แอนด์ บรอดคาส, กรุงเทพฯ.
- ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล. 2545. **การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ (polymer characterization)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- พงษ์พัฒน์ ศุขวัฒน์กุล. 2556. **การพัฒนาภาชนะบรรจุไมโครเวฟของไอโซเทกติกพอลิพอร์ลีน/ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายและการสลายตัวจากรังสีแกมมา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรชัย ราชตะนະพันธุ. 2552. **บรรจุภัณฑ์ สำคัญไฉน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วนิดา การพิมพ์, เชียงใหม่.
- วีไล รังสาดทอง. 2552. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 5. บริษัทแท็กซ์ แอนด์ เจอร์ นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สุภัทรชัย แสงวังษ์. 2550. **สมบัติเชิงกลพลวัตและสัณฐานวิทยาของโพรคอมพอสิต พอลิโพรไพลีน และผงไม้ยางพารา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อรอุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- โอนดาซ์ รัชเวทย์. 2552. **พอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ดวงกมลพับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.
- อุไร จันทรหนองสรวง และ อิทธิพล แจ่มชัด. 2555. **การศึกษาฟิล์มพลาสติกชีวภาพพีบีเอสผสม แป้งดัดแปรที่เตรียมจากเทคนิคออร์ติด้วยสลิทตาย, น. 1878-1883**. ใน การประชุม วิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรรถพล ตระระ. 2551. **คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ**. ม.ป.ท.

Ahankari, S.S., A.K. Mohanty and M. Misra. 2011. Mechanical Behavior of Agro-Residue Reinforced Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), (PHBV) Green Composites: A Comparison with Traditional Polypropylene Composites. **Composites Science and Technology** 71: 653-657.

Alkan, C., Y. Tek and D. Kahraman. 2011. Preparation and Characterization of a Series of Thiourea Derivatives as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. **Turkish Journal of Chemistry** 35: 769-777.

Aso, O., J.I. Eguiazabal and J. Nazabal. 2007. The Influence of Surface Modification on the Structure and Properties of a Nanosilica Filled Thermoplastic Elastomer. **Composites Science and Technology** 67: 2854-2863.

Avella, M., R. Avolio, E.D. Pace, M.E. Errico, G. Gentile and M.G. Volpe. 2013. Bio-Nanotechnology: a Revolution in Food, Biomedical and Health Sciences, pp. 212-226. In D. Bagchi, M. Bagchi, H. Moriyama and F. Shahidi., eds. **Polymer-Based Nanocomposites for Food Packaging Applications**. Wiley-Blackwell Publishers, Italy.

Benmesli, S. and F. Riahi. 2014. Dynamic Mechanical and Thermal Properties of a Chemically Modified Polypropylene/Natural Rubber Thermoplastic Elastomer Blend. **Polymer Testing** 36: 54-61.

Borisov, A.S. 2001. **Solid-State Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Phosphazene Polymers**. M.S. Thesis, University of Lethbridge.

Buasri, A., N. Chaiyut, K. Borvornchettanuwat, N. Chantanachai and K. Thonglor. 2012. Thermal and Mechanical Properties of Modified CaCO₃ /PP Nanocomposites. **World Academy of Science, Engineering and Technology** 68: 446-449.

Chandrasekaran, S., S. Ramanathan and T. Basak. 2012. Microwave Material Processing – A Review. **AIChE Journal** 58 (2): 330-363.

- Cha-um, W., P. Rattanadecho and W. Pakdee. 2009. Experimental Analysis of Microwave Heating of Dielectric Materials Using a Rectangular Wave Guide (MODE: TE₁₀) (Case Study: Water Layer and Saturated Porous Medium). **Experimental Thermal and Fluid Science** 33: 472-481.
- Deshmukh, G.S., S.U. Pathak, D.R. Peshwe and J.D. Ekhe. 2010. Effect of Uncoated Calcium Carbonate and Stearic Acid Coated Calcium Carbonate on Mechanical, Thermal and Structural Properties of Poly(butylene terephthalate) (PBT)/ Calcium Carbonate Composites. **Bulletin of Materials Science** 33 (3): 277-284.
- Dikobe, D.G. and A.S. Luyt. 2009. Morphology and Properties of Polypropylene/ Ethylene Vinyl Acetate Copolymer/Wood Powder Blend Composites. **eXPRESS Polymer Letters** 3 (3): 190-199.
- Ding, Q., Z. Zhang, C. Wang, J. Jiang, G. Li and K. Mai. 2012. Crystallization Behavior and Melting Characteristics of Wollastonite Filled β -Isotactic Polypropylene Composite. **Thermochimica Acta** 536: 47-54.
- Duncan, T.V. 2011. Applications of Nanotechnology in Food Packaging and Food Safety: Barrier Materials, Antimicrobials and Sensors. **Journal of Colloid and Interface Science** 363: 1-24.
- Eiras, D. and L.A. Pessan. 2009. Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites. **Materials Research** 12 (4): 517-522.
- El-Bahy, Z.M. 2013. Adsorption of CO and NO on Ceria- and Pt-Supported TiO₂: *In Situ* FTIR Study. **Modern Research in Catalysis** 2: 136-147.
- Fermo, P., A. Piazzalunga, R. Vecchi, G. Valli and M. Ceriani. 2006. A TGA/FT-IR Study for Measuring OC and EC in Aerosol Samples. **Atmospheric Chemistry and Physics** 6: 255-266.
- Han, L., X. Li, Y. Li, T. Huang, Y. Wang, J. Wu and F. Xiang. 2010. Influence of Annealing on Microstructure and Physical Properties of Isotactic Polypropylene/ Calcium Carbonate Composites with β -phase Nucleating Agent. **Materials Science and Engineering A** 527: 3176-3185.

