



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

.....
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

.....
เทคโนโลยีการบรรจุ

.....
เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาภาชนะบรรจุไมโครเวฟของไอโซแทกติกพอลิพรีลีน/ไมโครเซลลูโลส
จากเศษผ้าฝ้ายและการสลายตัวจากรังสีแกมมา

Development of Microwavable Isotactic Polypropylene/Microcellulose from
Cotton Fabric Waste Packaging and Gamma Ray Attenuation

นามผู้วิจัย นายพงษ์พัฒน์ ศุขวัฒน์ะกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(อาจารย์ชिरาวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎุกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาภาชนะบรรจุไมโครเวฟของไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน/
ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย และการสลายตัวจากรังสีแกมมา

Development of Microwavable Isotactic Polypropylene/Microcellulose from
Cotton Fabric Waste Packaging and Gamma Ray Attenuation

โดย

นายพงษ์พัฒน์ สุขวัฒน์กุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
พ.ศ. 2556

พงษ์พัฒน์ สุขวัฒน์กุล 2556: การพัฒนาภาชนะบรรจุไมโครเวฟของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน/
ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายและการสลายตัวจากรังสีแกมมา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชิวราวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด. 115 หน้า

งานวิจัยนี้ได้นำเศษผ้าฝ้ายมาสกัดเป็นไมโครเซลลูโลสเพื่อประยุกต์ใช้ในการเตรียมถาดไอโซ
แทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสเป็นวัสดุบรรจุสำหรับไมโครเวฟ โดยแบ่งการทดลองออก
เป็น 2 ขั้นตอน (1) การสกัดไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริก (2) การผลิตเม็ดพลาสติก
คอมพอสิตของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณที่ต่างกัน คือ 5, 10 และ
20 phr ทั้งที่เติมและไม่เติมสารประสานมาเลอิคแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิพอพริลีน ขึ้นรูปถาดไอโซแทคติก
พอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ด้วยเครื่องฉีด พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานภายใต้
ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340, 650 และ 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที และการฉายรังสี
แกมมาในปริมาณที่ต่างกันคือ 10, 100 และ 1,000 kGy จากนั้นวิเคราะห์หุ้ผึ้งกัซัน เคมีพื้นผิว และสมบัติ
ของถาดที่เตรียมได้ พบว่า เคมีพื้นผิวของถาดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติม
พอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถเกิดอันตรกิริยาที่ดี
ระหว่างพื้นผิวของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนและไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr (ถาดไอโซแทคติกพอลิ
พอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส 20 phr ที่เติมพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ที่มีความ
เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ถาดมีลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาที่ดี มีค่าความต้านทานแรงกดอัด
และค่ามอดุลัสของถาดสูงสุด (ทั้งก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์
เป็นเวลา 2.5 นาที) มีเสถียรภาพเชิงความร้อนและเสถียรภาพเชิงผลึกที่เหมาะสมในการขึ้นรูปถาดรวมถึง
การใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ มีค่ามอดุลัสของหยดน้ำและหยดน้ำมันที่เหมาะสมในการใช้งาน
นอกจากนี้ ภายหลังกการฉายรังสีแกมมา พบว่า ถาดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส
20 phr ที่เติมพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ มีค่าความต้านทานแรงกดอัดและค่ามอดุลัสสูง
เพิ่มขึ้นสูงสุดหลังการฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 1,000 kGy โดยให้ผลการทดสอบที่ตรงข้ามกับการนำมา
อธิบายสมบัติเชิงกลที่ดีได้ เนื่องจากถาดเกิดการขาดออกและการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลของไอโซ
แทคติกพอลิพอพริลีน รวมถึงการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งพบระดับสูงสุดหลังฉายรังสีแกมมาใน
ปริมาณ 1,000 kGy โดยถาดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ที่
เติมพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมที่สุด
ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นถาดเพื่อภาชนะบรรจุสำหรับไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหารแช่เย็น

ลายมือชื่อนิสิิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pongpat Sukhavattanakul 2013: Development of Microwavable Isotactic Polypropylene/Microcellulose from Cotton Fabric Waste Packaging and Gamma Ray Attenuation. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Mr. Chiravoot Pechyen, Ph.D. 115 pages.

This work was used the microcellulose (MC) from cotton fabric waste for applied in preparing isotactic-polypropylene (i-PP) reinforced with MC unfilled and filled maleic anhydride graft polypropylene (MA-g-PP) tray for microwavable packaging materials. The experiment of this work was divided into 2 main steps. (1) Synthesis of MC from cotton fabric waste. (2) Preparation of composites of i-PP/MC and i-PP/MA-g-PP/MC which different MC quantities are 5, 10, and 20 phr by twin-screw extruder, tray-forming by injection molding and then performance testings by microwave oven that operated at 1300 watt for 2.5, 5 and 10 minutes and gamma radiation at different doses 10, 100 and 1,000 kGy. And then analysis of functional groups, surface chemical and properties of the prepared tray. Results indicated surface chemical of i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr presented improvement of interaction adhesion between i-PP matrix and microcellulose reinforcement phase lead to enhance good morphological properties. Therefore, the i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr tray presented the highest compressive strength and modulus (both before and after of microwave heating at 1300 watts for 2.5 minutes), presented suitable thermal and crystal stability for tray-forming production and usability in microwave oven, and presented contact angle of water and oil droplets appropriate to use. Moreover, results after gamma radiation indicated i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr presented the highest compressive strength and modulus after gamma radiation 1,000 kGy that exhibited two opposite trends, resulting in chain scission and cross-linking of the i-PP chain molecules and oxidative degradation, which showed the highest values at gamma radiation 1,000 kGy. i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr tray presented the optimal applied to microwavable trays in chilled food industry.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ในด้านการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้อง และกราบ ขอบพระคุณ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณแหล่งทุนที่ให้การสนับสนุนทำการวิจัย โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับ บัณฑิตศึกษาจากศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหารแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และทุน วิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ โดยการสนับสนุน จากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ นี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุก ท่านที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการดำเนินงาน ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า และขอบคุณเพื่อนๆ รวมถึงรุ่นพี่ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งผู้มีพระคุณที่มีได้เอื้อนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน ความห่วงใย ความช่วยเหลือ ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จ การศึกษา สำหรับความกรุณา ความเมตตา ความเข้าใจ ความช่วยเหลือที่มีให้ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอ มอบประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก่ครูอาจารย์ ผู้มีพระคุณ และผู้ที่สนใจทุกท่าน หาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขออภัยและขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

พงษ์พัฒน์ ศุขวิฒนะกุล
เมษายน 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	81
สรุป	81
ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การเตรียมสารที่ใช้ในขั้นตอนการสกัดไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย	91
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครเซลลูโลส และกรดไอโซแทคติก พอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส	94
ภาคผนวก ค การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และการ ขึ้นรูปกรดไอโซแทคติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์	96
ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ สมบัติทางความร้อน	99
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	106
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบต่างๆ และปริมาณของส่วนประกอบที่มีอยู่ในพืชชนิดต่างๆ	12
2	อัตราส่วนในการผสมเพื่อผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตและการขึ้นรูปภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย	31
3	กำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเตรียมภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส โดยการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	32
4	ตำแหน่งเลขคลื่นในหมู่ฟังก์ชันต่างๆของไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเศษผ้าฝ้าย	39
5	ตำแหน่งเลขคลื่นในหมู่ฟังก์ชันต่างๆของภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์	42
6	อุณหภูมิของส่วนต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนผสมไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์โดยกระบวนการอัดรีด	43
7	อุณหภูมิของส่วนต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปภาคพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์โดยกระบวนการอัดฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์	44
8	อุณหภูมิในการเกิดผลึก อุณหภูมิในการหลอมเหลว และร้อยละของผลึก	53
9	ลักษณะทางพื้นผิวของภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนและภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	60
10	ลักษณะทางพื้นผิวของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	61
11	สัณฐานวิทยาของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,250 เท่า	64
12	ค่าความแข็งของภาคก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	65
13	ค่าความแข็งของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	66
14	ค่าร้อยละความเป็นผลึกของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	75
15	ค่าความแข็งของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค1 อัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพริลีนกับไมโครเซลลูโลส ในหน่วยกรัม	97
จ1 ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสของภาคไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริม แรงด้วยไมโครเซลลูโลส	107
จ2 ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสของภาคไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริม แรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	108
จ3 ค่าความต้านทานแรงกดของภาคไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโคร เซลลูโลส ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	111
จ4 ค่ามอดุลัสของภาคไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	112
จ5 ค่าความต้านทานแรงกดของภาคไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโคร เซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	113
จ6 ค่ามอดุลัสของภาคไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	114

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิพอพริลีน	7
2	โครงสร้างของ MA-g-PP	10
3	ปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลส และ MA-g-PP	10
4	โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส โดยเส้นประแสดงพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุล	11
5	แผนผังวิธีการทอผ้าแบบใช้เครื่องจักร	13
6	ลักษณะของสกรูชนิดต่างๆ	15
7	เครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์	16
8	โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส	36
9	กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดในเซลลูโลส	36
10	สัณฐานวิทยาของผงไมโครเซลลูโลสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังกำลังขยายแตกต่างกัน (ก) 100 เท่า, (ข) 500 เท่า, (ค) 1000 เท่า และ (ง) 2,500 เท่า	37
11	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเศษผ้าฝ้าย	37
12	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) pure i-PP, (ง) i-PP/MC-20 phr และ (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	40
13	ค่าความต้านทานแรงกดของภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟ (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP /MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP /MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	44
14	ค่ามอดูลัสของภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟ (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP /MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	46
15	ค่าความต้านทานแรงกดของภาคหลังการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP /MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	48

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของภาค i-PP, i-PP/MC-20 phr และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่ใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน	49
17	ค่ามอดุลัสของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่ใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP/MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	51
18	เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของภาค i-PP, i-PP/MC-20 phr และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน	52
19	ขนาดผลึกของภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีนและภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	56
20	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีน (ก) และภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ข) ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ	57
21	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีน (ก), (ข) และ (ค) และภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ง), (จ) และ (ฉ) หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กําลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็น เวลา 2.5, 5 และ 10 นาที	58
22	สัณฐานวิทยาของภาคก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กําลังขยาย 1250 เท่า (ก) i-PP, (ข) i-PP/MC-5 phr, (ค) i-PP/MC-10 phr, (ง) i-PP/MC-20 phr, (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (ฉ) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (ช) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	63
23	ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับของภาค ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กําลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที	67
24	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) pure i-PP, (ง) i-PP/MC-20 phr และ (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	68
25	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ ก) MC, ข) MA-g-PP, ค) pure i-PP, (ง) i-PP/MC-20 phr และ (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของภาค i-PP และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ และผ่านการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 10 kGy, 100 kGy และ 1,000 kGy	71
27	เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของภาค i-PP และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ก่อน และ หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ และผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 10 kGy, 100 kGy และ 1,000 kGy	71
28	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) 1HA, (ง) G1HA, (จ) GG1HA และ (ฉ) GGG1HA	73
29	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) 1HA, (ง) G1HA, (จ) GG1HA และ (ฉ) GGG1HA	73
30	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของภาคไอโซแทกติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา 10 kGy ((ก), (ข) และ (ค)), 100 kGy ((ง), (จ) และ (ฉ)) และ 1,000 kGy ((ช), (ซ) และ (ฌ))	75
31	ค่ามัมสัมผัส (เซต้า) ของหยดน้ำที่ปกคลุมบนพื้นผิวของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	77
32	ค่ามัมสัมผัส (เซต้า) ของหยดน้ำมันที่ปกคลุมบนพื้นผิวของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	77
33	ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา	79

การพัฒนาภาชนะบรรจุไมโครเวฟของไอโซแทคติกพอลิพริลีน/ ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย และการสลายตัวจากรังสีแกมมา

Development of Microwavable Isotactic Polypropylene/Microcellulose from Cotton Fabric Waste Packaging and Gamma Ray Attenuation

คำนำ

ในปัจจุบันวิถีชีวิตของผู้บริโภคได้เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจาก ภาวะเร่งรีบ การทำงานหนักมากขึ้นหรือมีเวลาที่จำกัด ผู้บริโภคในปัจจุบันจึงไม่นิยมประกอบอาหารรับประทานให้เสียเวลา จึงทำให้เกิดแนวคิดการผลิตภัณฑอาหารสำเร็จรูปเพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มนี้ที่กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอาหารสำเร็จรูปมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น อาหารแช่เย็น อาหารกระป๋อง เป็นต้น ซึ่งปฏิเสธไม่ได้ว่าในปัจจุบันนี้อาหารแช่เย็นได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากยิ่งขึ้น ทั้งที่เป็นวัตถุดิบแช่เย็นหรืออาหารสำเร็จรูปแช่เย็นก็ตาม เพราะสามารถตอบสนองพฤติกรรมของผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไปได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้คุณสมบัติของอาหารแช่เย็นที่สะดวก รวดเร็ว สามารถคงคุณภาพของอาหารไว้ได้นาน ราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับ การซื้ออาหารรับประทานตามปกติ จึงเป็นเหตุทำให้ผู้คนหันมาบริโภคอาหารสำเร็จรูปกันมากขึ้น ส่งผลให้ตลาดอาหารแช่เย็นหรืออาหารกึ่งสำเร็จรูปมีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความสะดวกสบาย ในการรับประทานของผู้บริโภค โดยยังสามารถคงรสชาติเดิมของอาหาร และไม่เสียคุณค่าทางโภชนาการ

ภาชนะบรรจุที่นิยมใช้กับอาหารสำเร็จรูปมักผลิตจากพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น พลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน และพอลิพริลีน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการศึกษาพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดพอลิพริลีน เนื่องจากพอลิพริลีนมีคุณสมบัติเด่นมากมาย เช่น มีความต้านทานการหักงอ มีความต้านทานสารเคมี มีความทนแรงกระแทกได้ดีที่อุณหภูมิสูง มีเสถียรภาพต่อความร้อนสูง น้ำหนักเบา และราคาถูก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุอาหารสำเร็จรูปแช่เย็น อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกเกรดของพอลิเมอร์หรือการเลือกลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน จึงเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาครั้งนี้ เช่น การมีเสถียรภาพเชิงความร้อน สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการใช้งานด้วยตู้อบไมโครเวฟ เนื่องจากอาหารสำเร็จรูปแช่เย็นจำเป็นต้องผ่านการอบด้วยวิธีนี้จึงนำมารับประทานได้ ถึงแม้พลาสติกจะเป็นที่นิยมในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารในปัจจุบันจะมีความเหมาะสมหรือมีคุณสมบัติต่างๆ ที่ดีมากเพียงใด หากการใช้งานในหน้าที่การเป็นภาชนะบรรจุสิ้นสุดลงภาชนะบรรจุพลาสติกเหล่านี้ก็จะกลายเป็นเพียงขยะที่ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม รวมถึงปัญหาทางสังคมในด้านต่างๆ ตามมามากมาย ทำให้เกิดแนวคิดใหม่เกี่ยวกับการ

พัฒนาวัสดุที่ใช้ผลิตภาชนะบรรจุเหล่านี้ให้มีความสามารถในการย่อยสลายได้ในธรรมชาติหรือย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยใช้ระยะเวลาไม่นานซึ่งจะส่งผลต่อการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากมลพิษจากการเผาขยะ ลดปัญหาการกำจัดขยะ ลดปัญหาโลกร้อนซึ่งเกิดจากก๊าซพิษที่ได้จากการเผาขยะ เป็นต้น นอกจากนี้ได้มีการศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาเพื่อทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดการสลายตัวจากปริมาณรังสีที่ใช้ซึ่งให้ผลต่อสมบัติเชิงเคมี สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกายภาพที่แตกต่างกัน

จากข้อมูล และปัญหาที่เกี่ยวข้องกับภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจากพลาสติกดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษา ค้นคว้า ปรับปรุง และพัฒนาวัสดุประเภทพลาสติกเพื่อให้คุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารสำหรับไมโครเวฟ ในงานวิจัยนี้เลือกผลิตถาดพลาสติกจากไอโซแทคติกพอลิพอร์ลีน/ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย ศึกษาสมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงเคมี และ สมบัติเชิงกายภาพ ซึ่งมีความสำคัญต่อการไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตภาชนะบรรจุอาหารสำหรับไมโครเวฟรวมถึงความสามารถในการสลายตัวจากการฉายรังสีแกมมา เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานทางการบรรจุต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปถาดพลาสติกจากไอโซแทคติกพอลิพอฟรีลีน/ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย
2. ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและภาวะการใช้งานที่เหมาะสมของถาดพลาสติกที่ผลิตจากไอโซแทคติกพอลิพอฟรีลีน/ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายเพื่อการใช้งานกับตู้อบไมโครเวฟ
3. ศึกษาความสามารถในสลายตัวจากรังสีแกมมาของถาดพลาสติกที่ผลิตจากไอโซแทคติกพอลิพอฟรีลีน/ไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย

การตรวจเอกสาร

1. ภาชนะบรรจุอาหาร และการพัฒนาการบรรจุอาหาร

ภาชนะบรรจุอาหารนั้นต้องทำหน้าที่สำคัญต่างๆ เช่น การบรรจุ การคุ้มครอง และการถนอมรักษาผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงการสื่อสารข้อมูลบนภาชนะบรรจุ นอกจากนี้ยังต้องทำหน้าที่ทางการตลาดและอำนวยความสะดวกให้กับการจัดการผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้หน้าที่สำคัญทั้ง 2 นี้ ต้องมีความสมดุลของต้นทุนที่อาจเพิ่มขึ้นกับยอดขายที่ต้องการให้เพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตต้องพิจารณาโดยรอบคอบเพื่อไม่ทำให้เกิดการบรรจุที่ตีเกินไป (overpackaging) หรือการบรรจุที่ไม่เพียงพอ (underpackaging) ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตภาชนะบรรจุอาหารมีการพัฒนาการบรรจุอาหารมากขึ้นเนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีคุณลักษณะ และสมบัติที่แตกต่างกันทำให้เกิดการพัฒนา การค้นคว้าวิธีการบรรจุภาชนะบรรจุที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมในการใช้งาน ดังนั้นการศึกษา และการวิจัยเพื่อพัฒนาการบรรจุสำหรับอาหารจึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอาหารต้องทำอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างความได้เปรียบทางการค้า ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีรวมถึงความต้องการของตลาด และผู้บริโภค วัตถุประสงค์ในการพัฒนาการบรรจุอาหารที่สำคัญโดยทั่วไปมีดังนี้ เพื่อกำหนดระบบการบรรจุ คุณสมบัติและคุณลักษณะของภาชนะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ เพื่อปรับปรุงระบบการบรรจุและ/หรือภาชนะบรรจุของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอาหารควรให้ความสำคัญ การพัฒนาการบรรจุนี้จะต้องทำอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาการบรรจุสำหรับอาหาร มีดังต่อไปนี้

1.1 การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีซึ่งทำให้เกิดความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการแปรรูปและถนอมอาหาร ทำให้ต้องมีการบรรจุ และภาชนะบรรจุที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

1.2 ผู้บริโภคในปัจจุบันมีพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป ผู้บริโภคที่มีกำลังการซื้อจะให้ความสนใจต่อคุณภาพ และคุณค่าทางโภชนาการของอาหารที่บริโภค แนวโน้มความต้องการของผู้บริโภคจะนิยมอาหารที่มีคุณภาพใกล้เคียงอาหารสดมากยิ่งขึ้น มีการแปรรูปน้อยที่สุด (minimal process) และให้ความสะดวกในการจัดหา การอุ่น การปรุง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์

1.3 การค้นพบวัสดุใหม่ๆ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีวัสดุ กระบวนการผลิต กระบวนการบรรจุหรือการแปรรูปที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ได้วัสดุบรรจุและภาชนะบรรจุที่มีคุณสมบัติดีขึ้น และให้ความคุ้มครองกับผลิตภัณฑ์อาหารมากขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตอาหารจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนภาชนะบรรจุที่ใช้ให้ทันต่อความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น

1.4 การเปลี่ยนแปลงระบบการขนส่งและการจัดจำหน่ายในปัจจุบัน รวมถึงค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกระจายสินค้าจากผู้ผลิตไปสู่ผู้บริโภค ซึ่งเป็นต้นทุนสำคัญของอุตสาหกรรมจึงต้องมีการปรับปรุงเพื่อนำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุน

1.5 การใช้วัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยการเปลี่ยนวัสดุบรรจุ เปลี่ยนกระบวนการบรรจุ หรือเปลี่ยนแปลงมิติ ขนาด หรือรูปร่างของภาชนะบรรจุ

การปฏิบัติตามกฎหมายในประเทศต่างๆ ตามความเหมาะสมที่แตกต่างกันโดยเฉพาะประเทศอุตสาหกรรมจะมีกฎหมาย ระเบียบ และข้อบังคับทางการบรรจุที่ผู้ผลิตสินค้านำเข้าไปจำหน่ายทุกคนต้องปฏิบัติตามกฎหมาย ระเบียบ และข้อบังคับนี้จะมีการปรับปรุงแก้ไขอยู่เสมอ (งามทิพย์, 2550)

2. พลาสติก

พลาสติก ถือเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถหลอมขึ้นรูป (mould) และทำให้ไหล (flow) ได้ โดยการใช้ความร้อนหรือความดันหรือทั้ง 2 อย่างร่วมกันในกระบวนการการผลิต มีอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าการขึ้นรูปแก้วและโลหะมาก พอลิเมอร์บางประเภท เช่น เซลลูโลส โปรตีน ไม่จัดเป็นพลาสติกเนื่องจากไม่สามารถหลอมขึ้นรูปด้วยความร้อนหรือความดันหรือทั้ง 2 อย่างร่วมกันได้

พลาสติกที่ใช้ในการบรรจุแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ประเภทที่มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถละลายในตัวทำละลายบางชนิดได้ หากได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และหลอมเป็นของเหลวที่มีลักษณะเหนียว (viscous liquid) ที่อุณหภูมิสูงๆ และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำหรือเกิดการเย็นตัวลงก็สามารถแข็งตัวได้อีกครั้ง (rearden) ซึ่งการหลอมเหลว และการเย็นตัวนี้สามารถเกิดซ้ำไปซ้ำมาได้โดยที่ไม่ทำให้สมบัติทางเคมี และทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยที่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือได้รับความร้อน เป็นเช่นนี้เพราะมีเพียงพันธะทุติยภูมิระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์เท่านั้นที่ถูกทำลาย เนื่องจากความร้อนและความเครียดเฉือน (shear stress) ยิ่งอุณหภูมิสูงยิ่งส่งผลต่ออัตราการไหลของพอลิเมอร์ที่มากขึ้น และลดผลของพันธะทุติยภูมิให้น้อยลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อพอลิเมอร์เย็นตัวลงอัตราการไหลจะลดลงจนเกิดการแข็งตัวของพอลิเมอร์อีกครั้ง ทำให้พลาสติกประเภทนี้เมื่อผ่านการขึ้นรูปมาแล้วสามารถนำมาหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้อีก เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE), พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP), พอลิสไตรีน (polystyrene, PS), พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC), พอลิไวนิลอะซิเตต (polyvinyl acetate, PVA) และเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (ethylene vinyl alcohol, EVOH) เป็นต้น เป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมบรรจุ

เนื่องจากพลาสติกประเภทนี้สามารถขึ้นรูปได้โดยการฉีด (inject) พลาสติกในขณะที่ร้อน และอ่อนตัวเข้าไปในแม่แบบ ทำให้สามารถนำเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรมการบรรจุมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

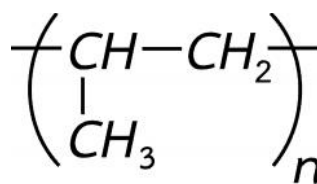
เทอร์โมเซต (thermoset) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ประเภทที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห ซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวในขั้นตอนแรกของการผลิตที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้ลักษณะโครงสร้างของเทอร์โมเซตจะมีเสถียรภาพมาก แต่ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกครั้งเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้ง และหากได้รับความร้อนสูงเกินไปจะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล ทำให้พลาสติกประเภทนี้เมื่อผ่านการขึ้นรูปแล้ว ไม่สามารถนำกลับมาหลอม และขึ้นรูปได้อีก เช่น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde), เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde), อีพ็อกซี (Epoxy) และ พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นต้น ส่วนมากนิยมใช้เป็นแล็กเกอร์เคลือบกระป๋อง (can lacquer) ผลิตฝาขวด (closure) วัสดุกันกระแทก (cushioning) กาว รวมไปถึงเครื่องใช้ภายในครัวเรือน

เมื่อเทียบกับแก้ว กระจก และโลหะแล้ว พลาสติกสังเคราะห์ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ใช้ในการบรรจุที่มีความใหม่กว่า อีกทั้งพลาสติกก็ยังมีบทบาทสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมการบรรจุ และปริมาณการผลิต การใช้งานของพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากพลาสติกมีข้อดีหลายประการ ดังนี้

- สามารถปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการใช้งานได้ง่ายด้วยของพลาสติกสมบัติที่มีหลากหลาย
- สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายวิธี มีความสะดวกรวดเร็ว และได้รูปทรงตามต้องการ
- มีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูงเหมาะสมกับการใช้งาน
- อุตสาหกรรมการบรรจุมีเทคโนโลยีด้านการผลิตพลาสติกก้าวหน้ารวดเร็วมาก ทำให้มีพลาสติกชนิดใหม่ๆ ที่มีสมบัติดีขึ้น และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้มากขึ้น
- สามารถใช้งานร่วมกับวัสดุชนิดอื่นๆ ได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนการผลิต ประหยัดวัตถุดิบ หากเทียบกับวัสดุอื่นๆ พลาสติกมีราคาค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังสามารถผลิตวัสดุให้มีสมบัติตามต้องการแบบที่ต้องการได้ง่าย (งามทิพย์, 2550; เสาวรจน์, ม.ป.ป)

3. พอลิพพริลีน (polypropylene, PP)

พอลิพพริลีนจัดเป็นพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน และนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมการบรรจุ ผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์พพริลีน มีทั้งชนิดโฮโมพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ สูตรโครงสร้างโมเลกุลของโฮโมพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 1 การจัดเรียงตัวของ (-CH₃) ในโครงสร้าง 3 มิติของสายโซ่โมเลกุล สามารถเกิดได้ 3 แบบ ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิพพริลีน ดังนี้



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิพอพริลีน

- อะแทคติกพอลิพอพริลีน (atactic polypropylene) คือ PP ที่มีหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ โดยตำแหน่งของหมู่เมทิลที่เกาะอยู่กับอะตอมคาร์บอนมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม พอลิพอพริลีนประเภทนี้จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) โดยมีลักษณะเป็นยางเหนียว จึงไม่นิยมใช้งานทางการบรรจุ
- ซินดีโอแทคติกพอลิพอพริลีน (syndiotactic polypropylene) คือ PP ที่มี $-\text{CH}_3$ เรียงตัวเป็นระเบียบ โดยตำแหน่งของ $-\text{CH}_3$ ที่เกาะอยู่กับอะตอมคาร์บอนจะอยู่สลับด้านกันของโซ่โมเลกุล จึงสามารถเกิดผลึกได้บ้างแต่สมบัติทางการบรรจุด้อยกว่า ไอโซแทคติก พอลิพอพริลีน
- ไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน (isotactic polypropylene) คือ PP ที่มี $-\text{CH}_3$ เรียงตัวเป็นระเบียบ โดยตำแหน่งของ $-\text{CH}_3$ ที่เกาะอยู่กับอะตอมคาร์บอนจะอยู่ด้านเดียวกันของ โซ่โมเลกุล ทำให้สามารถเกิดผลึกได้ง่าย และเหมาะกับการนำมาใช้งานทางการบรรจุ

ในการผลิต PP ที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทคติกเป็นสิ่งที่ผู้ผลิตมีความต้องการสูง เพราะทำให้ PP มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรง ความแข็งตึง และความสามารถในการทนความร้อนสูงขึ้น เป็นต้น $-\text{CH}_3$ ในโครงสร้างของ PP มีขนาดใหญ่กว่าไฮโดรเจนอะตอมใน PE ทำให้มีการเรียงตัวในโครงสร้างผลึกไม่หนาแน่นมาก จึงทำให้ PP มีความหนาแน่นต่ำกว่า PE โดย PP มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.89-0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมบัติเด่นของ PP ที่ทำให้มีการใช้งานทางการบรรจุมาก ได้แก่ ความแข็งตึงสูง (high stiffness) เหมาะกับการผลิตฝาขวดน้ำพลาสติก เนื่องจากความสามารถในการคงรูปและทนทานต่อแรงบิดในการเปิด-ปิดได้ดี ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีความเค้นสูง (environment stress crack resistance, ESCR) จึงส่งผลให้เหมาะกับการใช้ผลิตขวดบรรจุเคมีภัณฑ์ น้ำยาทำความสะอาด และอาหารที่มีไขมันได้ อีกทั้ง PP ยังมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า HDPE จึงเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 121 องศาเซลเซียส) เช่น ภาชนะบรรจุสำหรับอุ่นอาหารในตู้อบไมโครเวฟ เป็นต้น

โพลิเมอร์พอลิพอพริลีน ที่นิยมใช้ทางการบรรจุคือ ไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน ซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์พอลิพอพริลีนโดยใช้ปฏิกิริยาซีเกลอ-นัตตา (Ziegler-Natta Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการจัดเรียงตัวเพื่อความเป็นระเบียบทำให้เกิดผลึกได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ PP ที่ได้ยังมีลักษณะที่ดี คือเป็นเม็ดกลมซึ่งไม่ต้องผ่านขั้นตอนการตัดเป็นเม็ด การใช้งานทางการบรรจุในปัจจุบันของ PP กับ HDPE มีความคล้ายคลึงกันมาก เนื่องจากสมบัติที่สำคัญของ PP มีความใกล้เคียงกันกับ HDPE โดยสมบัติที่สำคัญของ PP ที่มีความใกล้เคียงกันกับ HDPE ได้แก่

- มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า (จุดหลอมเหลวของ PP มีค่าในช่วง 160-175 องศาเซลเซียส)
- มีความแข็งตึงสูงกว่าจึงเหมาะกับการจัดระเบียบโมเลกุล (orientation)
- มีความใสสูงกว่าเนื่องจากความเป็นผลึกต่ำกว่า
- มีความหนาแน่นต่ำกว่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.89-0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- สามารถต้านทานการซึมผ่านของไขมัน และน้ำมันได้ดีกว่า
- สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่าเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความร้อน และแสง
- มีความทนต่อแรงตึงสูงกว่า
- มีความใสมากกว่า
- มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และออกซิเจนต่ำกว่า
- มีค่า ESCR สูงกว่า (งามทิพย์, 2550; เสาวรจน์, ม.ป.ป)

4. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (polymer additives)

ปัจจุบันการนำเอาพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไปผลิตเพื่อการขึ้นรูปหรือใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เลยนั้นไม่นิยมหรือทำได้น้อย เพราะโดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตนิยมนำพอลิเมอร์มาผสมกับสารชนิดอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงหรือเสริมให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มความคงทนต่อการใช้งานมากขึ้น เพิ่มความเหมาะสมกับกระบวนการผลิต ส่วนสารชนิดอื่นที่ผสมลงไปนั้น เรียกว่า สารเติมแต่ง (additives) การผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปในพอลิเมอร์ เราจะเรียกการผสมสารเติมแต่งนี้ว่า พอลิเมอร์คอมพาวด์ดิ้ง (polymer compounding) ในการเติมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์นั้นจะต้องทำให้สารเติมแต่งกระจายตัวในพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้สารเติมแต่งที่ใช้ใส่ใน พอลิเมอร์ ควรจะมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีความเสถียรภายใต้สภาวะการขึ้นรูป
- มีความเสถียรภายใต้สภาวะการใช้งาน
- มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำมาใช้งาน
- มีราคาถูกหรือสมเหตุสมผล
- ไม่เกิดการคายสี (bleeding) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสารเติมแต่งสามารถละลายได้ทั้งในพอลิเมอร์และในวัสดุข้างเคียงที่อาจจะเป็นของเหลวหรือของแข็ง เป็นผลทำให้วัสดุนั้นเกิดรอยเปื้อนหรือสีได้
- ไม่ทำลายสมบัติของพอลิเมอร์
- ไม่ทำให้เกิดกลิ่น รส และพิษ

ชนิดของสารเติมแต่ง มีทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ แต่หากจำแนกตามลักษณะหรือสถานะทางกายภาพจะได้ 4 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ยาง ของเหลว และแก๊ส นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกตามหน้าที่ในการนำมาใช้งานได้หลายประเภท ดังนี้

- สารดัดแปรสมบัติเชิงเคมี (chemical property modifiers)
- สารดัดแปรสมบัติเชิงกล (mechanical property modifiers)
- สารดัดแปรเพื่อความสวยงาม (aesthetic property modifiers)
- สารดัดแปรสมบัติของพื้นผิว (surface property modifiers)
- สารดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต (processing modifiers)

ในการนำสารเติมแต่งบางชนิด เช่น ฟิลเลอร์ (fillers) หรือเส้นใยเสริมแรง (reinforcing fibers) ไปผสมกับพอลิเมอร์นั้นไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ แต่มีสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ เช่น สารกันออกซิเดชัน (antioxidant) สารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี (UV stabilizer) เนื่องจากสามารถละลายในพอลิเมอร์ได้อย่างสมบูรณ์

เส้นใยเสริมแรง มักนำไปผสมในพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) ให้กับพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกวาสอดผสมนี้ว่า วัสดุเชิงประกอบหรือคอมพอสิต (composite) นอกจากนี้ยังใช้เรียกวาสอดผสมระหว่างพอลิเมอร์ และฟิลเลอร์อีกด้วย โดยปกติผู้ผลิตมักปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยเสริมแรงด้วยสารประสาน (coupling agents or bridging agent) เพื่อสร้างการยึดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะโคเวเลนต์หรือพันธะทุติยภูมิเชื่อมเอาไว้ ส่วนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยเทอร์โมพลาสติก ฟิลเลอร์ และสารเสริมแรง ซึ่งปกติมักเป็นเส้นใยที่เรียกว่า reinforced thermoplastics (อรอุษา, 2546)

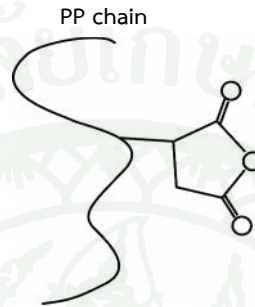
5. สารประสาน (coupling agents)

ในการผลิตคอมพอสิต โดยทั่วไปถ้าทำให้ฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงกระจายตัวหรือสามารถยึดเกาะกันกับพอลิเมอร์ได้ดี จะทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้ คอมพอสิตที่ได้จะมีสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งนี้การปรับปรุงการยึดเกาะกันของพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงสามารถใช้สารเติมแต่งที่เรียกว่า สารประสานหรือสารช่วยยึด ซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวกลางหรือสะพานเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง ทำให้เกิดการสร้างพันธะที่แข็งแรงขึ้นระหว่างเฟสทั้งสอง ช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้น

โดยทั่วไปพบการใช้สารประสานอยู่ 2 วิธี คือ

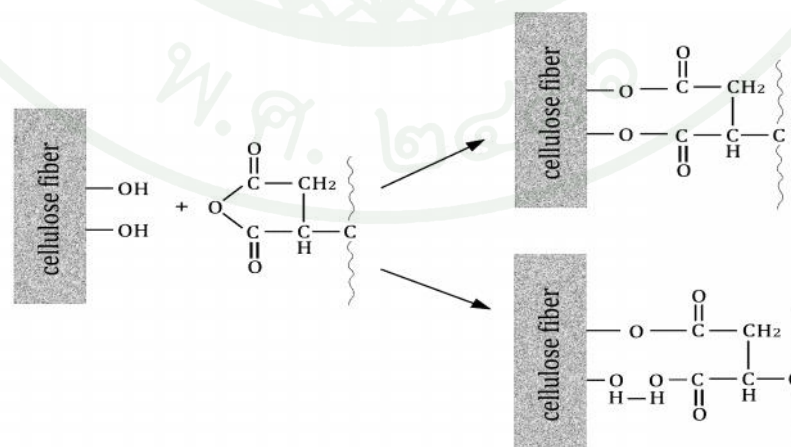
1. นำสารประสานไปเคลือบเพื่อปรับแต่งพื้นที่ผิวของฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงจากนั้นจึงนำไปผสมกับพอลิเมอร์
2. นำสารประสานไปผสมกับพอลิเมอร์โดยตรงในระหว่างกระบวนการคอมพาวด์ดิง

พอลิพริสทินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (polypropylene-graft-maleic anhydride, MA-g-PP) เป็นสารประสานชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กับเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีขั้ว เช่น PP และ PE เพื่อให้ฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงเกิดการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วเหล่านี้ได้ดีขึ้น MA-g-PP สังเคราะห์ได้จากการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่ของ PP ซึ่งเป็นการทำให้เกิดอนุมูลอิสระหรือฟรีแรดิคัล (free-radical) บนสายโซ่ของ PP ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างของ MA-g-PP

นอกจาก MA-g-PP จะสามารถใช้เป็นสารประสานระหว่างพอลิโอเลฟินส์ และฟิลเลอร์ชนิดอินทรีย์แล้ว MA-g-PP ยังสามารถใช้เป็นสารประสานระหว่างพอลิโอเลฟินส์กับเส้นใยเซลลูโลสหรือฟิลเลอร์ชนิดอินทรีย์ได้อีกด้วย ตัวอย่างของฟิลเลอร์อินทรีย์ เช่น แป้ง ผงไม้ เป็นต้น โดยปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับ MA-g-PP แสดงดังภาพที่ 3 นอกจากนี้ MA-g-PP ยังสามารถนำไปใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ในการผลิตพอลิเมอร์ผสม (polymer blend or polyblend or polymer alloy) ระหว่างพอลิโอเลฟินส์ และพอลิโอไมด์หรือพอลิเมอร์ที่มีขั้วชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วย (อรอุษา, 2546)

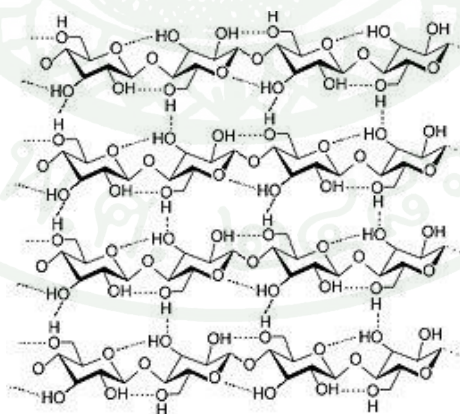


ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและ MA-g-PP

6. เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมาก และเป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ เป็นวัสดุดิบที่สามารถทดแทนขึ้นมาใหม่ได้ โดยเซลลูโลสมีพบมากที่บริเวณผนังเซลล์ของพืชทั่วไป และยังสามารถพบได้ในไม้ที่เป็นส่วนลำต้นของพืช ในตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆ ของพืช รวมทั้งปริมาณของส่วนประกอบซึ่งจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบหลักของพืชทุกชนิดคือ เซลลูโลสซึ่งมีปริมาณสูงที่สุดในบรรดาองค์ประกอบต่างๆ แต่ปริมาณของเซลลูโลสในพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณแตกต่างกัน

เซลลูโลสจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดจากหน่วยย่อยของแอนไฮโดรกลูโคไพราโนส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิก โดยเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ที่ไม่มีกิ่งก้านสาขา นอกจากนี้เซลลูโลสยังจัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ เนื่องจากมีหน่วยย่อยชนิดเดียวคือ โมเลกุลของเบต้า-กลูโคส สูตรเคมีของเซลลูโลสคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยค่า n คือ ค่าระดับขั้นของการเกิดพอลิเมอร์ ดังนั้นในหน่วยกลูโคสของพอลิเมอร์ ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา 3 หมู่ โดยจะต่อกับคาร์บอนอะตอมอยู่ตำแหน่ง 2, 3 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงมาก และเนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างสายโซ่โมเลกุล ดังภาพที่ 4 ส่งผลให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกมาก จึงมีความแข็งแรงมากทำให้มีสมบัติการละลายต่ำ อาจเพียงแค่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายบางชนิด และไม่สามารถนำไปขึ้นรูปได้เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมเหลวของเซลลูโลสจะสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว เป็นผลให้จำเป็นต้องมีการตัดแปรเซลลูโลสก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อลดปริมาณพันธะของไฮโดรเจนลง ซึ่งจะทำให้ความสามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปได้มากขึ้นและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปได้



ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส โดยเส้นประแสดงพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุล

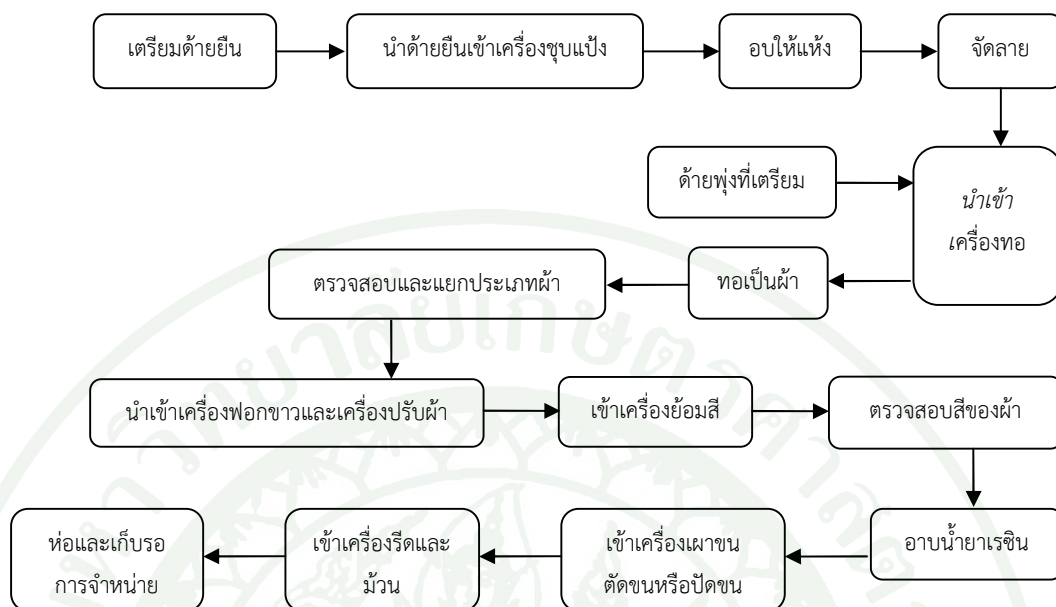
ที่มา: Laghi (2007)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบต่างๆ และปริมาณของส่วนประกอบที่มีอยู่ในพีชชนิดต่างๆ

แหล่งที่พบ	ส่วนประกอบ (ปริมาณร้อยละ)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
เปลือกข้าวโพด	38-40	28	7-21
ใบสับปะรด	70-82	18	5-12
กามมะพร้าว	36-43	0.15-0.25	41-45
ชานอ้อย	32-48	19-24	23-32
กล้วย	60-65	6-8	5-10
ฟางข้าวสาลี	33-38	26-32	17-19
ฟางข้าว	28-36	23-28	12-14
ข้าวฟ่าง	27	25	11
ฟางข้าวบาร์เลย์	31-45	27-38	14-19

ที่มา: ชีราวุฒิ (2553)

โดยทั่วไปมักใช้เซลลูโลสที่มีอยู่ในธรรมชาติในรูปแบบเส้นใยในอุตสาหกรรมปั่นด้ายและทอผ้า ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการผลิตวัตถุดิบเพื่อนำมาใช้ตัดเย็บเป็นเครื่องนุ่งห่ม โดยผ้าที่มีการใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด คือ ผ้าฝ้าย โดยผ้าฝ้ายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากฝ้ายธรรมชาติ โดยเส้นใยฝ้ายจะเจริญขึ้นจากเมล็ด แต่ละเมล็ดให้เส้นใยได้กว่า 20,000 เส้น เมื่อปุ๋ยฝ้ายสุกอมก็จะเบ่งบาน และเปิดออกมองเห็นเส้นใยเป็นปุย แล้วก็เก็บเกี่ยวปุยฝ้ายมาทำการแยกเส้นใยฝ้าย เป็นเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง เมื่อฟอกย้อม และลงแป้งเรียบร้อยแล้วจะกรอเข้าหลอดด้าย จากนั้นจึงนำมาเข้าเครื่องทอรวมกันออกมาเป็นผืนผ้า นำผ้าที่ทอออกมาไปตรวจความเรียบร้อยและแยกประเภทของผ้าตามชนิดของเส้นด้ายที่ใช้ทอเพื่อสะดวกในการย้อมสี จากนั้นนำผ้าไปเข้าเครื่องฟอกให้สะอาดและเป็นสีขาวด้วยสบู่ แล้วผ่านเข้าเครื่องอบแห้ง หลังจากนั้นผ้าจะผ่านเข้าเครื่องปรับผ้าเพื่อให้ผ้าอยู่ตัวไม่ยืดไม่หดในอุณหภูมิประมาณ 230 องศาเซลเซียส นำผ้าที่ปรับแล้วไปเข้าเครื่องย้อมสี ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เครื่องชนิดที่มีแรงดันสูง (high pressure) แล้วตรวจสอบสีผ้า หลังจากนั้นจะนำไปอาบน้ำยาเรซินเพื่อกันแมลง นำไปเข้าเครื่องเผาขนผ้าหรือปัดขนผ้าให้ฟู เข้าเครื่องรีด ตัด แล้วม้วนเพื่อนำไปทอและเก็บ รอการจำหน่ายต่อไป โดยในขั้นตอนก่อนที่จะม้วนผ้า นั้นจะต้องตัดขอบให้เรียบร้อยก่อนซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดขยะขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมทอผ้า นั่นก็คือเศษผ้าที่ตัดทิ้ง ซึ่งเศษผ้าเหล่านั้นก็



ภาพที่ 5 แผนผังวิธีการทอผ้าแบบใช้เครื่องจักร

ที่มา: รายงานสภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมเฉพาะประเภท:อุตสาหกรรมปั่นด้าย-ทอผ้า (ม.ป.ป.)

ยังคงเป็นเซลลูโลส จึงสามารถใช้ประโยชน์จากความแข็งแรงของเส้นใยเซลลูโลสที่เหลือเหล่านั้นได้ โดยเส้นใยเซลลูโลสมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์มาก ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมเพื่อลดเนื้อพลาสติกในการใช้ลง เป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และใช้เป็นสารเสริมแรง เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ (อัจฉราพร และชิงเงร, 2520; วีระศักดิ์, 2543; ชีราวุฒิ, 2553; รายงานสภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมเฉพาะประเภท: อุตสาหกรรมปั่นด้าย-ทอผ้า, ม.ป.ป.)

7. กระบวนการอัดรีด (extrusion processes)

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญ และขาดไม่ได้ของอุตสาหกรรมพลาสติกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปจะนิยามกระบวนการแปรรูปชนิดนี้ว่าเป็น การทำให้วัสดุมีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยการอัดพลาสติกหลอมไหลผ่านหัวดายที่มีรูปร่างที่เหมาะสม การแปรรูปพลาสติกโดยการอัดรีดจัดเป็นกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (continuous process) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finished product) ที่ต้องนำไปเข้ากระบวนการขั้นตอนต่อไป เพื่อผลิตเป็นชิ้นงานขั้นสุดท้าย (finished product) ก่อนจะนำไปใช้งาน นอกจากอุตสาหกรรมการแปรรูปและการผลิตพอลิเมอร์แล้ว ยังพบการใช้เทคนิคการอัดรีดในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ฝาจุพลาสติก ด้ามแปรงสีฟัน ของเด็กเล่น กระดาษต้นไม้ เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

กระบวนการอัดรีดเทอร์โมพลาสติก ผลิตโดยการให้พลาสติกผง (powder) หรือเม็ด (pellets) หลอมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการให้อุณหภูมิสูง แล้วผลักดันพลาสติกหลอมโดยการหมุนของสกรูให้ผ่านหัวตาย ที่มีรูปร่างตามลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการผลิต พลาสติกหลอมจะเริ่มแข็งตัวเมื่อออกจากหัวตาย เนื่องจากอุณหภูมิลดต่ำลงจากขั้นตอนการหล่อเย็น นอกจากการอัดรีดเทอร์โมพลาสติกแล้ว การอัดรีดที่ยังไม่วัลคาไนซ์ และพลาสติกที่อยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตบางตัว ก็สามารถกระทำได้ แต่พอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซตจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เนื่องจากความร้อนในขณะที่ทำการอัดรีด ส่งผลทำให้ไม่สามารถหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ได้

กระบวนการอัดรีดสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกในรูปแบบต่างๆ เช่น ท่อขนาดเล็ก (tube) ท่อขนาดกลางและใหญ่ (pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) ฟิล์มพลาสติก (film) ผลิตเส้นใย (fiber) และชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโพรไฟล์ (profiles) รูปแบบต่างๆ ทั้งนี้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็น profiles หมายถึง ชิ้นงานจากกระบวนการอัดรีดที่เป็นโพรไฟล์ในเทคโนโลยียาง และพลาสติก ซึ่งรวมถึงผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดแบบกึ่งสำเร็จรูปทั้งหมด ยกเว้นกลุ่มของชิ้นงานที่ผลิตจากตายรูปวงแหวนในกรณีผลิตท่อ ตายที่มีทางออกเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยม ตายสำหรับผลิตแผ่นและฟิล์มพลาสติก และตายกลมซึ่งใช้ในการผลิตแท่งพลาสติกที่มีลักษณะกลม

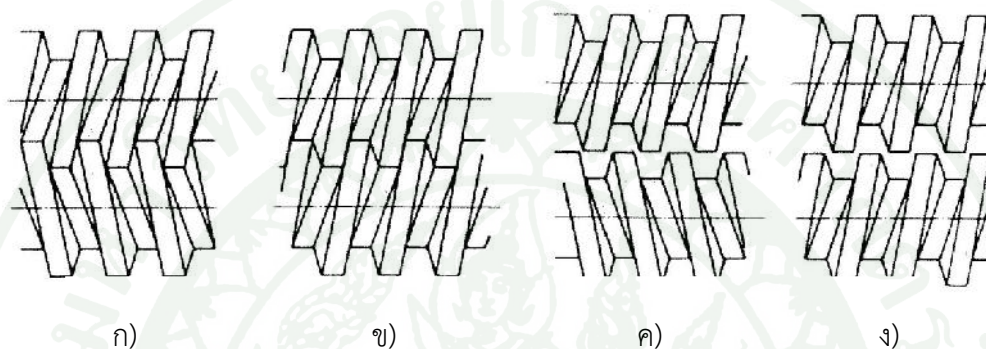
เครื่องอัดรีดนอกจากจะมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการแปรรูปหรือการผลิตพลาสติกแล้วยังมีความสำคัญในการใช้เป็นเครื่องผสมเพื่อเตรียมเม็ดเรซินผสม (compound resins) โดยการผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง และสารตัวเติมชนิดต่างๆเข้าด้วยกัน เพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการแปรรูปโดยเทคนิคต่างๆ (เสาวรจน์, ม.ป.ป.)