- Harváth, Zs., I.E. Sajó, K. Stoll, A. Menyhárd and J. Varga. 2010. The Effect of Molecular Mass on the Polymorphism and Crystalline Structure of Isotactic Polypropylene. **eXPRESS Polymer Letters** 4: 101-114.
- He, Q. and A. Zhang. 2008. Effect of Microwave Irradiation on Crystalline Structure and Dielectric Property of PVDF/PZT Composite. **Journal of Materials Science** 43: 820-823.
- Jacoby, P. 2007. Beta Nucleating Masterbatch Offers Enhanced Properties in Polypropylene Products. **PlasticsAdditives & Compounding** 9 (3): 28-31.
- Jayanarayanan, K., S. Thomas and K. Joseph. 2008. Morphology, Static and Dynamic Mechanical Properties of in Situ Microfibrillar Composites Based on Polypropylene/Poly(ethylene terephthalate) Blends. **Composites: Part A** 39: 164-175.
- Kucerova, J. 2010. **Long Chain Branched Polypropylene with Nucleating Agent.** M.S. Thesis, Tomas Bata University.
- Kim, D.S. and C.K. Lee. 2002. Surface Modification of Precipitated Calcium Carbonate using Aqueous Fluosilicic Acid. **Applied Surface Science** 202: 15-23.
- Labour, T., G. Vigier, R. Seguela, C. Gauthier, G. Orange and Y. Bomal. 2002. Influence of the β -Crystalline Phase on the Mechanical Properties of Unfilled and Calcium Carbonate-filled Polypropylene: Ductile Cracking and Impact Behavior. **Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics** 40: 31-42.
- Lam, T.D., T.V. Hoang, D.T. Quang and J.S. Kim. 2009. Effect of Nanosized and Surface-Modified Precipitated Calcium Carbonate on Properties of CaCO₃/Polypropylene Nanocomposites. **Materials Science and Engineering A** 501: 87-93.
- Lin, Y., H. Chen, C.M. Chan and J. Wu. 2010. The Toughening Mechanism of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites. **Polymer** 51: 3277-3284.

- López-Manchado, M.A. and M. Arroyo. 2000. Thermal and Dynamic Mechanical Properties of Polypropylene and Short Organic Fiber Composites. **Polymer** 41: 7761-7767.
- Luyt, A.S., M.D. Dramićanin, Ž. Antić, V. Djoković. 2009. Morphology, Mechanical and Thermal Properties of Composites of Polypropylene and Nanostructured Wollastonite Filler. **Polymer Testing** 28: 348–356.
- Lv, J., J. Feng, W. Zhang, Y. Liu, Z. Wang, M. Zhao and Y. Cai. 2012. Discrimination of Carbonate-Containing and Carbonate-Free Polyvinyl Chloride with Fourier Transform Infrared Microscopy and Raman Spectroscopy. **Spectroscopy** 27 (6): 36-41.
- Lv, Y., Y. Huang, M. Kong and G. Li. 2013. Improved Thermal Oxidation Stability of Polypropylene Films in the Presence of β -Nucleating Agent. **Polymer Testing** 32: 179-186.
- Mihajlović, S., A. Daković, Ž. Sekulić, V. Jovanović and D. Vučinić. 2009. Influence of the Modification Method on the Surface Adsorption of Stearic Acid by Natural Calcite. DOI: 10.2298/JSC090504038M
- Mirabedini, S.M., H. Rahimi, Sh. Hamedifar and S.M. Mohseni. 2004. Microwave Irradiation of Polypropylene Surface: A Study on Wettability and Adhesion. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 24: 163-170.
- Móczó, J. and B. Pukánszky. 2008. Polymer Micro and Nanocomposites: Structure, Interactions, Properties. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 14: 535-563.
- Mohan, J. 2004. **Organic Spectroscopy: Principles and Applications**. Alpha Science International Ltd., India.
- Mousavi, M.R. and M. Rafizadeh. 2007. Microwave Cross-linking of LDPE: Experimental Modelling of Gel Content by Taguchi Method and Optimum Processing Conditions. **Iranian Polymer Journal** 16 (10): 681-689.

- Nobrega, M.M., J.B. Olivato, M.V.E. Grossmann, E. Bona and F. Yamashita. 2012. Effects of the Incorporation of Saturated Fatty Acids on the Mechanical and Barrier Properties of Biodegradable Films. **Journal of Applied Polymer Science** 124: 3695-3703.
- Nowaczyk, G., S. Głowinkowski and S. Jurga. 2004. Rheological and NMR Studies of Polyethylene/Calcium Carbonate Composites. **Solid State Nuclear Magnetic Resonance** 25: 194-199.
- Osman, M.A. and U.W. Suter. 2002. Surface Treatment of Calcite with Fatty Acids: Structure and Properties of the Organic Monolayer. **Chemistry of Materials** 14: 4408-4415.
- Osman, M.A., A. Atallah and U.W. Suter. 2004. Influence of Excessive Filler Coating on the Tensile Properties of LDPE-Calcium Carbonate Composites. **Polymer** 45: 1177-1183.
- Phueakbuakhao, N., W. Prissanaroon-Ouajai and N. Kreua-Ongarjnkool. 2008. Effect of Coupling Agents on Mechanical Properties and Morphology of CaCO₃-Filled Recycled High Density Polyethylene. **Journal of Metals, Materials and Minerals** 18: 131-135.
- Pogodina, N.V. and H.H. Winter. 1998. Polypropylene Crystallization as a Physical Gelation Process. **Macromolecules** 31: 8164-8172.
- Poompradub, S., T. Luthikaviboon, S. Linpoo, R. Rojanathanes and P. Prasassarakich. 2011. Improving Oxidation Stability and Mechanical Properties of Natural Rubber Vulcanizates Filled with Calcium Carbonate Modified by Gallic Acid. **Polym. Bull** 66: 965-977.
- Renger, C.J., S.J. Burrows and R.A. Shanks. 2001. Processing, Crystallization, and Dynamic Mechanical Analysis of High Molar Mass Polysiloxane-Modified PP/CaCO₃ Composites. **Journal of Applied Polymer Science** 82: 3091-3098.

- Ren, Z., R.A. Shanks and T.J. Rook. 2001. Crystallization and Melting of Highly Filled Polypropylene Composites Prepared with Surface-Treated Fillers. **Journal of Applied Polymer Science** 79: 1942–1948.
- Rezaei, F., R. Yunus and N.A. Ibrahim. 2009. Effect of Fiber Length on Thermo mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composites. **Materials and Design** 30: 260-263.
- Romankiewicz, A., T. Sterzynski and W. Brostow. 2004. Structural Characterization of α -and β -Nucleated Isotactic Polypropylene. **Polymer International** 53: 2086-2091.
- Rothon, R.N. 1998. **Mineral Fillers in Thermoplastics: Filler Manufacture and Characterisation**. United Kingdom.
- Rustan, A.C. and C.A. Drevon. 2005. Fatty Acids: Structures and Properties. DOI: 10.1038/NPG.ELS.0003894
- Roy, P.K., P. Surekha, C. Rajagopal, S.N. Chatterjee and V. Choudhary. 2007. Studies on the Photo-oxidative Degradation of LDPE Films in the Presence of Oxidised Polyethylene. **Polymer Degradation and Stability** 92: 1151-1160.
- Sharma, S.K. and S.K. Nayak. 2009. Surface Modified Clay/Polypropylene (PP) Nanocomposites: Effect on Physico-Mechanical, Thermal and Morphological Properties. **Polymer Degradation and Stability** 94: 132–138.
- Shentu, B., J. Li and Z. Weng. 2006. Effect of Oleic Acid-Modified Nano-CaCO₃ on the Crystallization Behavior and Mechanical Properties of Polypropylene. **Chinese Journal of Chemical Engineering** 14(6): 814-818.
- Shen, Y., C. Li, X. Zhu, A. Xie, L. Qiu and J. Zhu. 2007. Study on the Preparation and Formation Mechanism of Barium Sulphate Nanoparticles Modified by Different Organic Acids. **Journal of Chemical Sciences** 119 (4): 319–324.

- Siripatrawan, U., G. Burgess and B.R. Harte. 2000. The Effect of Repeated Microwave Heating, Fill Level and Temperature on the Impact Resistance of a Polypropylene Syrup Bottle. **Packaging Technology and Science** 13: 205-210.
- Somashekarappa, H., Y. Prakash, Mahadevaiah, T. Demappa and R. Somashekar. 2013. Effect of Microwave Radiation on Hydroxy Propyl Methal Cellulose Polymer Films and HPMC/ Poly (vinylpyrrolidone) Polymer Blend Films Using the Wide-Angle X-ray Technique. **Radiation Effects & Defects in Solids** 168 (11-12): 912-923.
- Stern, C. 2005. **On the Performance of Polypropylene / between Synthesis and End-use Properties.** Ph.D. Thesis, University of Twente.
- Stringer, M. and C. Dennis. 2003. **Chilled Foods: a Comprehensive Guide.** Woodhead Publishing Limited, United States of America.
- Sukhavattanakul, P., L. Jarupan and C. Pechyen. 2013. Preparation and Characterization of Isotactic Polypropylene/ Synthesized Micro Cellulose Trays for Microwavable Packaging, pp. 399-402 *In Pure and Applied Chemistry International Conference 2013.* 23-25 January 2013, The Tide Resort, Bangsaen Beach, Chon Buri, Thailand.
- Supaphol, P., W. Harnsiri and J. Junkasem. 2004. Effects of Calcium Carbonate and Its Purity on Crystallization and Melting Behavior, Mechanical Properties, and Processability of Syndiotactic Polypropylene. **Journal of Applied Polymer Science** 92: 201–212.
- Takeuchi, H., S. Sekine, K. Kojima and T. Aoyama. 2008. The Application of Medium-Chain Fatty Acids: Edible Oil with a Suppressing Effect on Body Fat Accumulation. **Asia Pac J Clin Nutr** 17: 320-323.
- Tomé, L.C., C.M.B. Gonçalves, M. Boaventura, L. Brandão, A.M. Mendes, A.J.D. Silvestre, C.P. Neto, A. Gandini, C.S.R. Freire and I.M. Marrucho. 2011. Preparation and Evaluation of the Barrier Properties of Cellophane Membranes Modified with Fatty Acids. **Carbohydrate Polymers** 83: 836–842.