เครื่องอัดรีดสกรูคู่

เครื่องอัดรีดสกรูคู่เป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรู 2 ตัว อยู่ภายในกระบอกเดียวกันซึ่งมีลักษณะเป็นภาพตัดขวางรูปเลขแปด มีการแบ่งเครื่องอัดรีดสกรูคู่ตามทิศทางการหมุน และระดับของการอินเทอร์เมท (intermeshing) ของสกรูคู่ ซึ่งหมายถึงการหมุนของสกรูในลักษณะที่สัมผัสของสกรูตัวหนึ่งแทรกตัวอยู่ในร่องเกลียวของสกรูอีกตัวหนึ่ง โดยทิศทางการหมุนของสกรูของเครื่องอัดรีดสกรูคู่สามารถหมุนได้สองลักษณะ คือ แบบแรกหมุนในทิศตรงกันข้ามกันหรือหมุนสวนทางกัน (counter-rotating) และแบบที่สองหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating) ส่วนระดับการอินเทอร์เมทของการหมุนของสกรู สามารถแบ่งเป็นลักษณะต่างๆ คือ การอินเทอร์เมทเต็ม (fully intermeshing) การอินเทอร์เมทบางส่วน (partially intermeshing) และ การหมุนแบบไม่อินเทอร์เมท ตัวอย่างลักษณะการหมุนแบบต่างๆของสกรู แสดงดังภาพที่ 6

การหมุนของสกรูในสกรูที่มีทิศทางการหมุนสวนทางกัน จะทำให้วัสดุถูกดันให้เข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุน ทำให้เกิดการสะสมวัสดุ (bank) ระหว่างสกรูทั้งสองคล้ายๆ กับลักษณะของการบดผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ในขณะที่สกรูกำลังหมุนจะมีวัสดุที่กำลังผสมจำนวน

หนึ่งไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างระหว่างสกรูทั้งสองอันได้ แต่จะมีส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ถูกกักเอาไว้ เนื่องจากการอินเทอร์เมท วัสดุที่ไหลผ่านช่องว่างจะมีความเค้นสูงมาก ดังนั้นการปรับระดับของการอินเทอร์เมทหรือระยะห่างระหว่างสกรูทั้งสองตัว จะสามารถใช้เป็นตัวกำหนดระดับความเค้นของวัสดุได้ กล่าวคือ ถ้าสกรูมีระยะห่างระหว่างกันใกล้กันมาก วัสดุก็จะมีความเค้นสูงมาก และมีช่องว่าง (blank) ขนาดใหญ่สะสมระหว่างสกรูทั้งสอง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของช่องว่างไปข้างหน้า เนื่องจากการหมุนของสกรู ทำให้เกิดการส่งพลาสติกเข้าสู่หัวตาย



ภาพที่ 6 ลักษณะของสกรูคู่ชนิดต่างๆ ก) ชนิดหมุนสวนทางกันและมีการอินเทอร์เมท, ข) ชนิดหมุนในทิศทางเดียวกันและมีการอินเทอร์เมท, ค) ชนิดหมุนสวนทางกันและไม่มีอินเทอร์เมท และ ง) ชนิดหมุนในทิศทางเดียวกันและไม่มีอินเทอร์เมท

ที่มา: เจริญ (2542)

การหมุนของสกรูในทิศทางเดียวกัน สกรูจะหมุนให้วัสดุเคลื่อนที่จากสกรูตัวแรกแล้วส่งผ่านไปยังสกรูตัวที่สอง โดยไม่เกิดช่องว่างที่ระหว่างสกรูทั้งสองตัว ทำให้วัสดุไหลเป็นลักษณะเส้นทางการไหลเป็นรูปเลขแปด ตลอดความยาวของกระบอก ซึ่งข้อดีของการไหลในสกรูชนิดนี้ คือ พอลิเมอร์ในกระบอกจะได้รับความเค้นใกล้เคียงกัน และควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้สามารถออกแบบให้สกรูทำความสะอาดตัวเองได้ดีกว่า (self-wiping) ซึ่งนอกจากทำให้สกรูสะอาดตัวเองได้แล้ว สิ่งสำคัญที่สุดคือจะทำให้การควบคุมกระจายตัวของเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องอัดรีด (residence time distribution) ได้ดีกว่าสกรูแบบอื่นๆ (เจริญ, 2542)

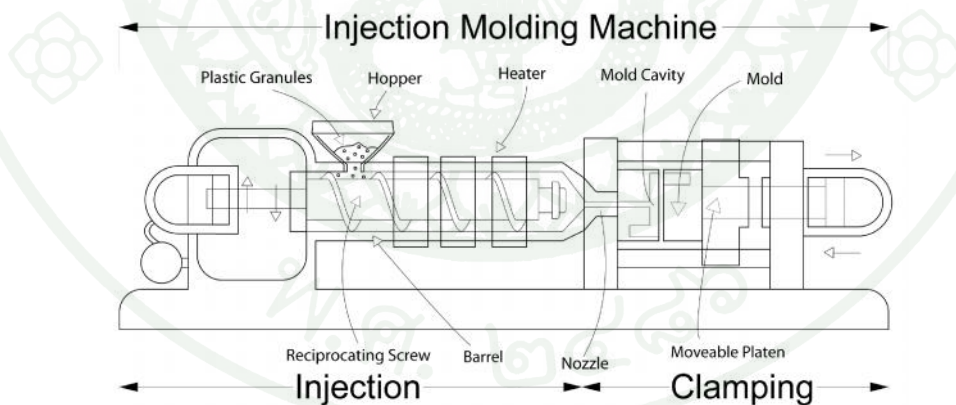
8. การฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ (injection molding)

วิธีการฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์นิยมผลิตคอมพอสิตจากที่มีส่วนเสริมแรง (reinforcement) เป็นเส้นใยเส้นที่มีรูปร่างซับซ้อน และนิยมใช้กับเมทริกซ์ (matrix) ชนิดเทอร์โมพลาสติกมากกว่าเทอร์โมเซต ในปัจจุบันจะพบวิธีการฉีดขึ้นรูปอย่างแพร่หลาย ซึ่งนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า ฯลฯ เครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์มีส่วนประกอบต่างๆ ที่ซับซ้อน โดยมีหน้าที่ในแต่ละส่วนแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 7

ในการผลิตคอมพอลิซิทเทอร์โมพลาสติก วัสดุผสมของเส้นใยสั้นและพอลิเมอร์ในรูปเม็ดหรือผงจะถูกส่งเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูป (injection molding machine) ที่ฮอปเปอร์หรือกรวยใส่ (hopper) และไหลผ่านเข้าไปยังบาร์เรล (barrel) ที่ร้อน ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์นิ่มตัวและกลายเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลได้ พอลิเมอร์และเส้นใยสั้นจะถูกส่งต่อไปสะสมที่ส่วนหน้าของเครื่องโดยการหมุนของสกรูหรือเกลียวทวน (screw) ในจังหวะฉีดสกรูจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เกิดความดันสูงผลักดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวผสมเส้นใยสั้นไหลเข้าช่องแคบเล็กๆเข้าไปยังแม่แบบ (mold) จนเต็ม จากนั้นก็จะรอให้พอลิเมอร์คอมพอลิซิทเทอร์โมพลาสติกเย็นตัวจนกลายเป็นของแข็ง แล้วระบบจะฉีดตัว (eject) ก็จะทำให้คอมพอลิซิทเทอร์โมพลาสติกหลุดออกจากแม่แบบ จากนั้นแม่แบบก็จะปิดแล้วระบบการฉีดจะทำงานซ้ำใหม่ รอบการทำงานฉีดขึ้นรูป

ในการผลิตคอมพอลิซิทเทอร์โมเซตโดยการฉีดขึ้นรูปจะใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปที่แตกต่างกันออกไปจากเครื่องฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก ข้อแตกต่างของเครื่องฉีดขึ้นรูปคือ

- ส่วนฉีด (injection unit) จะต้องมีระบบระบายความร้อนพร้อมกับมีระบบให้ความร้อนเนื่องจากส่วนที่ฉีดจะต้องควบคุมอุณหภูมิของของผสมเทอร์โมเซตเรซินกับเส้นใยสั้นไม่ให้สูงเกินไปจนเกิดการเชื่อมโยงก่อนเข้าไปในแม่แบบ และทำให้ของผสมมีความหนืดที่พอเหมาะ
- แม่แบบ จะต้องมีระบบให้ความร้อน เพื่อเชื่อมโยงเทอร์โมเซตให้แข็งตัว แทนที่จะเป็นระบบให้ความเย็นเพื่อให้แข็งตัวในเทอร์โมพลาสติก (อิทธิพล, 2544)



ภาพที่ 7 เครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

ที่มา: Brockey (2009)

9. ตู้อบไมโครเวฟ (microwave oven)

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องไมโครเวฟ

แมกนีตรอน (magnetron) ถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากของเครื่องไมโครเวฟเกือบทุกชนิด เพราะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะไปกระตุ้นให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นได้ แมกนีตรอนมีโครงสร้างที่ผลิตจากแม่เหล็กหุ้มด้วยขั้วไฟฟ้า (electrode) วั 2 อัน ซึ่งประกอบด้วยแท่งแคโทด (cathode) ซึ่งจะทำหน้าที่ปลดปล่อยเทอร์โมอิเล็กตรอน (thermionic electron) โดยวางที่ตำแหน่งตรงกลางและล้อมด้วยแท่งแอโนด และแท่งแอโนด (anode) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งผลิตจากทองแดงที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี โดยทำหน้าที่กำหนดดวงจรของไมโครเวฟ และระหว่างแท่งแคโทด และแท่งแอโนดจะมีช่องว่างซึ่งเรียกว่า เรโซแนนท์แควิตี (resonant cavity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันหรือประสานสัมพันธ์กัน จะกระทั่งเกิดเป็นกลุ่มก้อนของอิเล็กตรอนที่หมุนตัวได้ โดยเกิดขึ้นจากการผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังแท่งแคโทด ส่งผลให้แท่งแคโทดมีความร้อนเกิดขึ้นและปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่มีประจุเป็นลบออกมา รอบๆ แท่งแอโนดที่ยังอยู่ในสถานะที่ไร้สนามแม่เหล็ก แต่จะเกิดสถานะที่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในแนวขนานกันกับแนวแกนของท่ออิเล็กตรอนดังกล่าว โดยจะเคลื่อนที่หมุนเป็นวง (orbital) มากกว่าเคลื่อนที่แบบเส้นตรง จากนั้นจะหมุนตัวและกระโดดจากแคโทดไปยังแอโนดภายใต้สภาวะการทำงานที่มีความดันไฟฟ้า 4,000-6,000 โวลต์ ส่งผลให้เกิดคลื่นไมโครเวฟ โดยมีสายอากาศ (antenna) บริเวณส่วนบนของท่อแมกนีตรอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวจับคลื่นไมโครเวฟแล้วส่งผ่านไปยังท่อนำคลื่น (wave guide) และผ่านใบพัด (stirrer) เพื่อช่วยในการกระจายคลื่นรังสีไมโครเวฟให้ทั่วถึงภายในตู้อบไมโครเวฟ (อัมพวัน, 2551)

การเกิดความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ

รังสีไมโครเวฟเป็นพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร ถึง 10 เซนติเมตร ใช้ประโยชน์ในด้านโทรคมนาคมระยะไกล นอกจากนั้นยังนำมาประยุกต์สร้างพลังงานในเตาอบอาหารซึ่งเกิดจากการใช้คลื่นความถี่ 2,450 MHz หรือ 915 MHz และการให้ความร้อนด้วยตู้อบไมโครเวฟจะมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่นหรือจากตู้อบธรรมดา คือ เครื่องอบธรรมดาจะมีการให้พลังงานความร้อนด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน เช่น จากเปลวไฟ จากขดลวดไฟฟ้า โดยการถ่ายเทความร้อน 3 วิธี คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี แต่การเกิดความร้อนจากการให้รังสีไมโครเวฟเกิดขึ้นโดยการให้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาที ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป จนเกิดเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งจะแปรสภาพเป็นพลังงานความร้อน จึงสามารถทำให้อาหารสุกได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆ (จีโล, 2552) และพบว่า เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่อาหารจะทำให้เกิดความร้อนได้สองแบบร่วมกัน ได้แก่

1. ไอออนิกพอลาไรเซชัน (ionic polarization) คือการเกิดความร้อน โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อเข้าสู่สภาวะที่มีสนามไฟฟ้า ซึ่งแต่ละไอออนจะมีประจุไฟฟ้าประจำจะถูกกระตุ้นและถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่จนเกิดการเสียดสีขึ้นกับไอออนอื่นๆ และมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน จากนั้นจึงกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆ ต่อไป โดยการเกิดความร้อนในลักษณะนี้จะเกิดได้ในของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย

2. ไดโพลโรเทชัน (dipole rotation) คือการเกิดความร้อน โดยเกิดขึ้นกับสารประกอบที่มีขั้ว (polar) เช่น น้ำ และในสภาพปกติของสารประกอบนั้นจะมีการเรียงตัวของประจุบวกและประจุลบอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อเข้าไฟสู่นามไฟฟ้า ซึ่งประจุบวกและประจุลบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ โดยมีการเปลี่ยนทิศทางเพื่อเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และจะมีการเคลื่อนที่ด้วยการหมุนกลับไปกลับมา โดยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ คือ 915-2450 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที และผลของความร้อนจากการหมุนตัวและการเสียดสีกัน ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งการเกิดความร้อนในลักษณะนี้ถือเป็นความร้อนที่สำคัญ

ดังนั้น ความร้อนที่เกิดจากทั้งสองรูปแบบข้างต้น เป็นการให้ความร้อนที่จุดหนึ่งของอาหารซึ่งมีการสัมผัส จากนั้นจึงกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำจากการนำความร้อน โดยเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (อัมพวัน, 2551)

10. ภาชนะบรรจุกับการใช้ร่วมกับรังสีไมโครเวฟ

วัสดุที่ใช้ผลิตภาชนะบรรจุส่วนใหญ่มีความสามารถในการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟได้ ถึงแม้ว่าจะมีการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไว้บางส่วน โดยภาชนะบรรจุที่นำมาใช้กับร่วมกับรังสีไมโครเวฟจะเกิดลักษณะเด่นได้ 3 แบบ ดังนี้ (วีไล, 2552)

1. การสะท้อนกลับ (reflection) ของคลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่ผลิตจากโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ ส่งผลให้คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ โดยจะเกิดการสะท้อนกลับหมด ดังนั้น อาหารที่บรรจุในภาชนะบรรจุประเภทดังกล่าวจะไม่สุก

2. การดูดซึม (absorption) คลื่นไมโครเวฟของอาหารซึ่งโดยทั่วไป อาหารประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำซึ่งจะถูกดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว จากนั้นคลื่นไมโครเวฟจะสลายตัวอย่างรวดเร็วและไม่สะสมในอาหาร

3. การส่งผ่าน (transmission) ของคลื่นไมโครเวฟจะสามารถทะลุผ่านภาชนะบรรจุที่ผลิตจากแก้ว ไม้ กระดาษ และพลาสติกได้ เนื่องจากภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของวัสดุประเภทโลหะ ซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟได้จึงเป็นภาชนะบรรจุที่ดีในตู้อบไมโครเวฟ

ภาชนะบรรจุประเภทพลาสติก

ภาชนะบรรจุประเภทพลาสติกสำหรับตู้อบไมโครเวฟส่วนใหญ่จะผลิตในรูปของภาชนะที่มีลักษณะแบนจากพลาสติกดังต่อไปนี้

1. พอลิพริลีน (polypropylene, PP) เป็นพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับใช้เพื่ออุ่นอาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลวหรืออาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยใช้อุณหภูมิไม่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ภาชนะพอลิพริลีนไม่เหมาะกับการใช้ร่วมกับตู้อบความร้อนแบบธรรมดา เนื่องจากข้อจำกัดในการทนอุณหภูมิสูงได้ไม่เกิน 100–120 องศาเซลเซียส

2. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly (ethylene terephthalate), PET) ในการใช้งานของพลาสติกชนิดนี้กับภาชนะตู้อบจะเกิดรูปของโครงสร้างพลาสติกซึ่งมีความเป็นผลึกที่เรียกว่า คริสตัล พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (crystal (polyethylene terephthalate), CPET) มีสมบัติทนอุณหภูมิแช่แข็งและอุณหภูมิจากตู้อบซึ่งมีค่าระหว่าง ลบ 18 ถึง 225 องศาเซลเซียส โดยทั่วไป ในการผลิต คริสตัลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะมีการควบคุมปริมาณโครงสร้างที่เป็นผลึกให้อยู่ในช่วงระหว่าง 30–35 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการทนต่อความร้อนได้สูงสุดและไม่เปราะแตกง่าย และพบว่า ในปัจจุบันได้พัฒนาให้คริสตัลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถใช้งานที่อุณหภูมิแช่แข็งได้ดีขึ้น และนิยมใช้ผลิตเป็นภาชนะบรรจุสำหรับหลายวัตถุประสงค์ (dual overables) โดยนิยมออกแบบให้ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การเก็บไว้ในตู้แช่แข็ง การเข้าตู้อบธรรมดาที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส

3. พลาสติกวิศวกรรม (engineering plastics) พลาสติกวิศวกรรมเริ่มมีบทบาทในการนำมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุอาหารมากขึ้น ถึงแม้จะมีราคาสูง เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีจุดเด่นมากมายได้แก่ มีความแข็งแรงและมีความทนทานต่อการใช้งานภายใต้อุณหภูมิเยือกแข็งและอุณหภูมิตู้อบ มีรูปลักษณะที่สวยงาม สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ และมีอายุการใช้งานได้นาน ส่งผลให้ผู้ผลิตภาชนะบรรจุใช้จุดเด่นเหล่านี้เป็นแผนกลยุทธ์ในการสร้างตลาดใหม่ โดยวัสดุที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ เทอร์โมเซตพอลิเอสเตอร์ (thermoset polyester) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate, PC) พอลิซัลโฟน (polysulphone, PSO) พอลิเมทิลเพนเทน (polymethyl pentane, PMP) พอลิฟีนิลีนออกไซด์ (poly(phenylene oxide), PPO) ผสมกับพอลิสไตรีนโฟลัม (polystyrene foam) เป็นต้น ในการนำมาใช้งานของวัสดุเหล่านี้บางชนิดได้นำมาใช้ร่วมกันเพื่อเสริมสมบัติบางประการให้ดีขึ้น เช่น สมบัติความแข็งแรง และสมบัติการสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซ ส่งผลให้อาหารที่บรรจุมีอายุในการเก็บรักษานานขึ้น สามารถวางขายได้นานขึ้นแม้ว่าจะเก็บรักษาไว้ในภาวะปกติ (วิล, 2552)

11. การฉายรังสีแกมมาของพอลิเมอร์

รังสีแกมมา

รังสีแกมมา (gamma rays) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่ารังสีเอกซ์ (X-ray) และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-13} ถึง 10^{-17} เมตร มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่และพลังงานที่สูง และถือเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่เหลือทั้งหมด

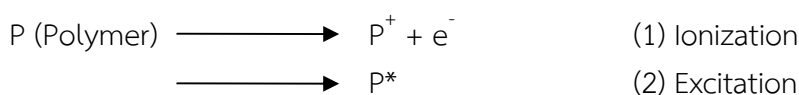
กลไกในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

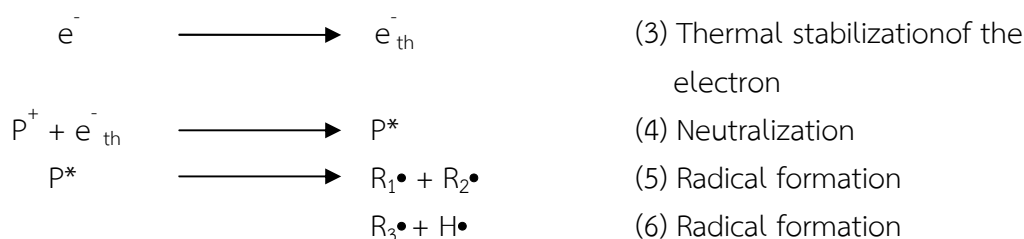
เมื่อนำพอลิเมอร์ไปผ่านการฉายรังสีแกมมา พอลิเมอร์จะได้รับพลังงานจากรังสีแกมมา (gamma rays) และลำอิเล็กตรอน (electron beam) ซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เช่น การเกิดสภาพเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslink) การเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ (grafting) รวมถึงเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) เป็นต้น (চারিณี, 2550) โดยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการฉายรังสีแกมมา ประกอบด้วย 2 กระบวนการสำคัญ ได้แก่

1. ขั้นตอนแรก การฉายรังสีแกมมาจะทำให้พอลิเมอร์เกิดไอออนคู่ ดังแสดงตามสมการที่ (1) และจะถูกกระตุ้น ดังแสดงตามสมการที่ (1) ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นมาก โดยใช้เวลาน้อยกว่า 10^{-6} วินาที จากนั้นอิเล็กตรอนไอออน และพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป ดังแสดงตามสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ พอลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวจะสามารถแตกตัวออกเป็น 2 อนุมูลอิสระ ดังแสดงตามสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาที่ 5 คือ สาเหตุของการนำไปสู่การเสื่อมสภาพหรือการสลายตัวของพอลิเมอร์

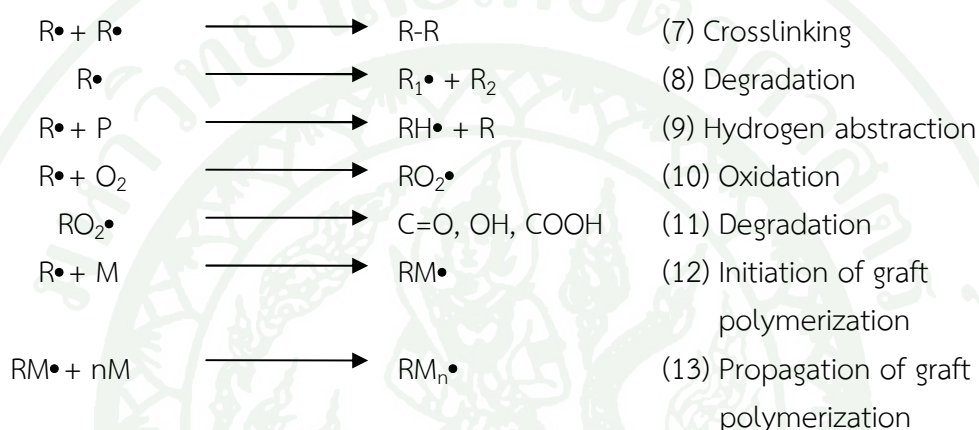
2. ขั้นตอนที่สอง จากการเกิดอนุมูลหรืออนุภาคอิสระ ซึ่งว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคด้วยกันเองหรือกับโมเลกุลของตัวกลาง เช่น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงหรือเชื่อมขวางของโมเลกุล ดังแสดงตามสมการที่ (7) หรือเกิดการเสื่อมสภาพ ดังแสดงตามสมการที่ (8) และจากการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์แล้วจะส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาในการกราฟต์ต่อไป ดังแสดงตามสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ (চারিณี, 2550)

ขั้นตอนแรก





ขั้นตอนที่สอง



งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Amash *et al.* (2000); Bengtsson *et al.* (2007); Gauthie *et al.* (1998); Joly *et al.* (1996); Kim *et al.* (2008); Mwaikambo *et al.* (2000) และ Spoljaric *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ในพอลิฟอสฟอริส พบว่า สารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์สามารถปรับปรุงเคมีพื้นผิวของไมโครเซลลูโลสซึ่งมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขั้วสูงให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยหมู่มาเลอิคแอนไฮไดรด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส ส่วนสายโซ่ไมเลกุลพอลิฟอสฟอริสที่ปลายข้างหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสโดยการสร้างพันธะโควาเลนต์ ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสและไมโครเซลลูโลส เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ดีขึ้นระหว่างไมโครเซลลูโลสและพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ จึงมีส่วนช่วยให้ไมโครเซลลูโลสกระจายตัวได้ดีในพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ และจากการศึกษาของ Amash *et al.* (2000), Bengtsson *et al.* (2007), Qiu *et al.* (2006) และ Spoljaric *et al.* (2009) พบว่า การมีอันตรกิริยาที่ดีระหว่างไมโครเซลลูโลสและพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ จะส่งผลให้ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้นได้ และจากการศึกษาของ Kim *et al.* (2008), Mwaikambo *et al.* (2000) และ Qiu *et al.* (2006) และพบว่า ไมโครเซลลูโลสซึ่งมีอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หากมีการกระจายตัวภายในพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ที่ดีจะสามารถทำหน้าที่เสริมการต้านทานแรงที่มากระทำจากการทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสมีค่าการทดสอบสมบัติเชิงกล