- Xin, Z. and Y. Shi. Controlled Crystallization of Isotactic Polypropylene Based on α/β Compounded Nucleating Agents: From Theory to Practice. **Polycrystalline Materials – Theoretical and Practical Aspects**. 125-140.
- Whitney, E. and S.R. Rolfes. 2009. **Understanding Nutrition**. Nelson Education, Ltd. Canada.
- Wilkinson, N. and A.J. Ryan. 1999. **Polymer Processing and Structure Development**. T.J. International Ltd, Padtown, Cornwall. Great Britain.
- Wong, T.W. 2008. Use of Microwave in Processing of Drug Delivery Systems. **Current Drug Delivery** 5: 77-84.
- Wu, T., Y. Pan, E. Liu and L. Li. 2012. Carbon Nanotube/Polypropylene Composite Particles for Microwave Welding. **Journal of Applied Polymer Science** 126: E284-E289.
- Wu, W. and S. Lu. 2003. Mechano-Chemical Surface Modification of Calcium Carbonate Particles by Polymer Grafting. **Powder Technology** 137: 41-48.
- Yang, G., X. Li, J. Chen, J. Yang, T. Huang, X. Liu and Y. Wang. 2012. Crystallization Behavior of Isotactic Polypropylene Induced by Competition Action of β Nucleating Agent and High Pressure. **Colloid Polymer Science** 290: 531-540.
- Yang, K., Q. Yang, G. Li, Y. Sun and D. Feng. 2006. Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites. **Materials Letters** 60: 805-809.
- Yang, Z., Y. Tang and J. Zhang. 2013. Surface Modification of CaCO_3 Nanoparticles with Silane Coupling Agent for the Interfacial Compatibility with Styrene-Butadiene Rubber (SBR) Latex. **Chalcogenide Letters** 4: 131-141.
- Yellepeddi, R. and R. Thomas. 2006. New Developments in Wavelength-Dispersive XRF and XRD for the Analysis of Foodstuffs and Pharmaceutical Materials. **Spectroscopy** 21(9): 36-41.

- Yoğurtcuoğlu, E. and M. Uçurum. 2011. Surface Modification of Calcite by Wet-Stirred Ball Milling and Its Properties. **Powder Technology** 214: 47-53.
- Zebarjad, S.M., M. Tahani and S.A. Sajjadi. 2004. Influence of filler particles on deformation and fracture mechanism of isotactic polypropylene. **Materials Processing Technology** 155–156: 1459–1464.
- Zhang, J., J. Lou, S. Ilias, P. Krishnamachari and J. Yan. 2008. Thermal Properties of Poly(lactic acid) Fumed Silica Nanocomposites: Experiments and Molecular Dynamics Simulations. **Polymer** 49: 2381–2386.
- Zhang, X., D. Zhang and T. Liu. 2012. Influence of Nucleating Agent on Properties of Isotactic Polypropylene. **Energy Procedia** 17: 1829–1835.
- Zhang, X.M., S. Elkoun, A. Aji and M.A. Huneault. 2004. Oriented Structure and Anisotropy Properties of Polymer Blown Films: HDPE, LLDPE and LDPE. **Polymer** 45: 217–229.
- Zhang, Y.F. and Z. Xin. 2007. Isothermal Crystallization Behaviors of Isotactic Polypropylene Nucleated with α/β Compounding Nucleating Agents. **Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics** 45: 590–596.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การเตรียมสารที่ใช้ในขั้นตอนการตัดแปรพันธุออนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

การเตรียมสารที่ใช้ในขั้นตอนการตัดแปรพันธุของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โดยการชั่งน้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 2.4 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นชั่งน้ำกลั่นปริมาณ 477.6 กรัม นำมาผสมกันโดยใช้แท่งแก้วคนสารคนให้เข้ากัน ซึ่งจะมีปริมาณรวม 480 กรัม สามารถคำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ตามสูตรด้านล่าง

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของสารละลาย (กรัม)}} \times 100$$

2. การตัดแปรพันธุของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดไขมัน

2.1 นำกรดไขมัน 1 กรัม มากระจายตัวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 79 กรัม พร้อมกับให้ความร้อนด้วยเครื่องแมกเนติกสเตรอร์เรอร์ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อช่วยเรื่องการกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต 20 กรัม ให้มีการกระจายตัวเข้ากันเป็นเวลา 30 นาที

2.2 นำสารละลายอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ทำการตัดแปรพันธุด้วยกรดไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.3 นำอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรหลังจากอบให้แห้ง มาบดให้มีขนาดเล็ก สม่่าเสมอด้วยโกร่ง และนำไปอบอีกครั้งก่อนนำไปผสมกับเม็ดพลาสติกในขั้นตอนต่อไป



ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน
และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน
และฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

1. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกับผงโพแทสเซียมโบไมด์ (KBr) โดยใช้อัตราส่วน 1:4

1.2 บดตัวอย่างแล้วอัดให้เป็นแผ่นโดยใช้ความดัน 10 ตันต่อตารางนิ้ว

1.3 นำตัวอย่างอัดแผ่นใสในแผ่นใสตัวอย่าง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T) ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 32 ครั้ง ความละเอียด 4.0 cm^{-1}

1.4 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็นร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wavenumber) ที่มีความสัมพันธ์กัน

2. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันให้มีขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร

2.2 นำฟิล์มตัวอย่างที่ตัดแล้ว ไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 500 cm^{-1} โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T) ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 32 ครั้ง ความละเอียด 4.0 cm^{-1}

2.3 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็นร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wavenumber) ที่มีความสัมพันธ์กัน



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน
และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

การวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน
และฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน

1. ขั้นตอนในการวิเคราะห์พฤติกรรมผลึกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน

1.1 ใส่อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรในแผ่นแก้วสำหรับใส่ตัวอย่าง ประมาณ 2 กรัม จากนั้นนำเข้าเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา

1.2 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2. ขั้นตอนในการวิเคราะห์ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน

2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน ให้มีขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร จากนั้นนำเข้าเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา

2.2 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง



ภาคผนวก ง

การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และการขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติก
พอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม

การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และการขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติก
พอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมันด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม

1. การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์

1.1 นำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (iPP resin) เกรด Moplen HP525N ซึ่งมี Melt Index (230°C/2.16kg) 11 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต อดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมกันตามอัตราส่วน ดังตารางผนวกที่ ค1 และเขย่าให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ดัดแปรกับเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนให้เข้ากัน

ตารางผนวกที่ ค1 อัตราส่วนของการผสมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

สูตรที่	เม็ดพลาสติก (iPP)	สารเคมี (กรัม)		
		อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปร กรดสเตียริก	กรดปาล์มติก	อนุภาคแคลเซียม คาร์บอเนตไม่ได้ดัดแปร
1	2,000	-	-	-
2	2,000	-	-	10
3	2,000	-	-	20
4	2,000	-	-	30
5	2,000	10	-	-
6	2,000	20	-	-
7	2,000	30	-	-
8	2,000	-	10	-
9	2,000	-	20	-
10	2,000	-	30	-

1.2 นำไปผสมเพื่อผลิตเป็นเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้ อุณหภูมิ 190-220 องศาเซลเซียส ได้เป็นเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

2. การขึ้นรูปฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดไขมัน

2.1 นำเม็ดพลาสติกคอมพอลิท์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต อดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม โดยใช้อุณหภูมิ 170-180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที และฟิล์มมีความหนาประมาณ 40 ไมโครเมตร

2.2 นำฟิล์มที่ได้เก็บไว้ในตู้ควบคุมภาวะก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ





ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

การทดสอบสมบัติของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

1. การทดสอบสมบัติเชิงกล

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัดแปรด้วยกรดไขมัน ให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร จากนั้นทดสอบ ด้วยเครื่อง อินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชีน โดยใช้มาตรฐาน ASTM D882

1.2 เปิดเครื่องทดสอบแล้วปรับระยะที่หนีบตัวอย่างให้อยู่ที่ระยะ 50 มิลลิเมตร ใช้ความเร็ว ในการดึงที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3 ใส่ตัวอย่างในเครื่องทดสอบ ปรับสกรูให้แน่น

1.4 เลือกค่าและหน่วยที่ต้องการ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa) ค่ามอดูลัสของยัง (MPa) และความสามารถในการยืดตัวสูงสุด จากนั้นปรับค่าแรงดึงและค่าการคลาดเคลื่อน ให้เท่ากับ ศูนย์

1.5 กดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ

1.6 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2. การทดสอบสมบัติการสกัดกัน

2.1 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน

2.1.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาของตัวอย่างก่อน ใส่ ตัวอย่างในแผ่นสติ๊กเกอร์อลูมิเนียมที่มีการเจาะรูเป็นวงกลมรัศมี 25 มิลลิเมตร สำหรับการวัดค่า สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน

2.1.2 กดปุ่ม start ที่เครื่องทดสอบ รอผลประมาณ 1 ชั่วโมง 15 นาที

2.1.3 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2.1.4 สามารถคำนวณค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนตามสูตรด้านล่าง

$$OP = \frac{OTR \times \Delta X \times 5}{\Delta P}$$

โดย	OP	=	Oxygen Permeability
	OTR	=	Oxygen Transmission Rate
	ΔX	=	ความหนาของฟิล์ม
	ΔP	=	ค่าความแตกต่างของความดัน
	5	=	อัตราส่วนของพื้นที่การแพร่ผ่านแก๊สออกซิเจนของ เครื่องต่อพื้นที่ของตัวอย่าง

2.2 การทดสอบค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

2.2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมันขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาของตัวอย่างก่อน ใส่ตัวอย่างในแผ่นสติ๊กเกอร์ลูมิเนียมที่มีการเจาะรูเป็นวงกลมขนาด 5 ตารางเซนติเมตร สำหรับการวัดค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

2.2.2 กรอกข้อมูลและกดปุ่มที่เครื่องทดสอบ รอผลประมาณ 5 ชั่วโมง

2.2.3 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2.2.4 สามารถคำนวณค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำตามสูตรด้านล่าง

$$WVP = \frac{WVTR \times \Delta X}{\Delta P}$$

โดย	WVP	=	Water Vapor Permeability
	WVTR	=	Water Vapor Transmission Rate
	ΔX	=	ความหนาของฟิล์ม
	ΔP	=	ค่าความแตกต่างของความดัน

3. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.1 การทดสอบค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกและอุณหภูมิในการหลอมเหลว

3.1.1 ตัดตัวอย่างปริมาณ 8 ± 0.5 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียม (aluminium crucible) จากนั้นปิดฝาถ้วย

3.1.2 ใส่ถ้วยตัวอย่างในเครื่องดีฟเฟอร์เรนเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จากนั้นปรับตั้งค่าข้อมูลที่ต้องการ โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก -30 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส ถึง -30 องศาเซลเซียส และทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

3.1.3 กดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ

3.1.4 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

3.2 การทดสอบค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของแข็งคล้ายแก้วและค่ามอดุลัสสะสม

3.2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน ให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร

3.2.2 ใส่ตัวอย่างในเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลออะนาไลซิส จากนั้นปรับตั้งค่าข้อมูลที่ต้องการ โดยทำการทดสอบแบบดึง (tension) ควบคุมอุณหภูมิการให้ความร้อนคงที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก -50 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส ใช้ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ แรงแบบสถิต (static) 0.5 นิวตัน และแรงแบบพลวัต (dynamic) 0.2 นิวตัน ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

3.2.3 กดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ

3.2.4 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

4. การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

4.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร จากนั้นจุ่มในไนโตรเจนเหลว และฉีกฟิล์มตัวอย่างอย่างรวดเร็ว

3.2.1 ใช้เทปกาวคาร์บอนติดที่ด้านบนของฐานวางตัวอย่าง (specimen stub) จากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างติดลงบนเทปกาวคาร์บอน

4.1.3 นำฐานวางตัวอย่างที่ติดฟิล์มตัวอย่าง ไปผ่านการฉาบผิวด้วยทองคำ ภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้ทองคำเปลี่ยนสภาพเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความสามารถในการนำไฟฟ้าก่อนนำไปวิเคราะห์

4.1.4 นำตัวอย่างเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.5 บันทึกภาพตัวอย่างและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

4.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

4.2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีน/อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดไขมัน ขนาดกว้าง 10 x 10 มิลลิเมตร จากนั้นให้ความร้อน 200 องศาเซลเซียสพร้อมกับกดให้ฟิล์มบางลง เป็นเวลา 20 วินาที

4.2.2 นำฟิล์มตัวอย่างวางบนสไลด์และปิดผนึกด้วยกระจกปิดสไลด์

4.2.3 นำตัวอย่างเข้ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้กำลังขยาย 40 เท่า

4.2.4 บันทึกภาพตัวอย่างและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง



ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

1. การทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

1.1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดุลัส และร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ตารางผนวกที่ ฉ1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	
	ทิศทางเครื่องจักร (MD)	ทิศทางขวางเครื่องจักร (TD)
PP	25.65 ^a ± 3.67	22.10 ^{ab} ± 1.17
PP/0.5 CaCO ₃	24.26 ^a ± 3.02	23.37 ^{bc} ± 1.84
PP/1.0 CaCO ₃	26.93 ^a ± 2.24	27.12 ^d ± 0.75
PP/1.5 CaCO ₃	25.38 ^a ± 1.59	24.90 ^c ± 0.97
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	27.64 ^a ± 0.24	28.38 ^d ± 1.88
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	26.99 ^a ± 1.81	21.24 ^a ± 0.72
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	24.59 ^a ± 0.92	23.14 ^b ± 0.54

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ฉ2 ค่ามอดุลัสของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ตัวอย่าง	ค่ามอดุลัส (MPa)	
	ทิศทางเครื่องจักร (MD)	ทิศทางขวางเครื่องจักร (TD)
PP	929.30 ^a ± 82.10	984.21 ^a ± 46.22
PP/0.5 CaCO ₃	1070.34 ^b ± 101.09	1003.97 ^a ± 62.58
PP/1.0 CaCO ₃	1221.92 ^c ± 55.26	1108.31 ^b ± 48.45
PP/1.5 CaCO ₃	1178.86 ^{bc} ± 66.99	1109.76 ^b ± 74.00
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	1363.82 ^d ± 22.78	1222.89 ^c ± 80.14
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	1346.57 ^d ± 23.04	1238.13 ^c ± 12.17
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	1156.96 ^{bc} ± 32.14	1227.81 ^c ± 25.05

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๓3 ค่าร้อยละในการยึดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดปาล์มติก

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละในการยึดตัวสูงสุด	
	ทิศทางเครื่องจักร (MD)	ทิศทางขวางเครื่องจักร (TD)
PP	453.75 ^a ± 84.45	9.32 ^a ± 0.77
PP/0.5 CaCO ₃	274.59 ^b ± 54.84	8.01 ^{ab} ± 1.51
PP/1.0 CaCO ₃	105.40 ^c ± 46.76	7.67 ^b ± 0.45
PP/1.5 CaCO ₃	40.84 ^{cd} ± 7.60	7.85 ^b ± 1.15
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	32.91 ^{cd} ± 2.39	9.31 ^a ± 1.17
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	22.45 ^d ± 1.58	6.14 ^c ± 0.47
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	21.17 ^d ± 1.38	7.83 ^b ± 1.04

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดุลัส และร้อยละในการยึดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดสแตียริก

ตารางผนวกที่ ๓4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตตัดแปรด้วยกรดสแตียริก