สูงขึ้น และจากการศึกษาของ Mwaikambo *et al.* (2000) พบว่า การเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์จะส่งผลให้ความชอบน้ำของวัสดุคอมพอสิตพอลิฟอสฟอริสที่เติมเส้นใยเซลลูโลสลดลง เนื่องจากหมู่มาเลอิคแอนไฮไดรด์ของพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส โดยเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำบางส่วนลดลง

Franco and González (2005) ทำการศึกษาผลของการเติมไมโครเซลลูโลสในพอลิฟอสฟอริส พบว่า มีผลทำให้พอลิฟอสฟอริสที่มีความไม่ชอบน้ำให้มีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโดยธรรมชาติของเซลลูโลสนั้นจะมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขั้วสูงเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสที่มีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำโดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้

Orden *et al.* (2010) ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการใช้สารประสาน (coupling agents) ในการเป็นสารประสานระหว่างพอลิฟอสฟอริสที่เป็นส่วนรับแรงกับเยื่อฟอกขาวจากเซลลูโลสของต้นยูคาลิปตัสเป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้สารประสานในขั้นตอนการหลอม สมมติฐานในการทดลองนี้คือ สารประสานทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส ทำให้วัสดุคอมพอสิตเกิดการเสียสภาพเชิงรูปร่างหรือทำให้สีของวัสดุคอมพอสิตเปลี่ยนแปลงไป โดยศึกษาการทำงานของสารประสาน 2 ชนิดคือ PP-g-MA และพอลิเอทิลีนไนไมน์ (polyethyleneimine, PEI) ผลการทดสอบการเปลี่ยนสีของวัสดุคอมพอสิตด้วยเครื่องไพโรเอทธานสเฟออินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) และเครื่องยูวีวิซิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-Visible spectroscopy) พบว่าทั้ง PP-g-MA และ PEI มีส่วนทำให้วัสดุคอมพอสิตเกิดสีน้ำตาล (browning) เพิ่มขึ้น โดย PEI จะเป็นตัวทำให้สีน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PEI กับสารประกอบคาร์บอนิลที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลสในขณะหลอม ส่วน PP-g-MA ไม่พบการมีส่วนทำให้วัสดุคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสีแต่ PP-g-MA มีผลต่อการเพิ่มแรงเสียดทานการสลายตัว (frictional degradation) ของวัสดุคอมพอสิตได้

Kaczmarek *et al.* (2005) ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมพอสิตพอลิฟอสฟอริสที่มีเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรง จากผลการทดสอบด้วย FTIR พบว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิฟอสฟอริส/เซลลูโลส มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงกว่าพอลิฟอสฟอริสบริสุทธิ์ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิล (carbonyl groups) ที่เป็นเป็นปัจจัยซึ่งส่งผลต่อการย่อยสลายได้ และหมู่คาร์บอนิลยังสามารถเป็นอาหารให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติได้ ส่วนการทดสอบด้วย SEM พบว่ารูพรุนและหลุมบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเข้าทำปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (photo oxidation) ของแสงเพิ่มขึ้น เกิดการย่อยสลายเร็วขึ้นและทำให้มีสมบัติเชิงกลลดลง

Spoljaric *et al.* (2009) ทำการศึกษาการนำเส้นใยเซลลูโลสที่มีขนาดผลึกระดับไมครอนหรือไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส (micro crystalline cellulose, MCC) มาเป็นส่วนเสริมแรงในการ

ผลิตภัณฑ์คอมพอสิตพอลิพอริส โดยใช้พอลิพอริสกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์และ MCC ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยน้ำมันซิลิโคน (silicone oil) กรดสเตียริก (stearic acid) หรือ สารประสานของอัลคิลไททาเนต (alkyltitanate coupling agents) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ และการกระจายตัวในพอลิพอริสให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถพิสูจน์พื้นผิวที่ปรับปรุงด้วย FTIR พบว่า MCC ที่ปรับปรุงด้วย PP-g-MA สามารถเสถียรภาพเชิงความร้อน และอุณหภูมิในการตกผลึก (crystallisation temperature, TC) ของพอลิพอริสให้สูงขึ้น ทำให้การเสียรูปจากการคืบตัว (creep deformation) ลดลง และเพิ่มความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป (increased permanent strain) ถึงแม้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของ MCC จะทำให้ความเป็นผลึกลดลงก็ตาม

Qiu *et al.* (2006) ทำการศึกษาการเติมเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีความเป็นผลึกสูง (crystalline fibrous, CE) เพื่อเป็นส่วนเสริมแรงในพอลิพอริสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กัน โดยในกระบวนการหลอมจะใช้ PP-g-MA เป็นสารประสาน พบว่าพอลิพอริสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงผสมเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง (CE) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวหรืออันตรกิริยาระหว่างพอลิพอริสกับเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงยึด (tensile strength) สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พอลิพอริสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าร่วมกับส่วนเสริมแรงที่เป็นเซลลูโลสชนิดเดียวกัน

Luz *et al.* (2008) ทำการศึกษสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงกายภาพของพอลิเมอร์เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานมากขึ้น รวมถึงความเข้าใจในความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ซึ่งมีผลต่อการพิจารณาเลือกใช้พอลิเมอร์ในระดับอุตสาหกรรม ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้สนใจในเรื่องการพัฒนาวัสดุคอมพอสิตพอลิพอริสที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibers) เส้นใยเซลลูลิคินิน (cellulignin fibers) ที่ได้จากกากอ้อย ซึ่งมีการตัดแปรทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสโดยกระบวนการอะซิไทเลชัน (acetylation) ซึ่งมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยที่เป็นส่วนเสริมแรง (reinforce phase) กับพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนรับแรง (matrix phase) และความเป็นผลึก จากนั้นได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเป็นส่วนรับแรงของเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการตัดแปรทางเคมี พบว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิพอริสมีสมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหมู่อะซิไทล (acetyl group) พันธะไฮโดรเจนที่ลดลง และความเป็นผลึกน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวต่ำลง ดังนั้นวัสดุคอมพอสิตพอลิพอริสที่มีเส้นใยเซลลูโลสตัดแปรทางเคมีจะมีเสถียรภาพเชิงความร้อนลดลง ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของวัสดุคอมพอสิตพอลิพอริสต่ำลงได้

Bengtsson *et al.* (2007); Joly *et al.* (1996); Kim *et al.* (2008); Mwaikambo *et al.* (2000) และ Spoljaric *et al.* (2009) ทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิพอริสผสมเส้นใยเซลลูโลส ที่มีการเติมสารประสานพอลิพอริสกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ พบว่า มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ มีช่องว่าง และโพรงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลต่อการกระจายตัวที่ดีของไมโครเซลลูโลสในพอลิพอริสเมทริกซ์ ดังนั้น ในการเติมสารประสาน

พอลิพอพรินกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ สามารถทำหน้าที่ในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของไมโครเซลลูโลสและพอลิพอพรินได้

Kotek *et al.* (2004) ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติก พบว่าไอโซแทคติกพอลิพอพรินสามารถเกิดผลึกได้ 3 ลักษณะคือ โมโนคลินิกหรือแอลฟา (monoclinic, Alpha), เฮกซะโกนอลหรือเบต้า (hexagonal, Beta) และ ไตรคลินิกหรือแกมมา (triclinic, Gamma) โดยทั่วไปไอโซแทคติกพอลิพอพรินเกรดการค้าจะมีปริมาณผลึกแบบแอลฟามากกว่าผลึกแบบเบตา แต่จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าโครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่มีปริมาณผลึกแบบเบต้ามากกว่าจะมีความต้านทานแรงดึงยืด ความแข็งตึง (toughness) และความเหนียว (ductility) สูงกว่าโครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่มีปริมาณผลึกแบบแอลฟาในสัดส่วนที่มากกว่า เนื่องจากผลึกแบบแอลฟามีแรงยึดเกาะของผิวหน้าและอนุภาคต่ำ ทำให้ลดการเกิดตะกอนหรือการเกาะกลุ่มเป็นก้อนของผลึก ซึ่งลดการเกิดจุดเริ่มต้นของการร้าว (initiate crack) และจากการศึกษาของ Samir *et al.* (2005) พบว่า เซลลูโลสจะประกอบด้วยโครงสร้างผลึก 2 รูปแบบ ได้แก่ หนึ่งสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างไตรคลินิก (one chain triclinic structure, I) และสองสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างโมโนคลินิก (two chain monoclinic structure, I) และจากการศึกษาของ Ljungberg *et al.* (2006) พบว่า มีพีค 5 ตำแหน่งที่แสดงถึงวัฏภาคแอลฟา (-phase) ของไอโซแทคติกพอลิพอพรินบนระนาบ (110), (040), (130), (111) และ (041) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต้า ได้แก่ 14°, 17°, 18.5°, 21° และ 22° ตามลำดับ และพีคที่แสดงถึงวัฏภาคเบต้า (-phase) ของไอโซแทคติกพอลิพอพรินบนระนาบ (300) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต้า คือ 16° และพีคที่แสดงถึงวัฏภาค I ของไมโครเซลลูโลส บนระนาบ (200) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต้า คือ 23°

Spoljaric *et al.* (2009) ทำการศึกษาร้อยละความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิตของพอลิพอพรินและไมโครเซลลูโลส โดยพบว่า การเกิดผลึกของพอลิพอพรินและไมโครเซลลูโลสมีความแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างวงไพราโนส (pyranose ring) ของไมโครเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่ไม่ขนานกัน (anti-parallel manner) และรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลของไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่ไม่สามารถเกิดผลึกในโครงสร้างของไมโครเซลลูโลสได้ ทำให้การเกิดผลึกเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกของภาคไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่เติมไมโครเซลลูโลสลดลงเล็กน้อย

Luz *et al.* (2008) และ Spoljaric *et al.* (2009) ทำการศึกษาลของการเติมเส้นใยเซลลูโลสในพอลิพอพริน พบว่า ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของวัสดุคอมพอสิตพอลิพอพรินที่เติมเส้นใยเซลลูโลส มีแนวโน้มต่ำกว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่ไม่เติมเส้นใยเซลลูโลสเพียงเล็กน้อย ซึ่งให้ผลการทดสอบสอดคล้องกันกับการศึกษาของ Mwaikambo *et al.* (2000) โดยพบว่า เมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลสในพอลิพอพรินจะส่งผลให้อุณหภูมิ

ในการหลอมเหลวของวัสดุคอมพอลิเมอร์พอลิฟอสฟอริสเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิในการหลอมเหลวของธาตุไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส และจากการศึกษาของ Luz *et al.* (2008) พบว่า การลดลงเพียงเล็กน้อยของอุณหภูมิในการหลอมเหลวของธาตุไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสที่เติมไมโครเซลลูโลส เป็นผลจากการเกิดผลึกของพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ที่เกิดผลึกชั้นรอบๆไมโครเซลลูโลส ซึ่งทำให้เกิดความอ่อนแอของอันตรกิริยาระหว่างไมโครเซลลูโลสกับไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส ทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของธาตุไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสลดลง

Amash and Zugenmaier (2000) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการนำเส้นใยเซลลูโลสมาเป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมพอลิเมอร์พอลิฟอสฟอริส และทดสอบด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) พบว่าสาเหตุในการเพิ่มของอุณหภูมิในการตกผลึก และร้อยละของปริมาณผลึกเป็นผลมาจากการกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสเพื่อทำหน้าที่คล้ายกับสารก่อผลึก (nucleating agents) ของพอลิฟอสฟอริส ทำให้เกิดการสร้างขึ้นผลึกรอบๆเส้นใยเซลลูโลส ดังนั้นถ้าเส้นใยเซลลูโลสมีการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอจะทำให้ปริมาณผลึกและอุณหภูมิในการตกผลึกสูงขึ้น

Satgé *et al.* (2004) ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนแก่เซลลูโลสที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าที่เวลา 60 วินาที กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ (watt) จะทำให้พลาสติกขึ้นทดสอบนี้เกิดสีน้ำตาลขึ้น และเป็นจุดที่ทำให้ความเปราะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Panda and Nayak (2011) ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยตู้อบไมโครเวฟ พบว่าการดูดซับพลังงานความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์พอลิเมอร์ ส่งผลให้เมทริกซ์ของวัสดุคอมพอลิเมอร์เกิดความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ โดยอาศัยความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือมีความว่องไวต่อการนำความร้อน จะสามารถสะสมความเค้นความร้อน (thermal stress) ระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับสารประสาน เนื่องจากการขยายตัวของเส้นใยเสริมแรงที่เป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (thermal expansion coefficient) ของเส้นใยเสริมแรงเอง

Mirabedini *et al.* (2004) ทำการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวของพอลิฟอสฟอริส โดยอาศัยเทคนิคที่อาศัยความสามารถของของเหลวในการปกคลุมหรือสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ (contact angle) ลงบนพื้นผิวของวัสดุ เพื่อวิเคราะห์สภาพผิวของพื้นผิววัสดุ โดยอาศัยค่าพลังงานอิสระพื้นผิว (surface free energy) ของพื้นผิววัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นพลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของพื้นผิวของแข็งเกิดจากองค์ประกอบที่มีขั้ว (polar component) บนพื้นผิวของวัสดุทดสอบนั้นๆ โดยพบว่า หากมีค่าพลังงานอิสระพื้นผิว มีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของของเหลว โมเลกุลของของเหลวจะมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลใกล้เคียงบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบมากขึ้น ส่งผลให้ของเหลวที่หยดลงบนพื้นผิวของวัสดุเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวมากขึ้น และพบว่า รังสีไมโครเวฟจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีบนพื้นผิว

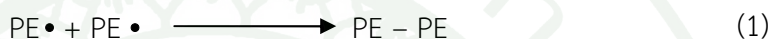
ของพอลิพอฟริลีนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และหากมีการใช้เวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟ เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากรังสีไมโครเวฟสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพอฟริลีน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีขั้ว (polar component) บนพื้นผิวพอลิพอฟริลีนโดยเกิดหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) และหมู่แอลคีน ($C=C$) ที่พื้นผิว ส่งผลให้พอลิพอฟริลีนมีค่าพลังงานอิสระพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น

Siripatrawan *et al.* (2000) ทำการศึกษาผลของการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟของพอลิพอฟริลีน พบว่า ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟจะเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบอีกครั้ง ทำให้ความเป็นผลึกของไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ Chandrasekaran *et al.* (2012) พบว่า ภายหลังจากการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟสมบัติความเป็นฉนวนสูง (high dielectric properties) ของพอลิพอฟริลีนที่จะสามารถดูดซับรังสีไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้คือ เมื่อมีการให้รังสีไมโครเวฟกับพอลิพอฟริลีนเมทริกซ์จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพอลิพอฟริลีนจะถูกเหนี่ยวนำและหมุนขั้วเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟหรือเกิดการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้ว (dipolar polarization) ของโมเลกุลที่มีขั้วถาวรหรือพันธะเคมี ทำให้โมเลกุลมีการหมุนกลับไปมานับล้านครั้งต่อวินาที ก่อให้เกิดแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของพอลิพอฟริลีน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนโดยปริมาตรหรือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้อุณหภูมิของสสารหนึ่งหน่วยปริมาตรมีค่าสูงขึ้นหนึ่งองศาของพอลิพอฟริลีนเมทริกซ์

Mirabedini *et al.* (2004) ทำการศึกษาสมบัติเชิงเคมีของพอลิพอฟริลีน ภายหลังจากผ่านรังสีไมโครเวฟ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1591-1800 \text{ cm}^{-1}$ และ $1490-1590 \text{ cm}^{-1}$ สามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพอฟริลีน ภายหลังจากผ่านรังสีไมโครเวฟได้ ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ $C=O$ ($C=O$ stretching) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1490-1590 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการยืดหดแบบสั้นของหมู่ $C=C$ ($C=C$ stretching vibration) ซึ่งแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้อาจเกิดขึ้นจากการที่หมู่คาร์บอนิล (carbonyl) และหมู่แอลคีน (alkene) เกิดอันตรกิริยากับหมู่อีเทอร์ ($R-O-R$, ether) และจากการศึกษาของ Kalisz *et al.* (2008) พบว่า ภายหลังจากผ่านรังสีไมโครเวฟ พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น $2300-2400 \text{ cm}^{-1}$ มีความเข้มพีคสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการผ่านรังสีไมโครเวฟ โดยพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นนี้แสดงถึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

Cota *et al.* (2007) ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ภายหลังจากฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีแตกต่างกัน โดยให้ผลการทดสอบที่ตรงข้ามกับการนำมาอธิบายสมบัติเชิงกลที่ดีได้ เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาจะทำให้ค่าความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) และการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) เพิ่มขึ้น จากเกิดการขาดออก (chain scission) และการเชื่อมขวาง (cross-linking) ของสายโซ่โมเลกุลพอลิพอฟริลีน รวมถึงการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนใน

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและความสามารถในการแทนที่ของออกซิเจนในขณะฉายรังสีแกมมา โดยการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สามารถอธิบายได้จากการเกิดขึ้นของอนุมูลแอลคิล (alkyl radicals, (PE •)) บนพื้นผิวพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งเกิดจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอม โดยโมเลกุล (PE •) จะสร้างการเชื่อมขวางระหว่างกัน ดังแสดงตามสมการที่ (1) และในระหว่างการฉายรังสีแกมมา (PE •) จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนได้เป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ (peroxy radicals, (PEO₂ •)) ดังแสดงตามสมการที่ (2) ซึ่งอนุมูลเปอร์ออกไซด์นี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือผสมตัว (combine) กับหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิลได้ (น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์) อีกทั้งยังสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ (PE •) ดังแสดงตามสมการที่ (3)



จากปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลของ HDPE ให้เหตุผลสอดคล้องกันกับการศึกษาของ Abiona and Osinkolu (2010) ซึ่งพบว่า พอลิพอฟรีลีน รวมถึงพอลิเมอร์ชนิดพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) จะสามารถเกิดอนุมูลเปอร์ออกไซด์และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ และพบว่า อัตราการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน สูงขึ้นเมื่อปริมาณรังสีแกมมาที่ใช้สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการแทนที่ของออกซิเจนในขณะฉายรังสีแกมมา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

Abiona and Osinkolu (2010) ทำการศึกษาสมบัติเชิงเคมีของพอลิพอฟรีลีน ภายหลังจากผ่านรังสีไมโครเวฟ ด้วยเทคนิคฟูรีเยทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1700 ซม⁻¹ และ 2270 ซม⁻¹ โดยเกิดจากการคาบเกี่ยว (overlap) ของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1750 ซม⁻¹ และหมู่แอลคีน (C=C) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1990 ซม⁻¹ ซึ่งสามารถยืนยันการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการขาดออกและการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิพอฟรีลีน และพบแนวโน้มของความเข้มพีคเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีแกมมา นอกจากนี้จากการศึกษาของ Abiona and Osinkolu (2010) และ Cota *et al.* (2007) พบว่า ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีสูงขึ้นไปจะมีอัตราในการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการสร้างโครงผลึกของถาดลดต่ำลง เนื่องจากการขาดออกและการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้น การนำไอโซโทปของพอลิพอฟรีลีน และไมโครเซลลูโลสมาเป็นวัตถุดิบในการทำวัสดุคอมพอสิตเพื่อผลิตเป็นถาดสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตภาชนะบรรจุอาหารสำเร็จรูปแช่เย็นและใช้งานภายใต้ตู้เย็นไมโครเวฟจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความต้านทานแรงดึงยืด ความแข็งดึง

(toughness) โมดูลัส (modulus) และความเหนียว (ductility) เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสมีความสามารถในการยึดเกาะกับพอลิพอร์ลีนซึ่งเป็นส่วนรับแรงได้สูงเมื่อมีการเติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกรพต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจาก พอลิพอร์ลีนกรพต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสร้างอันตรกิริยาที่ดีระหว่างพอลิพอร์ลีนและเส้นใยเซลลูโลส ส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสเกิดขึ้นได้ดี มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ มีช่องว่าง และโพรงซึ่งเกิดจากการไม่เข้ากันของเส้นใยเซลลูโลสและพอลิพอร์ลีนลดลง แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลต่อการกระจายตัวที่ดีของไมโครเซลลูโลสในพอลิพอร์ลีนเมทริกซ์ จึงทำให้วัสดุคอมพอสิตพอลิพอร์ลีนที่ได้มีเสถียรภาพเชิงรูปร่างที่ดีขึ้น ทั้งนี้ในการเตรียมส่วนผสมของกระบวนการหลอมโดยใช้พอลิพอร์ลีนกรพต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารประสานจะทำให้เกิดการกระจายตัว และเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิพอร์ลีนกับไมโครเซลลูโลส อย่างไรก็ตามการใช้พอลิพอร์ลีนกรพต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะการใช้ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมจะมีผลต่อการเพิ่มแรงเสียดทานการสลายตัวของวัสดุคอมพอสิตได้ ส่วนผลของรังสีไมโครเวฟที่มีต่อพอลิพอร์ลีน พบว่า พอลิพอร์ลีนจะเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบอีกครั้ง ทำให้ความเป็นผลึกของไอโซแทคติกพอลิพอร์ลีนเพิ่มขึ้น และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีบนพื้นผิวของพอลิพอร์ลีนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และใช้เวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟ เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพอร์ลีนได้มากขึ้น ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีซัลฟอนพื้นผิวพอลิพอร์ลีน ส่งผลให้น้ำและความชื้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวพอลิพอร์ลีนได้มากขึ้น และพบว่า การนำเส้นใยเซลลูโลสมาเป็นส่วนเสริมแรง มีผลทำให้เสถียรภาพเชิงความร้อนลดลงเล็กน้อย ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของวัสดุคอมพอสิตพอลิพอร์ลีนลดลงได้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยให้เกิดสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ เนื่องจากการทำให้วัสดุคอมพอสิตพอลิพอร์ลีนมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขี้ผึ้งสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำและความชื้นได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพอร์ลีนบริสุทธิ์ และการเติมไมโครเซลลูโลสยังส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างผลึกของพอลิพอร์ลีนเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเกิดผลึกของพอลิพอร์ลีนและเส้นใยเซลลูโลสมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ร้อยละความ เป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิตพอลิพอร์ลีน/เส้นใยเซลลูโลสลดลงเล็กน้อย จึงเพิ่มมีโอกาสนในการเข้าทำปฏิกิริยาของน้ำและความชื้น รวมถึงการเกิดอันตรกิริยากับสารเคมีต่างๆ และจากการศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาของพอลิพอร์ลีนที่ปริมาณรังสีต่างๆ พบว่า หากมีปริมาณการฉายรังสีสูงขึ้น จะส่งผลให้อัตราการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มโอกาสในการเกิดขาดออกและการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลพอลิพอร์ลีน ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลจากการเพิ่มขึ้นของความเปราะ (embrittlement) และความแข็ง (stiffening) ดังนั้น พอลิพอร์ลีนจึงสามารถเกิดการสลายตัวจากรังสีแกมมาได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

1.1 เม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพพริลีน (i-PP resin) (EL-Pro P702J, SCG Plastics/SCG Performance Chemicals Co., Ltd., ประเทศไทย)

1.2 เม็ดพลาสติกพอลิพพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (MA-g-PP resin) (DuPont Fusabond P613, DuPont China Holding Co., Ltd., ประเทศจีน)

1.3 เศษผ้าฝ้าย

1.4 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) (AR grade, QREC, ประเทศมาเลเซีย)

1.5 น้ำกลั่น

2. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างการทดลอง วิเคราะห์และทดสอบ

2.1 โถดูดความชื้น (desiccator)

2.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก (sartorius analytical balances) (Model CP 224S, Sartorius AG, ประเทศเยอรมนี)

2.3 ตู้อบ (binder) (Model ED53/E2, Scientific Promotion Co., Ltd, ประเทศไทย)

2.4 เครื่องวัดความหนา (micro-thickness gauge) (Model ID-C112BS, Mitutoyo, ประเทศญี่ปุ่น)

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

2.6 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filtering flask and vacuum pump)

2.7 เครื่องปั่นบด (blender) (Model Vivacio Duo 600 W, Moulinex, ประเทศฝรั่งเศส)

2.8 เครื่องกวนและผสม (mixing/overhead stirrers) (Model IKA RW20 digital, IKA, ประเทศจีน)

2.9 เครื่องให้ความร้อน (hotplate) (Model IKA C-MAG HS7, IKA, ประเทศจีน)

2.10 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิขณะกวนผสม (electronic contact thermometer) (Model IKA ETS-DS, IKA, ประเทศจีน)

2.11 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) (Model T-20, Dr. Collin GmbH, ประเทศเยอรมนี)

2.12 เครื่องอัดฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ (injection molding)

2.13 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) (Model Bruker TENSOR 27 GmbH, ประเทศเยอรมนี)