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	
	ทิศทางเครื่องจักร (MD)	ทิศทางขวางเครื่องจักร (TD)
PP	25.65 ^a ± 3.67	22.10 ^a ± 1.17
PP/0.5 CaCO ₃	24.26 ^a ± 3.02	23.37 ^{abc} ± 1.84
PP/1.0 CaCO ₃	26.93 ^a ± 2.24	27.12 ^d ± 0.75
PP/1.5 CaCO ₃	25.38 ^a ± 1.59	24.90 ^c ± 0.97
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	23.15 ^a ± 3.37	24.13 ^{bc} ± 1.74
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	27.36 ^a ± 1.47	22.90 ^{ab} ± 1.24
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	24.43 ^a ± 1.27	22.17 ^a ± 1.44

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑5 ค่ามอดูลัสของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต
ดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ตัวอย่าง	ค่ามอดูลัส (MPa)	
	ทิศทางเครื่องจักร (MD)	ทิศทางขวางเครื่องจักร (TD)
PP	929.30 ^a ± 82.10	984.21 ^a ± 46.22
PP/0.5 CaCO ₃	1070.34 ^b ± 101.09	1003.97 ^a ± 62.58
PP/1.0 CaCO ₃	1221.92 ^{cd} ± 55.26	1108.31 ^b ± 48.45
PP/1.5 CaCO ₃	1178.86 ^{bc} ± 66.99	1109.76 ^b ± 74.00
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	1148.00 ^{bc} ± 46.14	1082.58 ^b ± 62.68
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	1317.47 ^d ± 49.28	1137.32 ^b ± 66.32
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	1154.23 ^{bc} ± 36.72	1149.76 ^b ± 39.40

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑6 ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค
แคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละในการยืดตัวสูงสุด	
	ทิศทางเครื่องจักร (MD)	ทิศทางขวางเครื่องจักร (TD)
PP	453.75 ^a ± 84.45	9.32 ^{abc} ± 0.77
PP/0.5 CaCO ₃	274.59 ^b ± 54.84	8.01 ^a ± 1.51
PP/1.0 CaCO ₃	105.40 ^c ± 46.76	7.67 ^a ± 0.45
PP/1.5 CaCO ₃	40.84 ^c ± 7.60	7.85 ^a ± 1.15
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	359.69 ^d ± 28.22	8.70 ^{ab} ± 1.02
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	93.53 ^c ± 38.20	10.33 ^{bc} ± 2.35
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	67.47 ^c ± 22.53	11.06 ^c ± 1.32

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. การทดสอบสมบัติการสกัดก่อนการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

2.1 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของ
ฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ตารางผนวกที่ ๗ ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดปาล์มิติก

ตัวอย่าง	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน ($\times 10^{-17}$ m.m ³ /s.m ² .Pa)	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ($\times 10^{-11}$ g.m/s.m ² .Pa)
PP	3.22 ^a \pm 0.09	2.60 ^a \pm 0.04
PP/0.5 CaCO ₃	3.11 ^{ab} \pm 0.15	2.63 ^a \pm 0.44
PP/1.0 CaCO ₃	2.97 ^{bc} \pm 0.06	2.38 ^a \pm 0.03
PP/1.5 CaCO ₃	2.83 ^c \pm 0.12	2.40 ^a \pm 0.18
PP/0.5 CaCO ₃ -PA	3.43 ^d \pm 0.02	2.31 ^a \pm 0.15
PP/1.0 CaCO ₃ -PA	3.54 ^d \pm 0.01	2.21 ^a \pm 0.09
PP/1.5 CaCO ₃ -PA	3.70 ^e \pm 0.08	2.33 ^a \pm 0.47

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-e} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.2 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ตารางผนวกที่ ๘ ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตดัดแปรด้วยกรดสเตียริก

ตัวอย่าง	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน ($\times 10^{-17}$ m.m ³ /s.m ² .Pa)	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ($\times 10^{-11}$ g.m/s.m ² .Pa)
PP	3.22 ^{ab} \pm 0.09	2.60 ^a \pm 0.04
PP/0.5 CaCO ₃	3.11 ^{bc} \pm 0.15	2.63 ^a \pm 0.44
PP/1.0 CaCO ₃	2.97 ^{cd} \pm 0.06	2.38 ^a \pm 0.03
PP/1.5 CaCO ₃	2.83 ^d \pm 0.12	2.40 ^a \pm 0.18
PP/0.5 CaCO ₃ -SA	2.94 ^{cd} \pm 0.04	2.48 ^a \pm 0.33
PP/1.0 CaCO ₃ -SA	3.21 ^{ab} \pm 0.22	2.31 ^a \pm 0.19
PP/1.5 CaCO ₃ -SA	3.40 ^a \pm 0.07	2.37 ^a \pm 0.11

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. การทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

3.1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มอดุลัส และร้อยละในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	กำลังวัตต์ (W)	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)
PP	0	22.10 ^{ab} ± 1.17
	340	26.20 ^c ± 1.35
	650	25.59 ^{cd} ± 0.72
	1300	24.63 ^{de} ± 0.86
PP/CaCO ₃ -PA	0	21.24 ^a ± 0.72
	340	24.05 ^{ef} ± 1.10
	650	23.99 ^{ef} ± 0.64
	1300	22.85 ^{bf} ± 0.18
PP/CaCO ₃ -SA	0	22.90 ^{bf} ± 1.24
	340	23.93 ^{ef} ± 0.84
	650	23.46 ^{ef} ± 0.96
	1300	23.19 ^{bf} ± 0.66