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

2.15 เครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชีน (instron universal testing machine) (Model 5965, Instron Co., Ltd, ประเทศไทย)

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

2.17 เครื่องวัดมุมสัมผัส (optical contact angle measurement systems) (Model OCA 15 EC, Data physics instrument GmbH, ประเทศเยอรมนี)

2.18 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี (X-ray diffraction spectroscopy) (Model Bruker AXS Advanced X-ray Solutions GmbH, ประเทศเยอรมนี)

2.19 เครื่องทดสอบความแข็งดูโรมิเตอร์ (durometer hardness) (Model 475DUROMETER, PTC Instruments Pacific Transducer Corp., ประเทศสหรัฐอเมริกา)

วิธีการ

1. การสกัดเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายและการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครเซลลูโลส

1.1 สกัดเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย นำเศษผ้าฝ้ายที่ปราศจากการฟอกสีมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ชั่งน้ำหนักเศษผ้าฝ้ายที่ตัดแล้วมา 80 กรัม ชุบน้ำกลั่นให้พอหมาด เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาณ 1,500 มิลลิลิตร (ภาคผนวก ก) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องกวนและผสม (mixing/ overhead stirrer) โดยควบคุมความเร็วใบพัด 350 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองเส้นใยเซลลูโลสออกด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเซลลูโลสที่ได้ไปทำการบดด้วยเครื่องบด เป็นเวลา 1 นาที จนได้ผงไมโครเซลลูโลส (ภาคผนวก ก)

1.2 ศึกษาอินฟราเรดสเปกตรัมด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยศึกษาลักษณะเฉพาะของไมโครเซลลูโลส โดยทำการศึกษาในช่วงคลื่น $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ (ภาคผนวก ข)

2. การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิธและการขึ้นรูปของไอโซแทคติกพอลิพริสตีนผสมไมโครเซลลูโลส

2.1 นำเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพริสตีนผสมกับไมโครเซลลูโลสปริมาณแตกต่างกัน คือ 5, 10 และ 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน (part per hundred resin, phr) ทั้งที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประสานพอลิพริสตีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพริสตีน (Lee, 2007; Spoljaric, 2009) โดยอัตราส่วนผสม แสดงในตารางที่ 2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เพื่อให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นเม็ดพลาสติก (pellet) ผสมไมโครเซลลูโลส คือ เม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพริสตีนที่มีการเติมเติมสารประสานพอลิพริสตีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ โดยมีปริมาณการผสมไมโครเซลลูโลส คือ 5, 10 และ 20 phr ตามลำดับ และเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพริสตีนที่ไม่มีการเติมเติมสารประสานพอลิพริสตีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ โดยมีปริมาณการผสมไมโครเซลลูโลส คือ 5, 10 และ 20 phr ตามลำดับ (ภาคผนวก ค)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนในการผสมเพื่อผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิธและขึ้นรูปภาคไอโซแทคติกพอลิพริสตีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย

สูตรที่	ปริมาณสาร		
	i-PP (phr)	MA-g-PP (%wt)	MC (phr)
1	100	0	0
2	100	0	5
3	100	0	10
4	100	0	20
5	100	10	5
6	100	10	10
7	100	10	20

หมายเหตุ phr (parts per hundred resin) คือ ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน

2.2 ศึกษาอินฟราเรดสเปกตรัมด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยศึกษาความเข้ากันได้กับพอลิพริสตีน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิธของไอโซแทคติกพอลิพริสตีนผสมไมโครเซลลูโลส (ภาคผนวก ข)

2.3 นำเม็ดพลาสติกคอมพอลิธของไอโซแทคติกพอลิพริสตีนผสมไมโครเซลลูโลสที่ได้จากกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

มาขึ้นรูปเป็นภาคไอโซแทคติกพอลิพพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ (injection molding) (ภาคผนวก ค)

ภาคที่เตรียมได้จากกระบวนการอัดฉีดขึ้นรูปตามแบบแม่พิมพ์จะใช้สัญลักษณ์แทนดังนี้

ภาค i-PP	แทนด้วยสัญลักษณ์ 1
ภาค i-PP/MC-5 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ 2
ภาค i-PP/MC-10 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ 3
ภาค i-PP/MC-20 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ 4
ภาค i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ 5
ภาค i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ 6
ภาค i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ 7

3. การเตรียมภาคไอโซแทคติกพอลิพพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส โดยการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและการฉายรังสีแกมมา

3.1 เตรียมภาคโดยการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ เข้าตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340, 650 และ 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ โดยทุกกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมภาคมีการใช้ทุกเวลาที่มีการใช้ในการเตรียมภาค ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเตรียมภาคไอโซแทคติกพอลิพพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส โดยการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

ภาวะไมโครเวฟ			
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)		
340	2.5	5	10
650	2.5	5	10
1,300	2.5	5	10

3.2 เตรียมภาคโดยการฉายรังสีแกมมา นำภาคทั้งก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟไปฉายรังสีแกมมาที่มีความเข้มของรังสีแตกต่างกัน คือ 10, 100 และ 1,000 กิโลเกรย์ (Kilogray, kGy)

4. ทดสอบสมบัติของภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

4.1 ทดสอบสมบัติเชิงกลของภาค ทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสด้วยเครื่องยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชชีน โดยใช้มาตรฐาน ASTM D695 (ภาคผนวก ง) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's new multiple range tests (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 19

4.2 ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของภาค

4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาคผนวก ง)

4.2.2 ทดสอบสมบัติพื้นผิวของภาค ด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส โดยใช้มาตรฐาน ASTM D9546-09 ซึ่งทดสอบในระบบของน้ำและน้ำมัน (ภาคผนวก ง) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 19

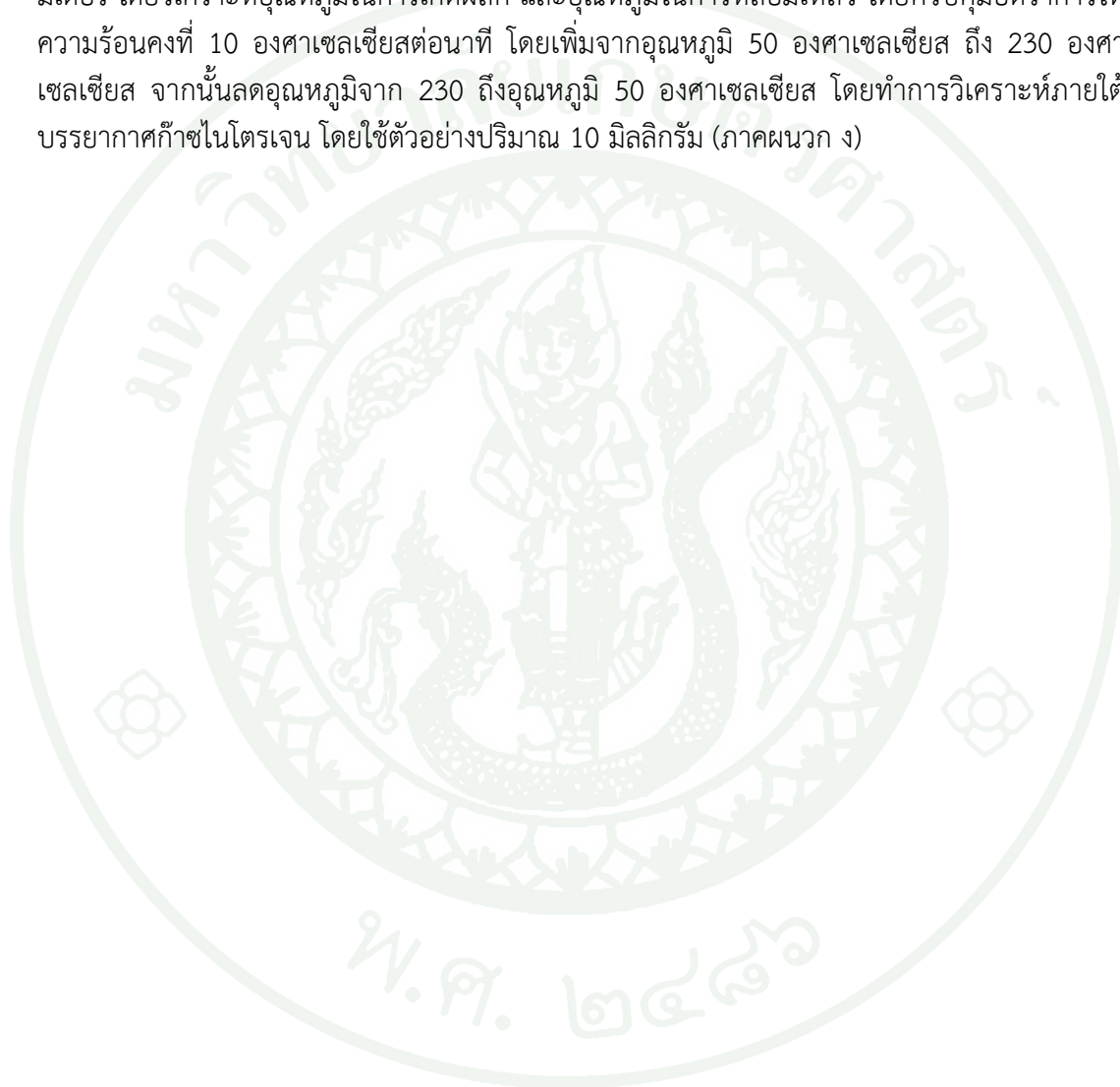
4.2.3 ทดสอบสมบัติผลึกของภาค ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อวิเคราะห์ขนาดของผลึก สัดส่วนความเป็นผลึก และชนิดของผลึก โดยทำการศึกษาในช่วง 0-80 องศา ของมุมที่เลี้ยวเบนสองเซต่า (2 Theta) ของรังสีเอ็กซ์ (ภาคผนวก ง)

4.2.4 ทดสอบความแข็งของภาค ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งดูโรมิเตอร์ ใช้หัวกดชนิด D (Shore D Durometer) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D2240 เพื่อวัดความต้านทานต่อแรงที่มากระทำที่ผิวหน้าของวัสดุ (ภาคผนวก ง) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 19

4.2.5 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้นของภาค โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนักของภาคทั้งก่อนและหลังภายใต้สภาวะควบคุมความชื้นร้อยละ 100 เพื่อคำนวณปริมาณความชื้นที่ภาคได้ดูดซับเอาไว้ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงเป็นค่าร้อยละความชื้น โดยใช้มาตรฐาน ASTM D570-98 (ภาคผนวก ง) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 19

4.3 ทดสอบสมบัติเชิงเคมี โดยการตรวจสอบและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกรด ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทำการศึกษาในช่วงคลื่น $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ (ภาคผนวก ข)

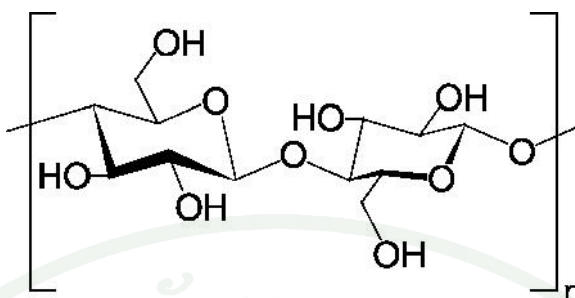
4.4 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของกรด ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลแคลอริมิเตอร์ โดยวิเคราะห์อุณหภูมิในการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการหลอมเหลว โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเพิ่มจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถึง 230 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิจาก 230 ถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 10 มิลลิกรัม (ภาคผนวก ง)



ผลและวิจารณ์

1. สมบัติและลักษณะเฉพาะของไมโครเซลลูโลส

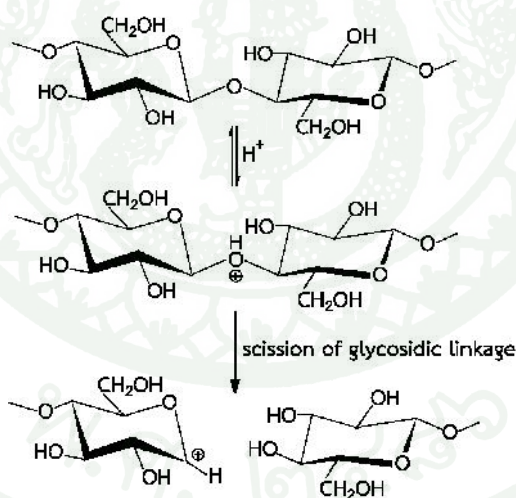
การนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักหรือใช้เป็นส่วนเสริมแรงในอุตสาหกรรม การผลิตภาชนะบรรจุมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากกระแสตื่นตัวและการตระหนักถึงเรื่องสภาวะ โลกร้อนและปัญหามลพิษจากขยะ รวมถึงกฎหมายที่เข้มงวดมากยิ่งขึ้นในการควบคุมปริมาณการ ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างกระบวนการผลิต (Kim *et al.*, 2008) เนื่องจากการใช้พอลิเมอร์จากธรรมชาติเพื่อเป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตนั้น สามารถลดปริมาณการ ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดปริมาณการใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้ (Lee *et al.*, 2007) ในความหลากหลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงให้กับ วัสดุพอลิพอร์ฟิสิกคอมพอสิต เส้นใยเซลลูโลสถือเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ดีและเหมาะแก่การนำมาใช้ เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับไอโซเทคติกพอลิพอร์ฟิสิกเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สามารถพบ ได้มากที่สุดในโลก มีสมบัติเชิงความร้อนที่ดี ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ทาง ชีวภาพ (Rana *et al.*, 1998) ในการนำเซลลูโลสมาใช้เพื่อเป็นส่วนเสริมแรงในอุตสาหกรรมการผลิต วัสดุคอมพอสิต มักพบปัญหาเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมเม็ดเรซินรวมถึงการขึ้นรูปทรงเป็น ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากอนุภาคของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นใยสายยาว และมีเคมีพื้นผิวที่ แตกต่างกัน ทำให้โอกาสในการแยกชั้นกันระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การนำเซลลูโลสมาใช้ควรทำการดัดแปรโครงสร้างของเซลลูโลสก่อน เพื่อให้เซลลูโลสมีสมบัติที่ เหมาะสมในการนำมาใช้งานมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการนำเซลลูโลสที่ยังไม่ได้ดัดแปรโครงสร้างจะพบว่า มีความผิดปกติของสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกายภาพบางประการ เช่น ความเปราะของวัสดุ ความ ไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างวัสดุรับแรงและวัสดุเสริมแรง (เซลลูโลส) ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมไมโคร เซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายโดยวิธีการสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อลดความยาวสายโซ่โมเลกุลของ เซลลูโลสและเพิ่มพื้นที่การเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไมโครเซลลูโลสและพอลิพอร์ฟิสิกซึ่งการ เตรียมไมโครเซลลูโลสด้วยกรดไฮโดรคลอริกนี้ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ผงไมโครเซลลูโลสคุณภาพสูงซึ่ง เป็นที่ต้องการมากกว่าแค่ผงเซลลูโลส เนื่องจากสามารถเพิ่มความเป็นอนุภาคเคลื่อนที่อิสระ (Ogaji *et al.*, 2011; Terinte *et al.*, 2011) ซึ่งลดลักษณะของความเป็นเส้นใยสายยาวลง จึงส่งผลดีต่อ กระบวนการผสมเม็ดเรซินของคอมพอสิตรวมถึงกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากการกระจายตัวของ ไมโครเซลลูโลสภายในพอลิพอร์ฟิสิกที่ดีขึ้น สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริก กลไกการเกิดปฏิกิริยาเริ่มจากหมู่อะซิดลออกซิเจนที่อยู่ตรงบริเวณจุดเชื่อมต่อของไกลโคซิดิกกับ โปรตรอนจากกรดไฮโดรคลอริกเข้ามา ทำให้เกิดการหลุดออกของโมเลกุลตรงบริเวณที่ได้รับโปรตรอน เข้ามาเพื่อให้เกิดความเสถียรของโมเลกุลเกิดเป็นคาร์โบเนียมไอออนขึ้นโดยจะทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไป ซึ่งจะเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นแทนที่ (Degree of substitution, DS) (จิราวุฒิ, 2553; Meister, 2000) ดังภาพที่ 9 ค่า DS สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของหมู่ไฮดรอกซิลในหนึ่งหน่วยกลูโคสซึ่ง โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0-3 หากเกิดการแทนที่ทุกตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลจะมีค่า DS มากที่สุด เท่ากับ 3 ไมโครเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้าง คือ



ภาพที่ 8 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส ($n \approx 500$) หรือไมโครเซลลูโลส ($n \approx 220$)

ที่มา: Ogaji *et al.* (2011)

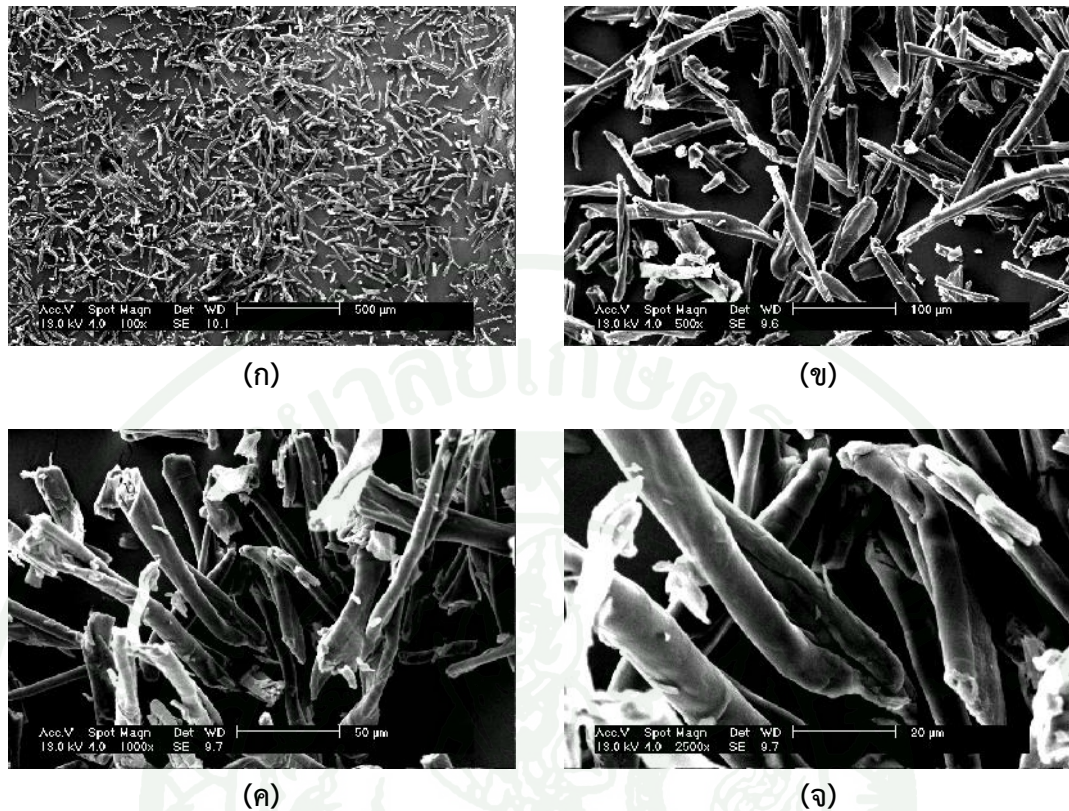
เซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$)_n เซลลูโลสเกิดจากมอนอเมอร์ที่เรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส มาต่อกันด้วยพันธะ -1,4-glycosidic linkage (ชिरาวุฒิ, 2553) ดังภาพที่ 8 โดยทั่วไปเซลลูโลสมีค่า n หรือระดับขั้นของการเกิดพอลิเมอร์ของเซลลูโลสประมาณ 500 แต่ไมโครเซลลูโลสจะมีค่า n ประมาณ 220 เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของไมโครเซลลูโลสที่สั้นลง (Ogaji *et al.*, 2011; Terinte *et al.*, 2011)



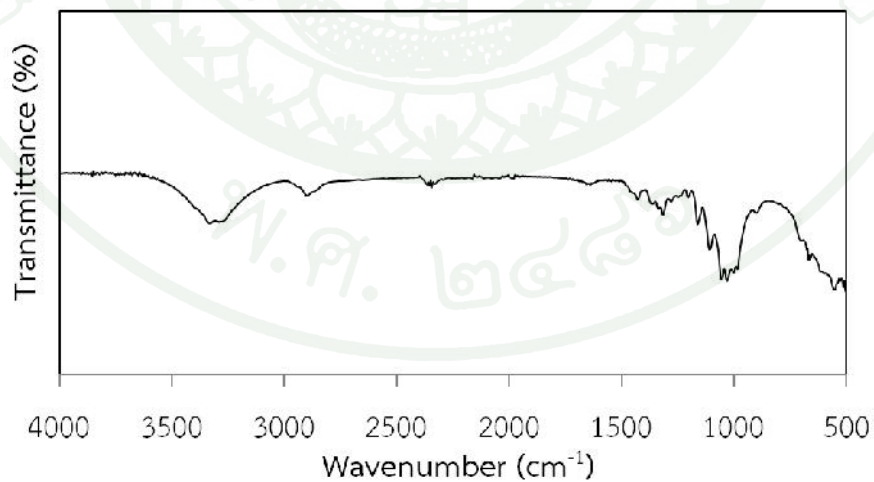
ภาพที่ 9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดในเซลลูโลส

ที่มา: ชिरาวุฒิ (2553); Meister (2000)

เบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผงไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเศษผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 10 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่าผงไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดจากเศษผ้าฝ้ายจะมีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กๆ



ภาพที่ 10 สัณฐานวิทยาของผงไมโครเซลลูโลสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังกำลังขยายแตกต่างกัน (ก) 100 เท่า, (ข) 500 เท่า, (ค) 1000 เท่า และ (ง) 2500 เท่า



ภาพที่ 11 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเศษผ้าฝ้าย

และมีความยาวของเส้นใยไมโครเซลลูโลสที่มีความหลากหลายเป็นอย่างมาก (Klemm *et al.*, 2011) โดยในงานวิจัยนี้พบว่ามีความยาวตั้งแต่ 5 ถึง 500 ไมโครเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5

ไมโครเมตร การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเศษผ้าฝ้ายด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transforms Infrared Spectrometer, FTIR) ดังแสดงในภาพที่ 11 จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครเซลลูโลสด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ในช่วงคลื่น 400-4000 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชันและเลขคลื่นที่มีความสัมพันธ์กัน สรุปไว้ในตารางที่ 4 ตำแหน่งเลขคลื่นที่สามารถชี้เฉพาะความเป็นไมโครเซลลูโลสมีด้วยกันหลายตำแหน่งเลขคลื่น ได้แก่ ตำแหน่งเลขคลื่น 3400 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching vibrations) ตำแหน่งเลขคลื่น 2900 cm^{-1} เกิดจากการยืดหดของหมู่ C-H (C-H stretching) ตำแหน่งเลขคลื่น 1432 cm^{-1} เกิดจากการยืดหดของหมู่ CH_2 (CH_2 stretching) และ ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1140-1400 cm^{-1} เกิดจากการยืดหดของหมู่ C-H, CH_2 และหมู่ C-O (C-H, CH_2 and C-O stretching) (Spoljaric *et al.*, 2009) ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วงคลื่น 1635-1653 cm^{-1} แสดงถึงความมีอยู่ของน้ำหรือความชื้นที่เซลลูโลสดูดซับเอาไว้ (Ciolacu *et al.*, 2011; Colom *et al.*, 2003; Jia *et al.*, 2011; Spoljaric *et al.*, 2009) ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วงคลื่น 1430 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบงอของหมู่ CH_2 ที่สมมาตรเกิดจากการสั่นแบบงอของหมู่ CH_2 ที่สมมาตร (symmetric CH_2 bending vibration) แสดงหมู่ของผลึก (crystallinity band) ซึ่งสามารถสังเกตความเป็นผลึกมากหรือความเป็นผลึกน้อยได้จากความเข้มของพีคในช่วงเลขคลื่นดังกล่าว หากมีความเข้มของพีคน้อยจะแสดงถึงความเป็นผลึกต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากมีความเข้มของพีคมากจะแสดงถึงความเป็นผลึกสูง (Ciolacu *et al.*, 2011) ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วงคลื่น 898 cm^{-1} เกิดจากการยืดหดของ C-O-C ที่พันธะ -1,4-glycosidic linkage เป็นช่วงที่แสดงถึงส่วนที่มีความไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ของไมโครเซลลูโลส หากมีความเข้มของพีคน้อยจะแสดงถึงความเป็นอสัณฐานน้อย ในทางตรงกันข้าม หากมีความเข้มของพีคน้อยจะแสดงถึงความเป็นผลึกน้อย (Ciolacu *et al.*, 2011)

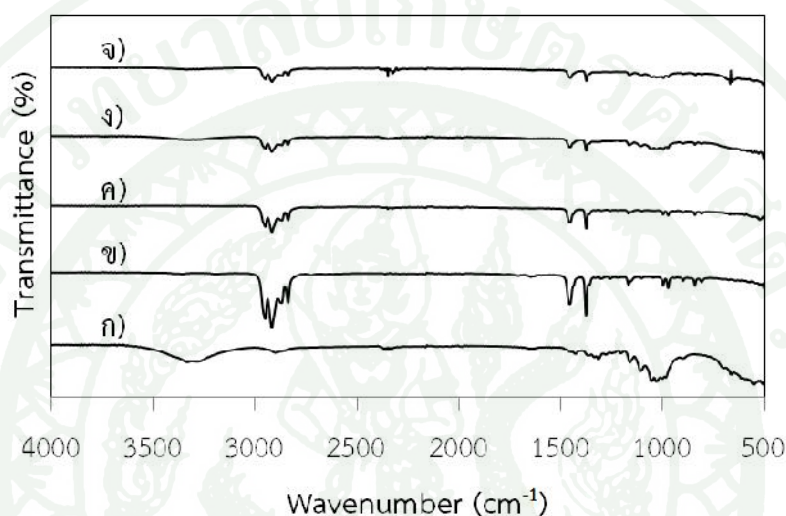
ตารางที่ 4 ตำแหน่งเลขคลื่นในหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของไมโครเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเศษผ้าฝ้าย

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm ⁻¹)
การสั่นแบบยืดหดของ O-H (O-H stretching vibration)	3400
การสั่นแบบยืดหดของ CH (C-H stretching vibration)	2900-2905
การยืดหดและการงอบนพื้นผิวของ O-H (O-H surface stretching and bending)	1635-1653
การงอของวง C-H อะโรมาติก (C-H ring-aromatic bending)	1507
การสั่นแบบงอของ CH ₂ (CH ₂ -bending vibration)	1426-1432
การสั่นแบบยืดหดของ C-H, CH ₂ และ C-O (C-H, CH ₂ and C-O stretching vibration)	1140-1400
การงอของ O-H (O-H bending)	1332
การยืดหดของ C-O-R (C-O-R stretching)	1055-1059
การยืดหดของ C-O-C ที่พันธะ -1,4-glycosidic linkage (C-O-C stretching at -1,4-glycosidic linkages)	898
การงอของหมู่ C-H ของวงอะโรมาติก (aromatic C-H bending)	770-730, 710-690

2. ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพอริลีนผสมไมโครเซลลูโลสและ กรดไอโซแทคติกพอลิพอริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

2.1 เคมีพื้นผิวของไอโซแทคติกพอลิพอริลีนผสมไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสาร
ประสานพอลิพอริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากการตรวจสอบเคมีพื้นผิวของไอโซแทคติกพอลิพพรินผสมไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm^{-1} ดังในแสดงภาพที่ 12 และพบความสัมพันธ์ และ พบความสัมพันธ์ของหมู่ฟังก์ชันและเลขคลื่น สรุปไว้ในตารางที่ 5 (Barra *et al.* (1999); Chongprakobkit *et al.* (2007); Ciolacu *et al.* (2011); Colom *et al.* (2003); Jia *et al.* (2011); Lobo *et al.* (2003); Sclavons *et al.* (2000); Spoljaric *et al.* (2009)) พบว่า ช่วง



ภาพที่ 12 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) pure i-PP, (ง) i-PP/MC-20 phr และ (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

ของเลขคลื่น 3200-3430 cm^{-1} เกิดความแตกต่างกันของความเข้มพีคเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของไอโซแทคติกพอลิพพรินผสมไมโครเซลลูโลสที่มีการเติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 12(จ)) และสเปกตรัมของไอโซแทคติกพอลิพพรินผสมไมโครเซลลูโลสที่ไม่เติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 12(ง)) สังเกตได้ว่าสเปกตรัม (ง) ซึ่งไม่เติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะแสดงพีคในช่วงคลื่นดังกล่าวด้วยความเข้มที่สูงกว่าสเปกตรัม (จ) ที่เติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ของพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลสส่งผลให้ในสูตรที่เติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรากฏความเข้มพีคของหมู่ไฮดรอกซิลน้อยกว่าสูตรที่ไม่เติมสารประสานพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แต่พีคที่ปรากฏมีความแตกต่างกันไม่มาก (Aht-Ong *et al.*, 2011; Mwaikambo *et al.*, 2000) เนื่องจากปริมาณของพอลิพพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เติมนั้นไม่ได้มีปริมาณสูงจนสามารถทำให้เกิดความแตกต่างกันอย่างชัดเจนพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1634 cm^{-1} แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ของสารประสานพอลิพพรินกราฟต์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์และหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส โดยสังเกตได้จากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Aht-Ong *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2007; Mohanty *et al.*, 2006; Spoljaric *et al.*, 2009) จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน พันธะเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นส่งผลให้ไมโครเซลลูโลสเกิดการกระจายตัวในพอลิพอร์ลีนที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนผสมไมโครเซลลูโลส (Kim *et al.*, 2007) สายโซ่โมเลกุลของพอลิพอร์ลีนที่ปลายข้างหนึ่งของสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนโดยสร้างพันธะโควาเลนต์ ส่งผลให้มีการยึดเกาะกันที่ระหว่างไมโครเซลลูโลสและไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีน (อรอุษา, 2546) พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2900 cm^{-1} และ 1384 cm^{-1} เกิดความแตกต่างกันของความเข้มพีคเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนผสมไมโครเซลลูโลสที่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 12(จ)) และ สเปกตรัมของไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนผสมไมโครเซลลูโลสที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 12 (ง)) สังเกตได้ว่าสเปกตรัม (ง) ซึ่งไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะแสดงพีคในช่วงคลื่นดังกล่าวด้วยความเข้มที่สูงกว่าสเปกตรัม (จ) ที่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากการลดลงของการยืดหดของหมู่ C-H (C-H stretching) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2900 cm^{-1} และ การลดลงของการงอของหมู่ C-H (C-H bending) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1384 cm^{-1} ภายหลังการเติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นตำแหน่งเลขคลื่นที่ยืนยันถึงการมีอยู่ของสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Mwaikambo *et al.*, 2000; Spoljaric *et al.*, 2009)

ตารางที่ 5 ตำแหน่งเลขคลื่นในหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วย ไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm ⁻¹)	ลักษณะเฉพาะตัว
การสั่นแบบยืดหดของ O-H (O-H stretching vibration)	3400	MC
การสั่นแบบยืดหดของ C-H (C-H stretching vibration)	2900-2905	i-PP
การยืดหดของ C=O ของหมู่แอนไฮไดรด์ (C=O stretching of cyclic anhydride groups)	1720, 1780	PP-g-MA
การงอของ CH ₂ (CH ₂ -bending)	1426	MC
การงอของ O-H (O-H in plane bending)	1331	MC
การยืดหดของ C-OR-C ที่มีโครงสร้างไม่สมมาตร (antisymmetry bridge C-OR-C stretching)	1162	MC
การยืดหดของ C-O-R (C-O-R stretching)	1050-1170	i-PP
การยืดหดของ C-O-C ที่พันธะ -1, 4-glycosidic linkage (C-O-C stretching at -1, 4-glycosidic linkages)	898	MC
การงอของ C-H ของวงอะโรมาติก (aromatic C-H bending)	690-710, 730-770	MC

2.2 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนผสม ไมโครเซลลูโลส

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนผสมไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยมีปริมาณการผสมไมโครเซลลูโลสที่แตกต่างกันคือ 5, 10 และ 20 phr ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีอัตราส่วนของความยาว

ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เป็น 25:1 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 165-170 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิที่ใช้ในส่วนต่างๆของอุโมงค์ (barrel) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6 และมีความเร็วรอบของสกรูที่เหมาะสมในการขึ้นรูป คือ ความเร็ว

ตารางที่ 6 อุณหภูมิของส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนผสมไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ โดยกระบวนการอัดรีด

ภาวะควบคุม	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป									
โซน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ตาย
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	160	170	170	170	170	170	165	165	165	165

รอบ 40 รอบ/นาที จากนั้นวัสดุคอมพอสิตไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนผสมไมโครเซลลูโลสจะไหลเป็นเส้นออกมาจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูโดยไม่ผ่านรางน้ำเพื่อช่วยในการลดอุณหภูมิเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เนื่องจากไมโครเซลลูโลสมีความชอบน้ำหรือมีสภาพขั้วสูง (highly hydrophilic materials) ทำให้เกิดการบวมและพองตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ ก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอการขาดออกของเส้นพลาสติกคอมพอสิตที่ไหลออก ซึ่งส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการผ่านรางน้ำภายหลังการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรู ต่อมาเส้นพลาสติกคอมพอสิตจะถูกตัดให้มีลักษณะเป็นเม็ดด้วยความเร็ว 100-120 รอบต่อนาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดรีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

2.3 ภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

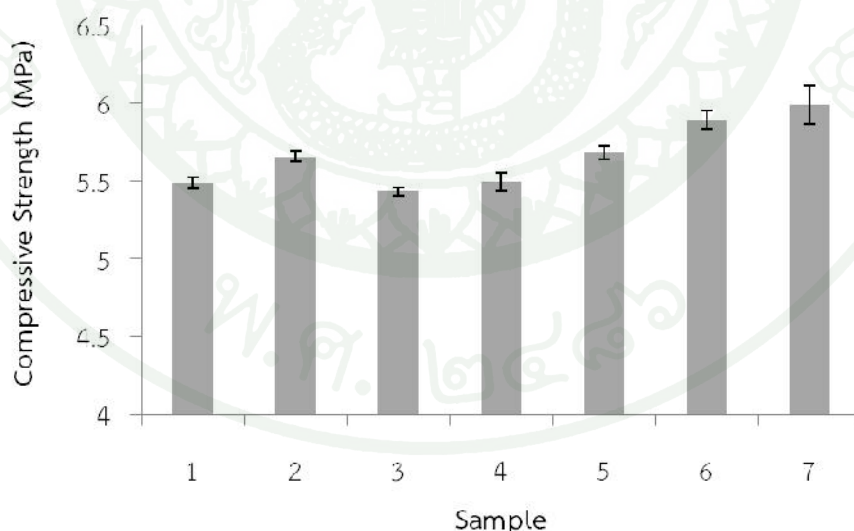
ภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ โดยมีปริมาณการผสมไมโครเซลลูโลสที่ต่างกันคือ 5, 10 และ 20 phr ด้วยเครื่องอัดรีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู เป็น 30:1 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 165-195 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิที่ใช้ในส่วนต่างๆของอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 7 และ มีความเร็วรอบของสกรูที่เหมาะสมในการขึ้นรูป คือ ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที จากนั้นเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ที่ได้จะนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงเคมี เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

ตารางที่ 7 อุณหภูมิของส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์โดยกระบวนการอัดฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

ภาวะควบคุม	อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป				
โซน	1	2	3	4	ตาย
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	165	181	189	179	195

2.4 สมบัติเชิงกลของพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

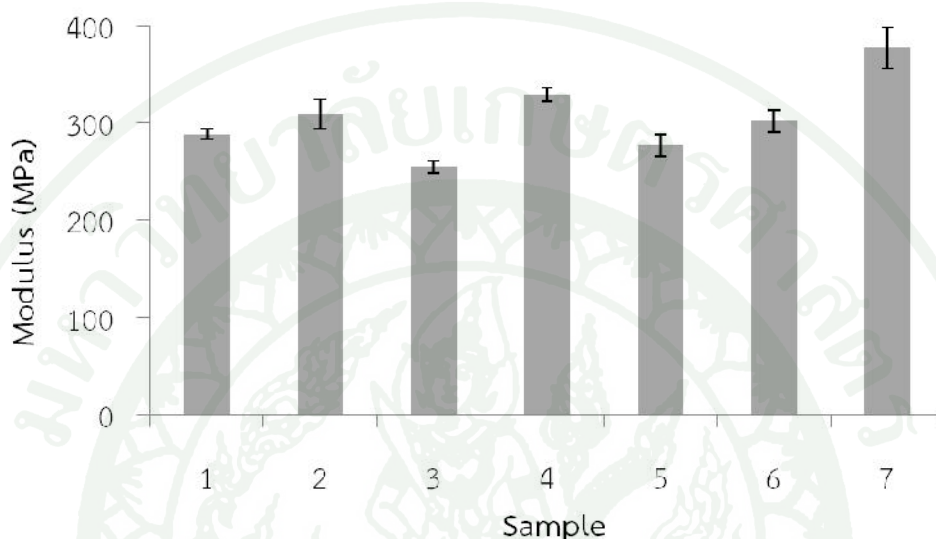
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลทดสอบดึงแมชชีนตามมาตรฐาน ASTM D695 ได้ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกด และค่ามอดุลัส โดยค่าความต้านทานแรงกดของพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ค่าความต้านทานแรงกดของพลาสติกไอโซแทกติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP/MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

พบว่า ภายใต้อิทธิพลของแรงดันด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด โดยมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.99 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.49 เมกะปาสคาล และพบว่า ภายใต้อิทธิพลของแรงดันด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณที่เท่ากันคือ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ให้ค่าความต้านทานแรงกดต่ำกว่าภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) โดยมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.49 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานแรงกดของภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ยังคงมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานแรงกดของภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) และไม่ได้มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ถึงแม้ว่าจะไม่ได้เติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดข้างต้น แสดงให้เห็นถึงผลของการเติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่สามารถปรับปรุงเคมีพื้นผิวของไมโครเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขี้ผึ้งสูงให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ของสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส ส่วนสายโซ่โมเลกุลพอลิพอร์ฟิไรต์ที่ปลายข้างหนึ่งของสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอโซแทกติกพอลิพอร์ฟิไรต์โดยการสร้างพันธะโควาเลนต์ ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างไอโซแทกติกพอลิพอร์ฟิไรต์และไมโครเซลลูโลส และพบว่ามีส่วนช่วยให้ไมโครเซลลูโลสกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์พอลิพอร์ฟิไรต์ แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของไมโครเซลลูโลสและพอลิพอร์ฟิไรต์เมทริกซ์ (อรอุษา, 2546; Amash *et al.*, 2000; Bengtsson *et al.*, 2007; Gauthie *et al.*, 1998; joly *et al.*, 1996; kim *et al.*, 2008; Mwaikamabo *et al.*, 2000; Spoljaric *et al.*, 2009) ด้วยเหตุนี้ ค่าความต้านทานแรงกดอัดของภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) จึงมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณอื่นๆ คือ 5 และ 10 phr ที่มีการเติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก็มีแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับ ภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณไมโครเซลลูโลสที่เท่ากันคือ 20 phr ซึ่งเกิดความไม่เข้ากันระหว่างไมโครเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำและพอลิพอร์ฟิไรต์ที่มีความไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของไมโครเซลลูโลสในไอโซแทกติกพอลิพอร์ฟิไรต์ รวมถึงการเกาะกลุ่มกันเองของไมโครเซลลูโลสในไอโซแทกติกพอลิพอร์ฟิไรต์เมทริกซ์ ทำให้บางส่วนของไมโครเซลลูโลสไม่เกิดอันตรกิริยากับไอโซแทกติกพอลิพอร์ฟิไรต์เป็นสาเหตุทำให้ภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) มีค่าความต้านทานแรงกดลดลง และจากผลการทดสอบค่ามอดุลัสของภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพที่ 14 พบว่าภายใต้อิทธิพลของพอลิพอร์ฟิไรต์เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอร์ฟิไรต์มาเลอิกแอนไฮ

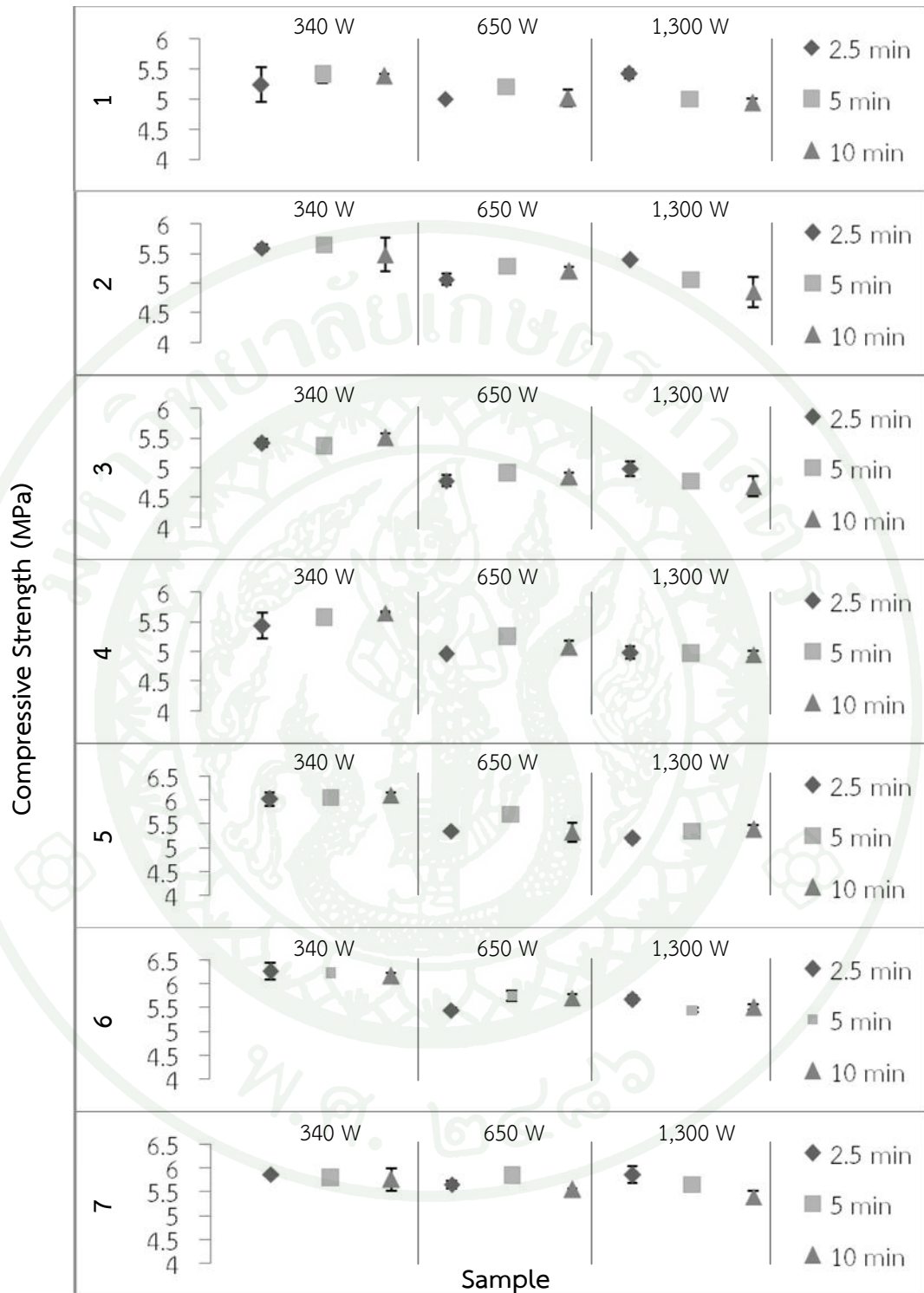
ไตรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ให้ค่ามอดุลัสสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 377.37 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) ซึ่งให้ค่ามอดุลัสเท่ากับ 288.73 เมกะปาสคาล และ พบว่ากรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณที่



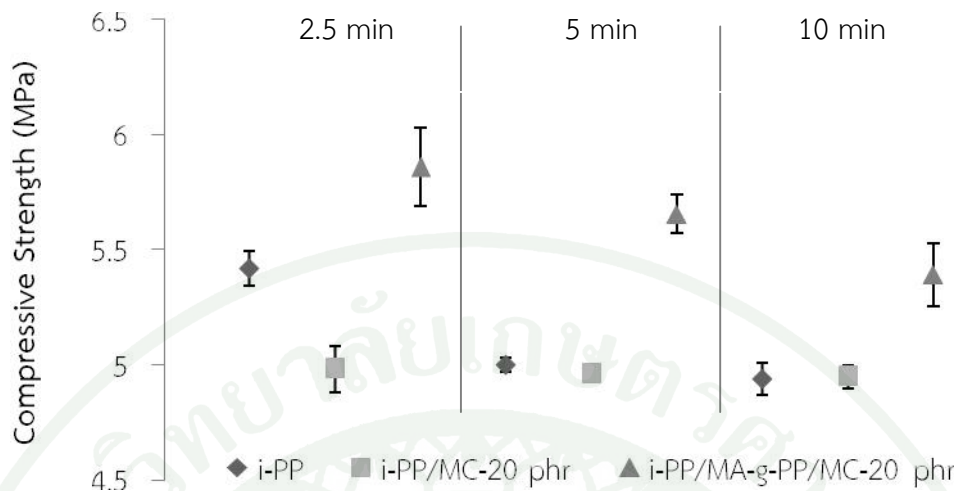
ภาพที่ 14 ค่ามอดุลัสของกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟ (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP /MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

เท่ากันคือ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่ากรด (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) โดยมีค่ามอดุลัสเท่ากับ 329.47 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่สังเกตได้ว่าค่ามอดุลัสของกรด (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ยังคงแสดงค่ามอดุลัสสูงกว่าค่ามอดุลัสสูงของกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ถึงแม้ไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ จากผลการทดสอบข้างต้นเกิดการเกิดอันตรกิริยาที่ตระหว่างไมโครเซลลูโลสและไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน โดยใช้เหตุผลในการอธิบายพฤติกรรมการเกิดอันตรกิริยาเช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงกด ซึ่งค่าทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกัน (Amash *et al.* , 2000; Bengtsson *et al.* , 2007; Qiu *et al.* , 2006; Spoljaric *et al.* , 2009) คือ เมื่อมีการเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 5 phr (i-PP/MC-5 phr, ตัวอย่างที่ 2) พบว่าค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสมีค่าเท่ากับ 5.66 และ 309.23 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความ

ต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสของภาคที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 10 phr (i-PP/MC-10 phr, ตัวอย่างที่ 3) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.43 และ 254.87 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 5 phr ถือเป็นปริมาณที่น้อยและไม่มากพอที่จะทำให้ไมโครเซลลูโลสมีโอกาสในการเกาะกลุ่มก้อน (agglomeration) ส่งผลให้ไมโครเซลลูโลสมีการกระจายตัวภายในพอลิพอร์สตีลเมทริกซ์ที่ดีกว่าและด้วยความเป็นอนุภาคของไมโครเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นเส้นใย จึงสามารถทำหน้าที่เสริมการต้านทานแรงที่มากกระทำจากการทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ส่งผลให้ภาค (i-PP/MC-5 phr, ตัวอย่างที่ 2) มีค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสสูงขึ้นไป (Kim *et al.*, 2008; Mwaikambo *et al.*, 2000; Qiu *et al.*, 2006) ต่างจากการเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 10 phr ซึ่งมีปริมาณไมโครเซลลูโลสที่มากกว่า ไมโครเซลลูโลสจึงมีโอกาสในการเกาะกลุ่มก้อนกันมากขึ้น จึงเป็นการลดพื้นที่ผิวในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไมโครเซลลูโลสและพอลิพอร์สตีลเมทริกซ์ เกิดการเพิ่มโอกาสในการแยกชั้นกันระหว่างไมโครเซลลูโลสและพอลิพอร์สตีลเมทริกซ์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสลดลง แต่จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสเท่ากับ 5.49 และ 329.47 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ค่าการทดสอบทั้งสองไม่ได้ลดลงเนื่องจากการเกาะกลุ่มก้อนของไมโครเซลลูโลส ในทางตรงกันข้าม ยังมีค่าการทดสอบสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบของภาค (i-PP/MC-10 phr, ตัวอย่างที่ 3) ถึงแม้จะมีการเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณมากกว่า เนื่องจากปริมาณการเติมไมโครเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิพอร์สตีลนั้น เมื่อเติมถึงปริมาณหนึ่งที่ไมโครเซลลูโลสจะสามารถแสดงพฤติกรรมเกี่ยวพันกันของเส้นใยไมโครเซลลูโลส (entanglement) (Kim *et al.*, 2008) ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยไมโครเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยในการเสริมแรงให้กับภาค (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ได้ และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของภาคไอโซเทคติกพอลิพอร์สตีลเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอร์สตีลกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ หลังการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน โดยค่าความต้านทานแรงกดดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่าหลังการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟ ทำให้ไอโซเทคติกพอลิพอร์สตีลเกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบอีกครั้ง ทำให้ความเป็นผลึกของไอโซเทคติกพอลิพอร์สตีลเพิ่มขึ้น (Siripatrawan *et al.*, 2000) ส่งผลให้ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟของทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจในการเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลของภาคไอโซเทคติกพอลิพอร์สตีลเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอร์สตีลกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ เมื่อมีการใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน จากภาพที่ 16 พบว่า ภาคไอโซเทคติกพอลิพอร์สตีลเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมสารประสานพอลิพอร์สตีลกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ที่สภาวะการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟ 1,300 วัตต์เป็นเวลา 2.5 นาที ให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด โดยให้ค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.86 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับภาคไอโซเทคติกพอลิพอร์สตีล