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-f} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑๑๐ ค่ามอดุลัสของฟิล์มไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	กำลังวัตต์ (W)	ค่ามอดุลัส (MPa)
PP	0	984.21 ^a ± 46.22
	340	1118.46 ^{bcd} ± 103.25
	650	1095.31 ^{bc} ± 107.97
	1300	1048.46 ^{ab} ± 47.54

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

ตัวอย่าง	กำลังวัตต์ (W)	ค่ามอดุลัส (MPa)
PP/CaCO ₃ -PA	0	1238.13 ^{efg} ± 12.17
	340	1296.65 ^s ± 13.30
	650	1283.23 ^{fgs} ± 22.94
	1300	1232.76 ^{efg} ± 24.91
PP/CaCO ₃ -SA	0	1137.32 ^{cdh} ± 66.32
	340	1239.03 ^{efg} ± 11.96
	650	1209.22 ^{efh} ± 44.78
	1300	1189.95 ^{deg} ± 39.86

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-h} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่าร้อยละในการยึดตัวสูงสุดของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	กำลังวัตต์ (W)	ค่าร้อยละในการยึดตัวสูงสุด
PP	0	9.32 ^{abc} ± 0.77
	340	7.12 ^{def} ± 0.62
	650	8.27 ^{afg} ± 1.26
	1300	7.41 ^{efg} ± 0.47
PP/CaCO ₃ -PA	0	6.14 ^{deh} ± 0.47
	340	7.27 ^{efg} ± 0.68
	650	5.68 ^{dh} ± 0.24
	1300	5.61 ^h ± 0.63
PP/CaCO ₃ -SA	0	10.33 ^c ± 2.35
	340	10.00 ^{bc} ± 0.60
	650	8.78 ^{abg} ± 1.94
	1300	7.57 ^{efg} ± 0.84

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-h} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. การทดสอบสมบัติการสกัดกั้นหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

4.1 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตารางผนวกที่ ฉ12 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตหลังการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	กำลังวัตต์ (W)	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน ($\times 10^{-17} \text{ m.m}^3/\text{s.m}^2.\text{Pa}$)	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ($\times 10^{-11} \text{ g.m/s.m}^2.\text{Pa}$)
PP	0	3.22 ^{ab} \pm 0.09	2.60 ^a \pm 0.04
	340	2.70 ^c \pm 0.05	2.19 ^b \pm 0.11
	650	3.08 ^{abd} \pm 0.08	2.11 ^{bc} \pm 0.00
	1300	3.22 ^b \pm 0.14	2.07 ^{bcd} \pm 0.05
PP/CaCO ₃ -PA	0	3.54 ^e \pm 0.01	2.21 ^b \pm 0.09
	340	3.02 ^{adf} \pm 0.12	2.33 ^b \pm 0.14
	650	3.12 ^{abd} \pm 0.07	2.18 ^b \pm 0.23
	1300	3.17 ^{abd} \pm 0.07	1.76 ^e \pm 0.08
PP/CaCO ₃ -SA	0	3.21 ^{ab} \pm 0.22	2.31 ^b \pm 0.19
	340	2.87 ^{cf} \pm 0.11	2.17 ^b \pm 0.06
	650	2.86 ^{cf} \pm 0.08	1.85 ^{cde} \pm 0.04
	1300	2.98 ^{df} \pm 0.08	1.82 ^{de} \pm 0.15

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-f} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวอาจารย์ ประดิษฐ์ธรรม
เกิดวันที่	15 พฤศจิกายน 2532
สถานที่เกิด	จันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีการบรรจุ) เกียรตินิยมอันดับสอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	1. Thanakkasaneer, S., A. Pradittham, D. Atong and C. Pechyen. 2012. Effect of Nano-Silica Loading on Barrier and Mechanical Properties of Food Packaging Based LLDPE Film. Advanced Materials Research 488-489: 919-922. 2. Pradittham, A., S. Trejitwattanukul, T. Sramanee, S. Thanakkasaneer, D. Atong and C. Pechyen. 2012. Preparation of LLDPE/ Modified Silica Nanoparticle with Triethoxyvinylsilane Film for Microwaveable Packaging. Advanced Materials Research 488-489: 1525-1529. 3. รางวัล Outstanding Student Award 2012 จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) 4. รางวัลนิสิตดีที่มีผลงานดีเด่นด้านความคิดสร้างสรรค์ และนวัตกรรม ภาคต้น ประจำปีการศึกษา 2555 5. Pradittham, A., N. Charitngam, S. Puttajan, D. Atong and C. Pechyen. 2013. Preparation of Polypropylene/Modified Calcium Carbonate with Stearic Acid Composite Films, pp. 589-595. <i>In Proceedings of 2nd Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science.</i> Chek Lap Kok, Hong Kong.

6. Pradittham, A., N. Charitngam, S. Puttajan, D. Atong and C. Pechyen. 2014. Surface Modified CaCO_3 by Palmitic Acid as Nucleating Agents for Polypropylene Film: Mechanical, Thermal and Physical Properties. **Energy Procedia** XX: 264-273.

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

1. ทุนสนับสนุนการศึกษาวิจัยเพื่อจัดทำปฏิญญานิพนธ์โครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2554
2. ทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2555
3. ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2555
4. ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2557 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
5. ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติของนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2557