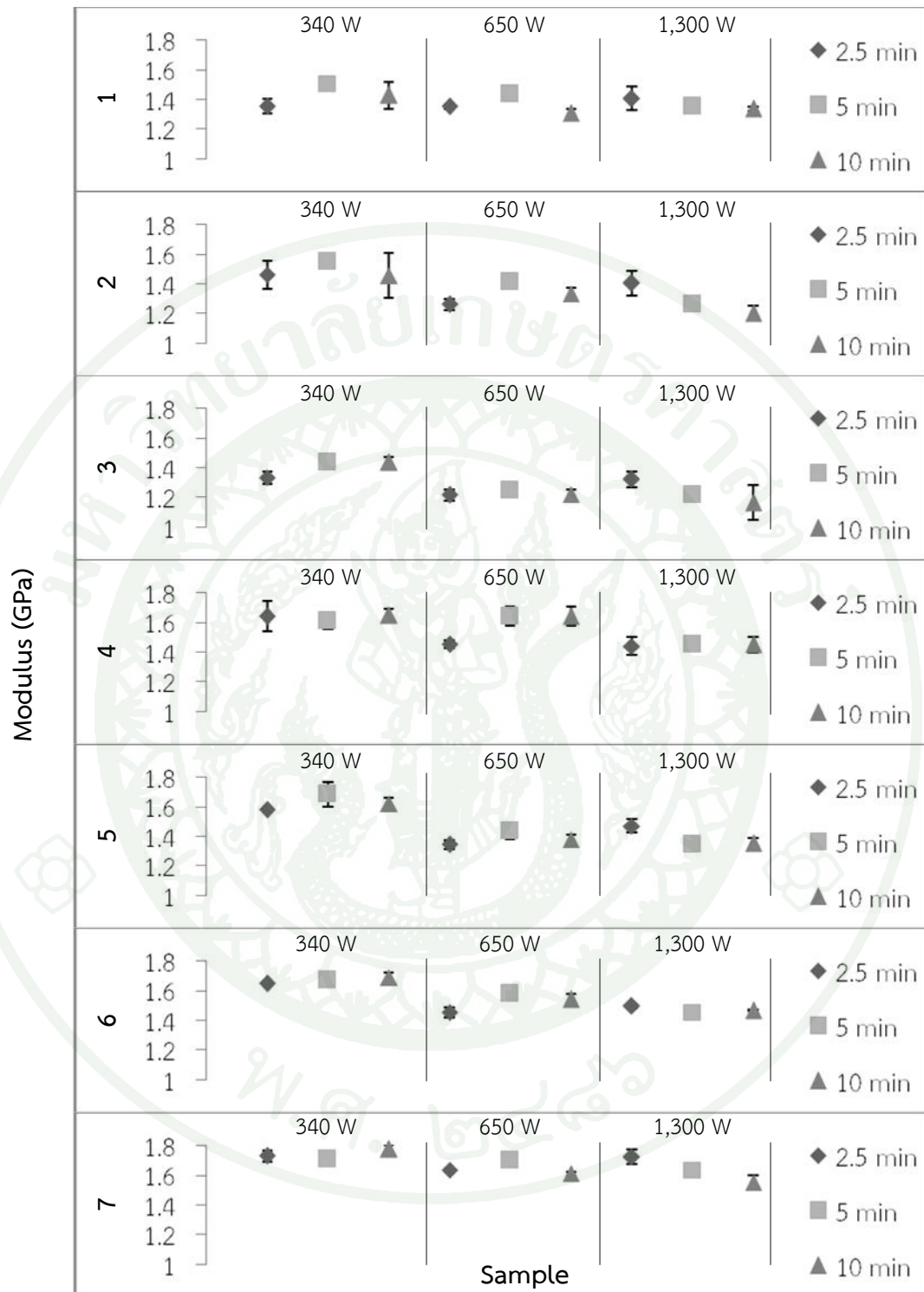
ภาพที่ 15 ค่าความต้านทานแรงกดของถาดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP/MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr



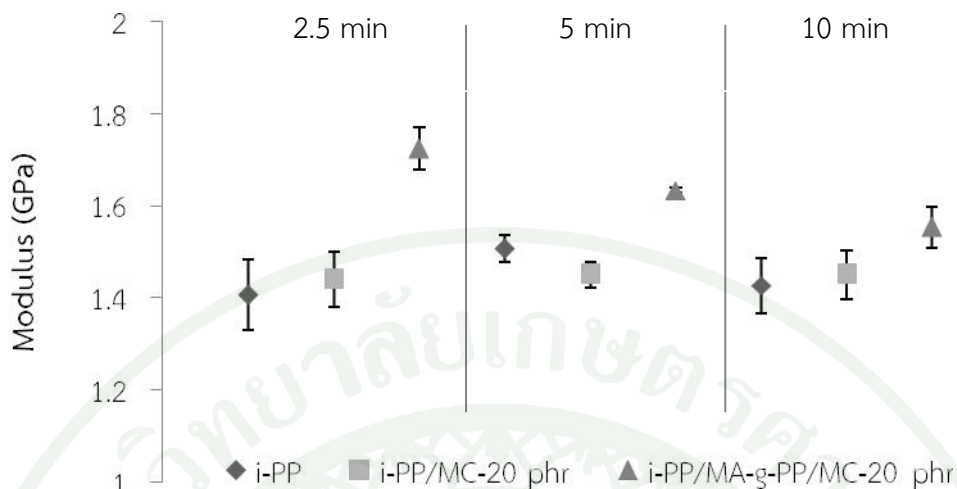
ภาพที่ 16 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของถาด i-PP, i-PP/MC-20 phr และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน

ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) ที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.42 เมกะปาสคาล และพบว่า ที่สภาวะการใช้งานเดียวกันถาดไอโซเทคติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณที่เท่ากันคือ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ให้ค่าความต้านทานแรงกดอัดต่ำกว่าถาด (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) โดยมีค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 4.98 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ทำให้เห็นถึงความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารประสานได้เป็นอย่างดีดังกล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้ พบว่าที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เวลาที่ใช้มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกด โดยที่เวลา 2.5 และ 10 นาที ให้ค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.86 และ 5.39 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ที่เวลา 5 นาที ให้ค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.65 เมกะปาสคาล ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เวลา 2.5 และ 10 นาที ในขณะที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์ และ 650 วัตต์ เวลาที่ใช้ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) จากผลการทดสอบสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงกดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากเวลาที่ใช้ได้จากสมบัติความเป็นฉนวนสูง (high dielectric properties) ของพอลิพอร์ลีนที่สามารถดูดซับรังสีไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ คือ เมื่อมีการให้รังสีไมโครเวฟกับถาดทดสอบพอลิพอร์ลีน เมทริกซ์จะเกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของพอลิพอร์ลีนจะถูกเหนี่ยวนำและหมุนชั่วเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟหรือเกิดการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้ว (dipolar polarization) ของโมเลกุลที่มีขั้วถาวรหรือพันธะเคมี ทำให้โมเลกุลมีการหมุนกลับไปมานับล้านครั้งต่อวินาที ก่อให้เกิดแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของพอลิพอร์ลีน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า

ความจุความร้อนโดยปริมาตรหรือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้อุณหภูมิของสสารหนึ่งหน่วยปริมาตรมีค่าสูงขึ้นหนึ่งองศาของพอลิพอพริลีนเมทริกซ์ (Chandrasekaran *et al.*, 2012) ดังนั้น ที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่มีการใช้กำลังไฟฟ้าสูง คือ 1,300 วัตต์ ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลชัดเจนที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงกด มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อมีการใช้เวลาที่แตกต่างกัน โดยค่าความต้านทานแรงกดของภาคทดสอบมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการใช้เวลาภายใต้ตู้อบไมโครเวฟนานขึ้น ซึ่งให้ผลการทดสอบเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ นอกจากนี้ จากการทดสอบค่ามอดูลัสของภาคไอโซเทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 17 พบว่าที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ 1,300 วัตต์ เวลาที่ใช้มีผลต่อค่ามอดูลัสของภาคทดสอบในทุกสูตรซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่ลดลงของค่ามอดูลัส เมื่อใช้เวลาในการทดสอบนานขึ้น ในขณะที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ 340 และ 650 วัตต์ เวลาที่ใช้ไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสของภาคทดสอบในทุกสูตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) และพบว่า ภาคไอโซเทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ 340 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ให้ค่ามอดูลัสสูงสุด ซึ่งมีค่ามอดูลัสเท่ากับ 1.77 จิกะปาสคาล (GPa) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับภาคในสูตรเดิม (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) แต่มีการทดสอบที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที ซึ่งให้ค่ามอดูลัส 1.72 จิกะปาสคาล ซึ่งถือเป็นค่ามอดูลัสสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามอดูลัสของภาคทดสอบในทุกๆสูตร ที่มีสภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ 1,300 วัตต์ ซึ่งค่ามอดูลัสของภาค (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ที่ทำการทดสอบทั้งสองสภาวะข้างต้น ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับภาคไอโซเทคติกพอลิพอพริลีนที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, 1) ที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน คือ ที่ 340 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที และ ที่ 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที ซึ่งให้ค่ามอดูลัสเท่ากับ 1.43 และ 1.41 จิกะปาสคาลตามลำดับ และพบว่า ที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน ภาคไอโซเทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณที่เท่ากันคือ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ให้ค่ามอดูลัสต่ำกว่าภาค (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) โดยมีค่ามอดูลัสเท่ากับ 1.65 และ 1.44 จิกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ทำให้เห็นถึงความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารประสานของพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสของภาคทดสอบที่มีสภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ 1,300 วัตต์ ในทุกเวลาที่ใช้ เนื่องจากเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่พบค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุดและที่สภาวะการใช้งานจริง สามารถลดเวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟได้



ภาพที่ 17 ค่ามอดุลัสของถาดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP /MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr



ภาพที่ 18 เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของถาด i-PP, i-PP/MC-20 phr และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน

จากภาพที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของถาด i-PP, i-PP/MC-20 ค่ามอดุลัสของถาด i-PP, i-PP/MC-20 phr และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน พบว่า ถาดไอโซแทกติกพอลิพพรลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมสารประสานพอลิพพรลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ให้ค่ามอดุลัสสูงสุด ในทุกเวลาที่ใช้ โดยมีค่ามอดุลัสเท่ากับ 1.72, 1.63 และ 1.53 จิกะปาสคาล ที่เวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับถาดไอโซแทกติกพอลิพพรลีนที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) ซึ่งมีค่ามอดุลัสเท่ากับ 1.41, 1.35 และ 1.34 จิกะปาสคาล ที่เวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ และ พบว่า ถาดไอโซแทกติกพอลิพพรลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณที่เท่ากัน คือ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพพรลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 4) ให้ค่ามอดุลัสต่ำกว่าถาด (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) โดยมีค่ามอดุลัสเท่ากับ 1.44, 1.45 และ 1.45 จิกะปาสคาล ที่เวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ทำให้เห็นถึงความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารประสานของพอลิพพรลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้ พบว่าที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เวลาที่ใช้มีผลต่อค่ามอดุลัส โดยที่เวลา 2.5 และ 10 นาที ให้ค่ามอดุลัสเท่ากับ 5.86 และ 5.39 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ที่เวลา 5 นาที ให้ค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 5.65 เมกะปาสคาล ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เวลา 2.5 และ 10 นาที ในขณะที่สภาวะการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์ และ 650 วัตต์ เวลาที่ใช้ไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

2.5 สมบัติเชิงความร้อนของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน (heat flow) ที่ให้กับสารตัวอย่างและเทียบกับสารมาตรฐาน เป็นฟังก์ชันของเวลาหรืออุณหภูมิ ในการทดลองมีการกำหนดและควบคุมอุณหภูมิที่ให้กับสารทดสอบและสารมาตรฐาน การทดสอบด้วยเทคนิคนี้ ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของความร้อนในระบบที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนหรือถูกทำให้เย็นตัวลง (ปิ่นสุภา, 2545) ซึ่งผลทดสอบที่ได้จากเทคนิค DSC ได้แก่ อุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallinity temperature, T_c) มีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการก่อผลึกของพอลิเมอร์ อุณหภูมิในการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) มีความเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (enthalpy of melting or heat of fusion) ซึ่งสัมพันธ์กับส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์ และร้อยละความเป็นผลึก (percentage of crystallinity, X_c (%)) คือ ค่าที่มีความเกี่ยวข้องเป็นฟังก์ชันกับสถานะของกระบวนการตกผลึก เมื่อพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกถูกทำให้หลอมเหลวและเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิต่ำพอ จะพบอุณหภูมิค่าหนึ่งหรือปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเข้าสู่ค่าคงที่เท่ากับ X_c ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (enthalpy of melting or heat of fusion) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทดสอบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีโครงสร้างผลึกสมบูรณ์ (completely crystalline polymer) (ปิ่นสุภา, 2545)

ตารางที่ 8 อุณหภูมิในการเกิดผลึก อุณหภูมิในการหลอมเหลว และร้อยละของผลึก

ตัวอย่าง	T_c (องศาเซลเซียส)	T_m (องศาเซลเซียส)	X_c (%)
1	129.11	160.72	51.38
2	127.71	155.67	49.69
3	122.52	158.96	47.76
4	121.41	158.72	52.94
5	120.34	159.67	50.82
6	121.91	159.09	50.90
7	122.28	158.69	50.94

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของสมบัติเชิงความร้อนของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50-230 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (Qiu *et al.*, 2006) ผลการทดสอบที่ได้ แสดงดังตารางที่ 8 พบว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่ไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์

มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 2, 3, และ 4) และที่มีการเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์ มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 5, 6 และ 7) ในปริมาณไมโครเซลลูโลส 5, 10 และ 20 phr ตามลำดับ มีแนวโน้มต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส (ตัวอย่างที่ 1) แสดงให้เห็นได้ว่าไมโครเซลลูโลสที่เติมเข้าไปในไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ให้กับไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสได้ เนื่องจากปริมาณของไมโครเซลลูโลสที่เกิดอันตรกิริยาที่ติดกับไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสอาจมีปริมาณน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกเพิ่มขึ้นในไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ได้หรืออาจเกิดผลึกในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสที่ไม่เติมไมโครเซลลูโลส จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดผลึกมีแนวโน้มต่ำลง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสที่เติมไมโครเซลลูโลสจะมีแนวโน้มต่ำลงแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อภาวะเหมาะสมในการขึ้นรูปภาคเนื่องจากอุณหภูมิในการเกิดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสที่เติมไมโครเซลลูโลสมีค่าต่ำลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปภาคอยู่ในช่วง 165-195 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสค่อนข้างมาก

ในการวิเคราะห์อุณหภูมิในการหลอมเหลว พบว่า อุณหภูมิในการหลอมเหลวของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่ไม่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์ มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 2, 3, และ 4) และที่มีการเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์ มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 5, 6 และ 7) ในปริมาณไมโครเซลลูโลส 5, 10 และ 20 phr ตามลำดับมีแนวโน้มต่ำกว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส (ตัวอย่างที่ 1) เพียงเล็กน้อย (Luz *et al.*, 2008; Spoljaric *et al.*, 2009) จนถือได้ว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิในการหลอมเหลวของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส (Mwaikambo *et al.*, 2000) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการหลอมเหลวสัมพันธ์กับขนาดของผลึกในไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส หากการเกิดผลึกในระบบมีผลทำให้ผลึกมีขนาดโตขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้น แต่ถ้าการเกิดผลึกในระบบมีผลทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลงจะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำลง ดังนั้นจากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าไมโครเซลลูโลสที่เติมในไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสมีปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกเพิ่มขึ้นในระบบได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังพบว่าการลดลงของอุณหภูมิในการหลอมเหลวของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสที่เติมไมโครเซลลูโลส เป็นผลจากการเกิดผลึกของไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์ที่เกิดผลึกขึ้นรอบๆไมโครเซลลูโลส ซึ่งทำให้เกิดความอ่อนแอของอันตรกิริยาระหว่างไมโครเซลลูโลสกับไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส (Luz *et al.*, 2008) ทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสลดลง

ในการวิเคราะห์ร้อยละความเป็นผลึก พบว่าร้อยละความเป็นผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่ไม่มีการเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 2, 3, และ 4) และที่มีการเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริสกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 5, 6 และ 7) ในปริมาณไมโครเซลลูโลส 5, 10 และ 20 phr ตามลำดับ มี

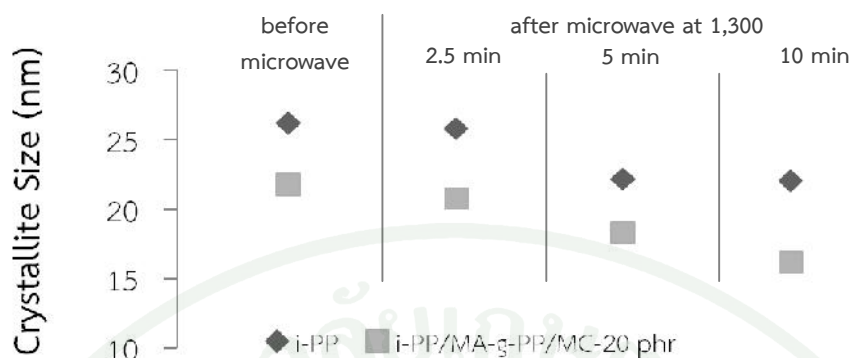
แนวโน้มไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับร้อยละความเป็นผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีน (ตัวอย่างที่ 1) เนื่องจากการเติมไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิพรีลีนมีปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของร้อยละความเป็นผลึก อีกทั้งยังพบว่า การเกิดผลึกของไอโซแทคติกพอลิพรีลีนและไมโครเซลลูโลสมีความแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างวงไพราโนส (pyranose ring) ของไมโครเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่ไม่ขนานกัน (anti-parallel manner) และรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลของไอโซแทคติกพอลิพรีลีนที่ไม่สามารถเกิดผลึกในโครงสร้างของไมโครเซลลูโลสได้ ทำให้การเกิดผลึกเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนที่เติมไมโครเซลลูโลสลดลงเล็กน้อย (Spoljaric *et al.*, 2009) โดยปรากฏในกรณีของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่ไม่มีการเติมสารประสานพอลิพรีลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ในปริมาณไมโครเซลลูโลส 5 และ 10 phr ตามลำดับ

2.6 สมบัติเชิงกายภาพของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

2.6.1 การวิเคราะห์ผลึก

การวิเคราะห์ผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เป็นเทคนิคที่อาศัยการเลี้ยวเบน (diffraction) ของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีเอ็กซ์กระทบกับวัสดุจะเกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งแสดงออกในรูปแบบของการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) โดยให้ตำแหน่งของพีคและข้อมูลต่างๆ ที่สามารถใช่งชี้ลักษณะความเฉพาะตัวของวัสดุได้ ได้ผลการทดสอบคือตำแหน่งของพีค โดยผลการทดสอบออกมาในรูปของมุมเซต้า (theta degree) จะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของโครงผลึก ความสูงหรือขนาดของพีคจะสัมพันธ์กับลักษณะการจัดเรียงตัว และตำแหน่งของอะตอมในหน่วยเซลล์ (unit cell) รูปร่างของพีครวมถึงค่าความสูงครึ่งหนึ่งของพีคจะสัมพันธ์กับขนาดของโครงผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก (ปิ่นสุภา, 2545)

จากการวิเคราะห์ผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีน (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) และกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมสารประสานพอลิพรีลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr, ตัวอย่างที่ 7) ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ที่เวลาแตกต่างกัน ด้วยเครื่องบรูกเกอร์แอดวานซ์เอ็กซ์เรย์โซลูชัน (Bruker Advanced X-ray Solutions) ผลทดสอบ พบว่าขนาดผลึกของกรดที่สภาวะก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพที่ 19 เมื่อเติมไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิพรีลีน มีผลทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลงเท่ากับ 21.77 นาโนเมตร (nm) เมื่อเทียบกับขนาดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนที่ไม่เติมไมโครเซลลูโลส ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 26.22 นาโนเมตร เนื่องจากไมโครเซลลูโลสที่เติมลงไปนั้นมีขนาดผลึกเท่ากับ 6.45 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดผลึกของไอโซแทคติกพอลิพรีลีนค่อนข้างมาก อีกทั้งในการเกิดอันตรกิริยา

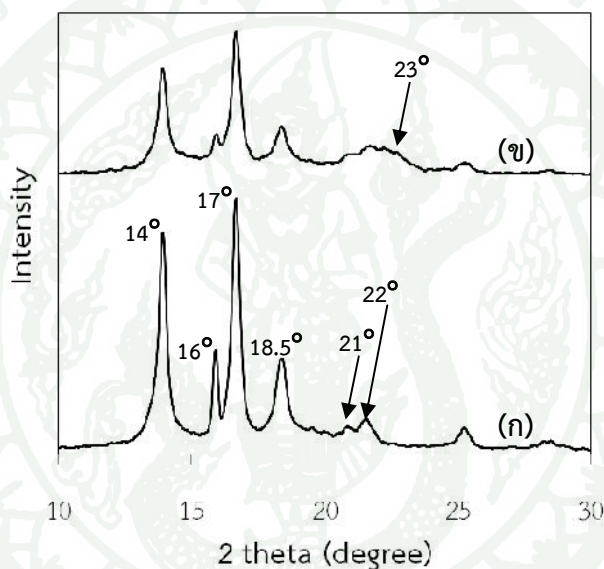


ภาพที่ 19 ขนาดผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนและกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมสารประสานพอลิพรีลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

ระหว่างไมโครเซลลูโลสกับไอโซแทคติกพอลิพรีลีนจะมีการสร้างพันธะโควาเลนต์ ทำให้หมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลของไอโซแทคติกพอลิพรีลีนลดลง เนื่องจากหมู่เมทิลบางส่วนเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส จึงลดโอกาสในการสร้างโครงผลึกของไอโซแทคติกพอลิพรีลีน ดังนั้นการเติมไมโครเซลลูโลสจึงสามารถเหนี่ยวนำให้ผลึกของไอโซแทคติกพอลิพรีลีนมีขนาดเล็กลง และสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ เนื่องจากวัสดุที่มีผลึกขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการกระจายแรงมากกว่าวัสดุที่มีผลึกขนาดใหญ่ ทำให้วัสดุที่มีผลึกขนาดเล็กสามารถรับแรงกดอัดหรือแรงจากการทดสอบได้มากขึ้น ส่งผลต่อผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่มีค่าสูงขึ้น

โดยทั่วไป ลักษณะโครงสร้างผลึกของไอโซแทคติกพอลิพรีลีนสามารถเกิดผลึกได้ 3 ลักษณะคือ โมโนคลินิกหรือแอลฟา (monoclinic, α), เฮกซะโกนอลหรือเบต้า (hexagonal, β) และไตรคลินิกหรือแกมมา (triclinic, γ) และในไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเกรดการค้าจะพบโครงสร้างผลึกแบบแอลฟามากกว่าผลึกแบบเบต้า (Kotek et al., 2004) ส่วนเซลลูโลสจะประกอบด้วยโครงสร้างผลึก 2 รูปแบบ ได้แก่ หนึ่งสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างไตรคลินิก (one chain triclinic structure, I) และสองสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างโมโนคลินิก (two chain monoclinic structure, I) (Samir et al., 2005) จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractograms) ของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนและกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพรีลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพที่ 20 พบว่ามีพีค 5 ตำแหน่งที่แสดงถึงวัฏภาคแอลฟา (α -phase) ของไอโซแทคติกพอลิพรีลีน บนระนาบ (110), (040), (130), (111) และ (041) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต้า ได้แก่ 14° , 17° , 18.5° , 21° และ 22° ตามลำดับ และพีคที่แสดงถึงวัฏภาคเบต้า (β -phase) ของไอโซแทคติกพอลิพรีลีน บนระนาบ (300) โดยปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต้า คือ 16° และพีคที่แสดงถึงวัฏภาค I ของไมโครเซลลูโลส บนระนาบ (200) โดยปรากฏในรูปแบบ

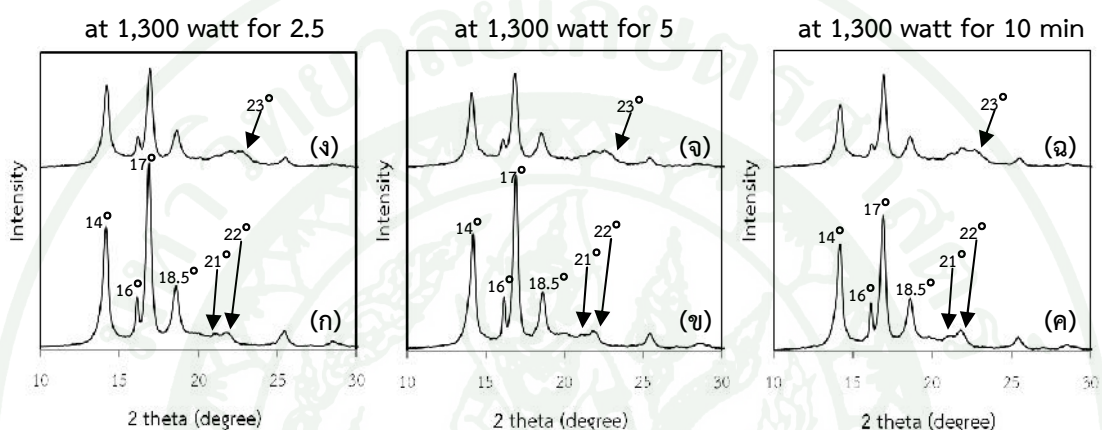
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2 เซต่า คือ 23° (Ljungberg *et al.*, 2006) จากภาพที่ 19 พบว่า ความเข้มพีค (intensity) ที่มุม 2 เซต่า ตำแหน่ง 14° , 17° , 18.5° , 21° และ 22° ของกรดไอโซแทคติกพอลิพอ-พริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิก-แอนไฮไดรด์ (ข) ซึ่งมีความเข้มพีคเท่ากับ 398, 533, 187, 87 และ 116 ตามลำดับ โดยมีความเข้มพีคน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเข้มพีคของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน (ก) ซึ่งมีความเข้มพีคเท่ากับ 797, 926, 347, 96 และ 127 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความเป็นผลึกที่ลดลงของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเมื่อมีการเติมไมโครเซลลูโลส สาเหตุอาจเนื่องมาจากรูปแบบโครงผลึกของไมโครเซลลูโลสที่แตกต่างกับไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน ทำให้เกิดการขัดขวางการสร้างโครงผลึกของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนได้



ภาพที่ 20 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน (ก) และกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ข) ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน และกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 21 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้น คือ 2.5, 5 และ 10 นาที ความเข้มพีคที่มุม 2 เซต่า ตำแหน่ง 14° , 16° , 17° , 18.5° , 21° และ 22° ของกรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ((ง), (จ) และ (ฉ)) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อธิบายได้ว่า เมื่อมีการใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้น กรดไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิ

พอลิพรินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีร้อยละความเป็นผลึกลดลงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงถึงเสถียรภาพเชิงผลึกที่ดีเมื่อใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้น คือ 2.5, 5 และ 10 นาที ความเข้มพีคที่มุม 2 เซต่า ตำแหน่ง 14° , 16° , 17° และ 18.5° ของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีน ((ก), (ข) และ (ค)) ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่ง 17° ส่งผลให้ปริมาณผลึกของวัฏภาคแอลฟาลดต่ำลง อธิบายได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีน (ก), (ข) และ (ค) และกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ง), (จ) และ (ฉ) หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที



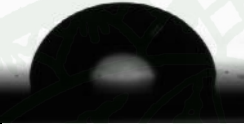

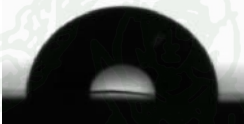

กรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนจะมีร้อยละความเป็นผลึกลดลงอย่างชัดเจน แสดงถึงเสถียรภาพเชิงผลึกที่ไม่ดี ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีน โดยมีค่าความต้านทานแรงกด และค่ามอดุลัสลดต่ำลง เมื่อใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ เนื่องจากเวลาที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของพอลิพริลีนจากการเหนี่ยวนำและหมุนซ้ำเพื่อปรับเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟหรือเกิดการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้ว (dipolar polarization) ของโมเลกุลที่มีขั้วถาวรหรือพันธะเคมี ทำให้โมเลกุลมีการหมุนกลับไปมาซ้ำกันครั้งต่อวินาที (Chandrasekaran *et al.*, 2012) อาจเป็นการขัดขวางการสร้างโครงผลึกของไอโซแทคติกพอลิพริลีนได้ ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ความเข้มพีคที่เปลี่ยนแปลงไปของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า เมื่อเติมไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิพริลีนจะส่งผลให้เกิดการลดลงของขนาดผลึก การลดลงของร้อยละความเป็นผลึก และการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพเชิงผลึก

2.6.2 ลักษณะทางพื้นผิว

การทดสอบลักษณะทางพื้นผิวของวัสดุเป็นเทคนิคที่อาศัยความสามารถของของเหลวในการปกคลุมหรือสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ โดยการหยดของเหลวที่มีสภาพผิวที่สนใจศึกษา เช่น น้ำจะแสดงสภาพผิวสูง และน้ำมันจะแสดงสภาพผิวต่ำ ลงบนพื้นผิวของวัสดุ เพื่อวิเคราะห์สภาพผิวของพื้นผิววัสดุ โดยอาศัยค่าพลังงานอิสระพื้นผิว (surface free energy) ของพื้นผิววัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นพลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของพื้นผิวของแข็ง เกิดจากองค์ประกอบที่มีขั้ว (polar component) บนพื้นผิวของวัสดุทดสอบนั้นๆ ถ้าหากมีค่าพลังงานอิสระพื้นผิว มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของของเหลว โมเลกุลของของเหลวจะมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลใกล้เคียงบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบมากขึ้น ส่งผลให้ของเหลวที่หยดลงบนพื้นผิวของวัสดุเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวมากขึ้น (Mirabedini *et al.*, 2004)

จากการทดสอบลักษณะทางพื้นผิวของภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนและภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ทั้งที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส โดยใช้ของเหลวในการทดสอบคือ น้ำ และน้ำมัน ได้ผลการทดสอบเป็นค่ามุมสัมผัส (เซต้า) ระหว่างของเหลวที่ใช้ทดสอบกับพื้นผิวของภาคทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่าภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 4) มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำสุด และมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันสูงสุด แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมไมโครเซลลูโลสมีผลทำให้ไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนที่มีความไม่ชอบน้ำให้มีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโดยธรรมชาติของเซลลูโลสนั้นจะมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพผิวสูงเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสที่มีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำโดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ (Franco and González, 2005) ส่วนภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 7) มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำสูงกว่า ภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 4) แต่ต่ำกว่าภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีน (ตัวอย่างที่ 1) และมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันไม่ต่างกับภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 4) แต่สูงกว่าภาคไอโซแทกติกพอลิพอร์ลีน (ตัวอย่างที่ 1) เนื่องจากหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ของพอลิพอร์ลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำบางส่วนลดลง (Mwaikambo *et al.*, 2000) ส่งผลให้



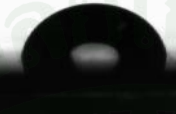

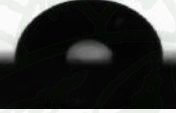

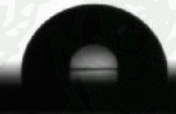

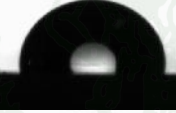

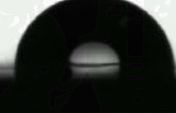



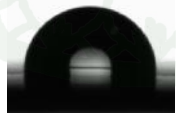

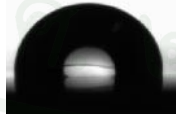

ตารางที่ 9 ลักษณะทางพื้นผิวของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนและกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	น้ำ		น้ำมัน	
	มุมสัมผัส (เซต่า)	ภาพ	มุมสัมผัส (เซต่า)	ภาพ
1	$107.79^c \pm 1.46$		$26.58^a \pm 0.86$	
4	$84.39^a \pm 0.77$		$44.21^b \pm 1.10$	
7	$91.44^b \pm 2.51$		$44.18^b \pm 3.18$	

ในกรด (ตัวอย่างที่ 7) ที่เติมสารประสานพอลิพริลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของกรด (ตัวอย่างที่ 4) ที่ไม่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากการทดสอบลักษณะทางพื้นผิวของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนและกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr ทั้งที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ได้ผลการทดสอบเป็นค่ามุมสัมผัส (เซต่า) ดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่า ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำและหยดน้ำมันมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ แต่พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ทำให้เกิดความแตกต่างของค่ามุมสัมผัสของกรด ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ คือ เวลาที่ใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยเมื่อมีการใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากรังสีไมโครเวฟสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพริลีน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีขั้ว (polar component) บนพื้นผิวพอลิพริลีน โดยเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่แอลคีน (C=C) ที่พื้นผิวส่งผลให้พอลิพริลีนมีค่าพลังงานอิสระพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น (Mirabedini et al., 2004)

ตารางที่ 10 ลักษณะทางพื้นผิวของถาดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	น้ำ		น้ำมัน	
	มุมสัมผัส (เซต่า)	ภาพ	มุมสัมผัส (เซต่า)	ภาพ
1HA	$100.37^e \pm 1.20$		$30.24^a \pm 2.65$	
1HB	$95.99^d \pm 1.26$		$30.66^a \pm 1.16$	
1HC	$96.23^d \pm 0.60$		$30.47^a \pm 2.57$	
4HA	$87.40^a \pm 0.38$		$51.48^b \pm 0.66$	
4HB	$88.30^{ab} \pm 0.55$		$51.00^b \pm 2.21$	
4HC	$90.05^b \pm 1.27$		$50.68^b \pm 0.78$	
7HA	$93.07^{cd} \pm 0.69$		$55.10^c \pm 2.89$	
7HB	$94.20^{cd} \pm 0.69$		$54.27^c \pm 1.13$	
7HC	$94.70^c \pm 2.22$		$54.78^c \pm 0.60$	

หมายเหตุ 1 คือ i-PP

4 คือ i-PP/MC-20 phr

7 คือ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

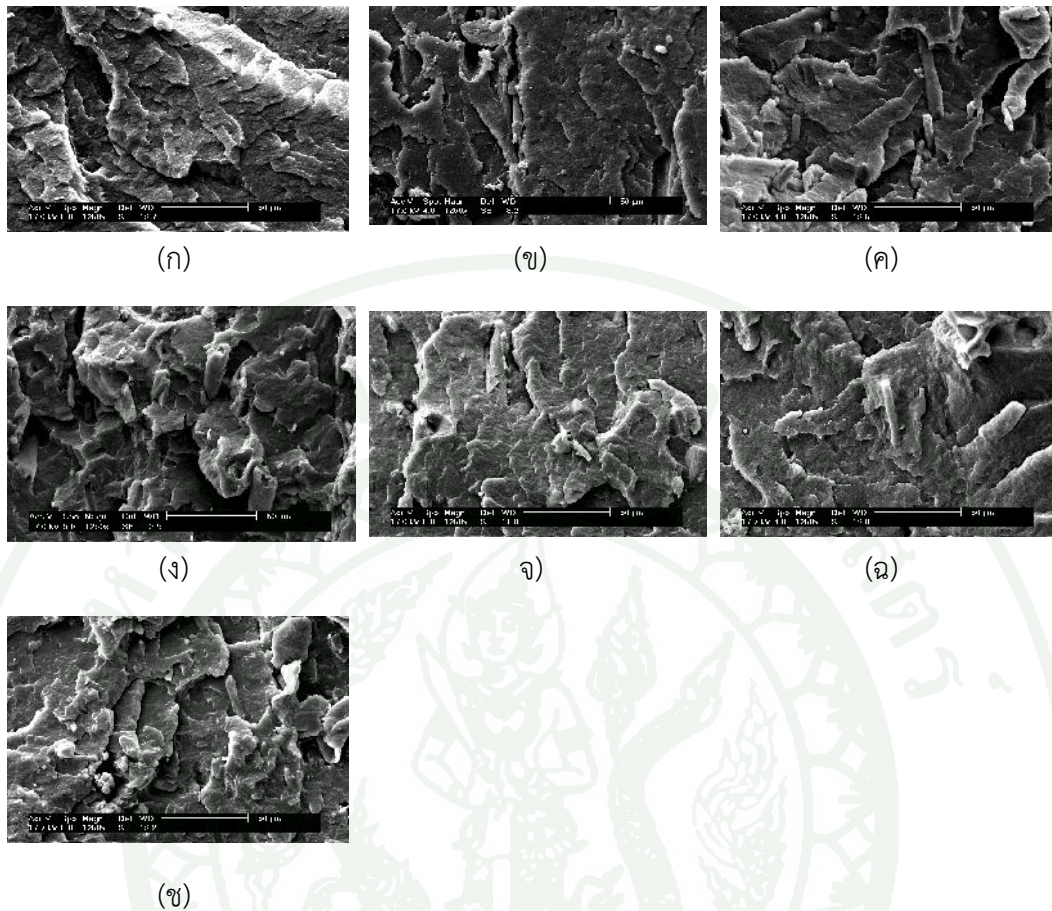
HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที

HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

2.6.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

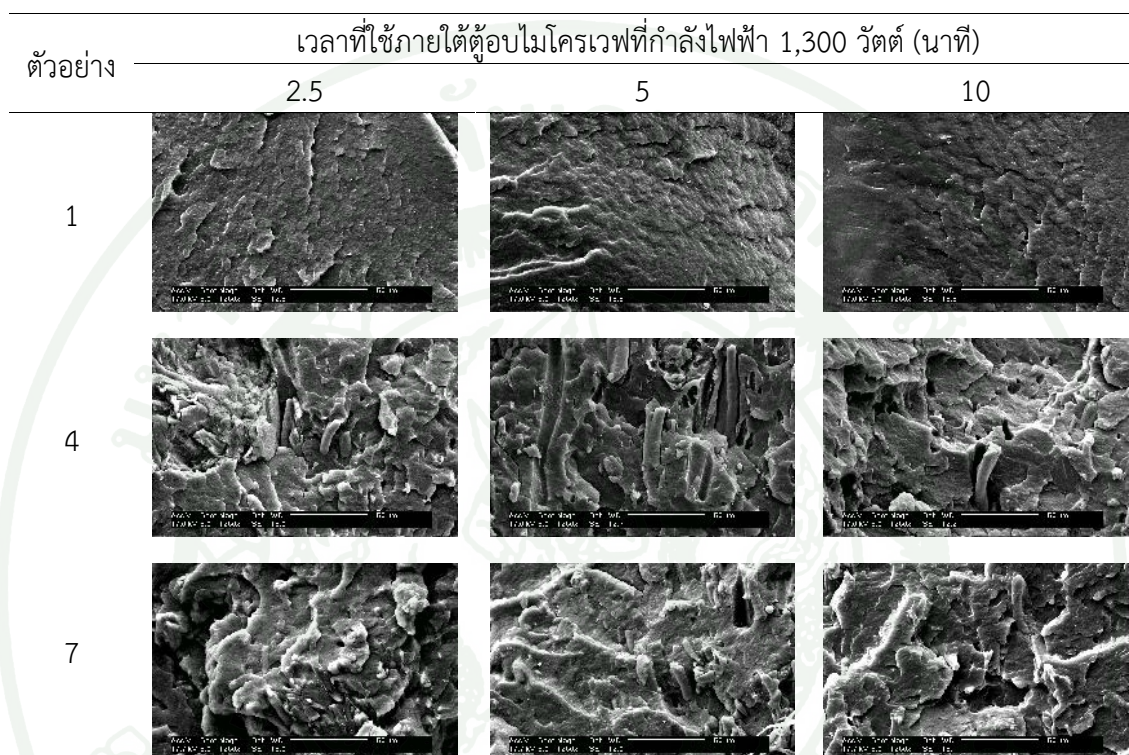
การตรวจสอบสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของวัสดุนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope, SEM) เพื่อศึกษารูปร่างลักษณะและโครงสร้าง (morphology) รวมถึงการตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันโดยศึกษาจากลักษณะการกระจายตัวของสารเติมแต่งหรือสารเสริมแรง (filler dispersion) ในอนุภาคเมทริกซ์ (ปีนสุภา, 2545) ในการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของภาคจะทดสอบภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 17 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 1,250 เท่า การตรวจสอบสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของภาคในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเมทริกซ์จากรอยแตกระหว่างผิวสัมผัส โดยพบว่าสมบัติเชิงกลที่ได้มักมีค่าอยู่ระหว่างสมบัติเชิงกลของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนและไมโครเซลลูโลสซึ่งการแตกหักมักมีจุดเริ่มต้นมาจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนและไมโครเซลลูโลส เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีแรงดึงดูระหว่างกันน้อยที่สุด จากผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 22 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของภาคที่ไม่มีการเติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 22 (ข), (ค) และ (ง)) มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ มีช่องว่างและโพรงเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยไมโครเซลลูโลสและไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเมทริกซ์ (Ashori *et al.*, 2010; Qiu *et al.*, 2006) แสดงให้เห็นถึงความไม่เนื้อเดียวกัน ส่วนภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 22 (จ), (ฉ) และ (ช)) มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบมีช่องว่างและโพรงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการเติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ มีผลต่อการกระจายตัว และการเกิดอันตรกิริยาที่ดีของไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเมทริกซ์ กล่าวคือ ภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (ข) เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างพื้นผิวของไมโครเซลลูโลสและไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเมทริกซ์อันเป็นผลมาจากการเติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ที่ทำหน้าที่ในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของไมโครเซลลูโลสและไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน (Bengtsson *et al.*, 2007; Joly *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2008; Mwaikambo *et al.*, 2000; Spoljaric *et al.*, 2009) โดยหมู่แอนไฮไดรด์ของพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์จะเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลสโดยการสร้างพันธะโควาเลนต์ (Aht-Ong *et al.*, 2011; Mohanty *et al.*, 2006) ส่วนสายโซ่โมเลกุลของพอลิพอพริลีนที่ปลายข้างหนึ่งของพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์จะเกิดอันตรกิริยากับไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน ทำให้ไมโครเซลลูโลสลดการเกาะกลุ่มก้อนและเกิดการกระจายตัวได้ดีในไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเมทริกซ์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของภาคดีขึ้น ซึ่งจากสมบัติเชิงกลที่กล่าวไปข้างต้นให้ผลที่สัมพันธ์กันคือ ภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr และเติมสารประสานพอลิพอพริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และ จากผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีน



ภาพที่ 22 สัณฐานวิทยาของผาดก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1250 เท่า (ก) i-PP, (ข) i-PP/MC-5 phr, (ค) i-PP/MC-10 phr, (ง) i-PP/MC-20 phr, (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (ฉ) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (ช) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของผาดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเทียบกับลักษณะพื้นผิวของผาดก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาที่แตกต่างกันในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ไม่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวของผาด เนื่องจากรังสีไมโครเวฟจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีบนพื้นผิวของผาดซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Mirabedini et al., 2004) และการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้ว (dipolar polarization) ของไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส (Chandrasekaran et al., 2012) อีกทั้งในการตรวจสอบสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของผาดในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเมทริกซ์จากรอยแตกระหว่างผิวสัมผัส ดังนั้นในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟรวมถึงเวลาที่ใช้จึงไม่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวของผาด

ตารางที่ 11 สัณฐานวิทยาของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,250 เท่า (1) i-PP, (4) i-PP/MC-20 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr



2.6.4 การวิเคราะห์ความแข็ง

การทดสอบความแข็ง (hardness) เป็นการวัดความต้านทานต่อแรงที่มากระทำที่ผิวหน้าของวัสดุทดสอบ โดยการนำหัวกด (indenter) ไปกดลงบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบ ค่าความแข็งที่วัดได้คือความลึกของการทะลุลงไปของหัวกดซึ่งมีความสัมพันธ์ผกผันกับการกด หากวัสดุมีความแข็งสูงก็就会有ความลึกของการทะลุต่ำและให้ค่าความแข็งสูง ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบความแข็งของวัสดุด้วยเครื่องทดสอบความแข็งดูโรมิเตอร์ (durometer hardness) โดยใช้หัวกดชนิด D (shore D durometer) เนื่องจากเป็นชนิดของหัวกดที่เหมาะสมในการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งสูง และมีน้ำหนักหัวกด 5 กิโลกรัม จากการทดสอบค่าความแข็งของภาคก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อเติมไมโครเซลลูโลสในไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีนค่าความแข็งที่ได้มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับภาคไอโซแทคติก

ตารางที่ 12 ค่าความแข็งของภาคก่อนการใช้งานภายใต้ดู่อบไมโครเวฟ (1) i-PP, (2) i-PP/MC-5 phr, (3) i-PP/MC-10 phr, (4) i-PP/MC-20 phr, (5) i-PP/MA-g-PP/MC-5 phr, (6) i-PP/MA-g-PP/MC-10 phr และ (7) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (Shore D)
1	69.00 ^a ±1.00
2	70.33 ^{ab} ±0.58
3	71.00 ^b ±1.00
4	71.33 ^b ±1.15
5	71.67 ^b ±0.58
6	70.33 ^{ab} ±0.58
7	70.33 ^{ab} ±0.58

พอลิพอฟริลีน (ตัวอย่างที่ 1) เนื่องจากปริมาณของไมโครเซลลูโลสที่เติมในไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนมีปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถทำให้ค่าความแข็งของภาคสูงขึ้นได้ ทั้งนี้ได้มีการทบทวนงานวิจัยที่มีการเติมผงไม้ซึ่งมีปริมาณเซลลูโลสสูงในพอลิพอฟริลีนซึ่งใกล้เคียงกับการเติมไมโครเซลลูโลสในพอลิพอฟริลีน โดยมีการเติมผงไม้ในพอลิพอฟริลีนปริมาณร้อยละ 15, 25 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 75.60, 75.80 และ 77.40 ตามลำดับ พบว่ามีค่าความแข็งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิพอฟริลีนที่ไม่เติมผงไม้ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 71.00 สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากการเติมผงไม้ส่งผลให้ค่าความแข็งตึง (toughness) ของพอลิพอฟริลีนสูงขึ้น (Caraschi และ Leão, 2002) ดังนั้นค่าความแข็งของพอลิพอฟริลีนจึงสูงขึ้นด้วย

จากผลการทดสอบค่าความแข็งของภาคหลังการใช้งานภายใต้ดู่อบไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 1300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ดังแสดงในตารางที่ 13 พบว่าค่าความแข็งของภาคไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน (ตัวอย่างที่ 1) และภาคไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ตัวอย่างที่ 7) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ดู่อบไมโครเวฟนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความแข็งของภาค (ตัวอย่างที่ 7) ที่เวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ในการใช้งานภายใต้ดู่อบไมโครเวฟพบว่า มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) อาจเกิดขึ้นจากการเติมไมโครเซลลูโลสซึ่งมีผลทำให้ความแข็งตึงของไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเพิ่มสูงขึ้นได้มากกว่าเมื่อเทียบกับภาคไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน (ตัวอย่างที่ 1) อีกทั้งเมื่อมีการใช้เวลานานขึ้นจะทำให้รังสีไมโครเวฟมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีบนพื้นผิวของภาคจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Mirabedini et al., 2004) และการจัดเรียงทิศทางสภาพขั้วของไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน (Chandrasekaran et al., 2012) ได้มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของภาคเกิดความแข็งมากขึ้น

ตารางที่ 13 ค่าความแข็งของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (Shore D)
1HA	69.00 ^a ±1.00
1HB	69.33 ^a ±0.58
1HC	69.67 ^{ab} ±0.58
7HA	69.33 ^a ±0.58
7HB	71.00 ^b ±1.00
7HC	72.67 ^c ±1.15

หมายเหตุ 1 คือ i-PP

7 คือ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

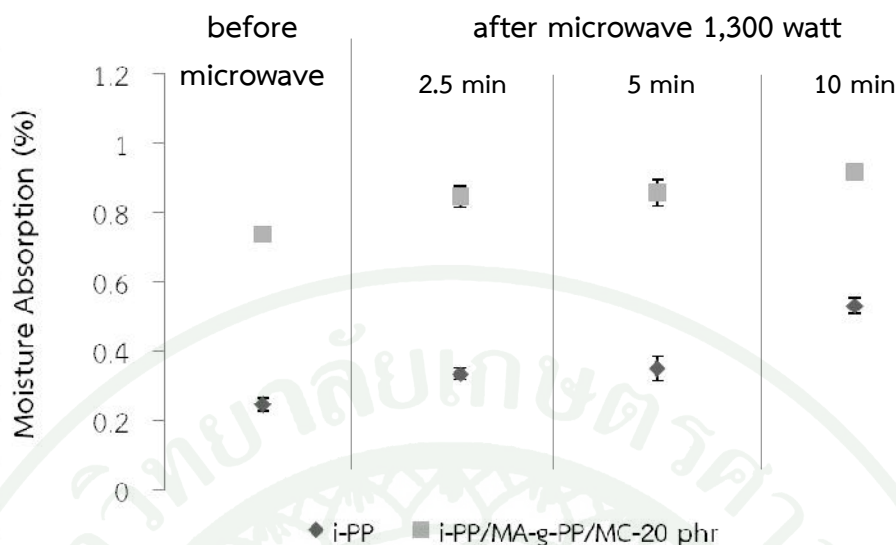
HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที

HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

2.6.5 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้น

การทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น (moisture absorption) ของภาคทดสอบโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนักของภาคทั้งก่อนและหลังภายใต้สภาวะควบคุมความชื้นร้อยละ 100 เพื่อคำนวณปริมาณความชื้นที่ภาคได้ดูดซับเอาไว้ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงเป็นค่าร้อยละความชื้น จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นของภาคก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่าค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของภาคไอโซแทคติกพอลิพพรอสีน (i-PP) และภาคไอโซแทคติกพอลิพพรอสีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพพรอสีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผ่านการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เวลามากขึ้นในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟจะส่งผลให้ค่าร้อยละความชื้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากเมื่อใช้เวลามากขึ้นจะทำให้รังสีไมโครเวฟซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพพรอสีนมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากขึ้น ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีขั้ว (polar component) บนพื้นผิวพอลิพพรอสีน โดยเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่แอลคีน (C=C) ที่พื้นผิวของพอลิพพรอสีน ส่งผลให้พอลิพพรอสีนมีค่าพลังงานอิสระพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น (Mirabedini et al., 2004) ส่งผลให้ภาคพอลิพพรอสีนที่ผ่านการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟเป็นเวลานานขึ้นจะยังมีค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้สูงขึ้น เนื่องจากสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวได้มากกว่าซึ่งทำให้มีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นภาคทดสอบจึงสามารถดูดซับความชื้นได้สูงขึ้น ส่วนผลจากการเพิ่มสูงขึ้นของค่าร้อยละความชื้นที่ภาคดูดซับเอาไว้

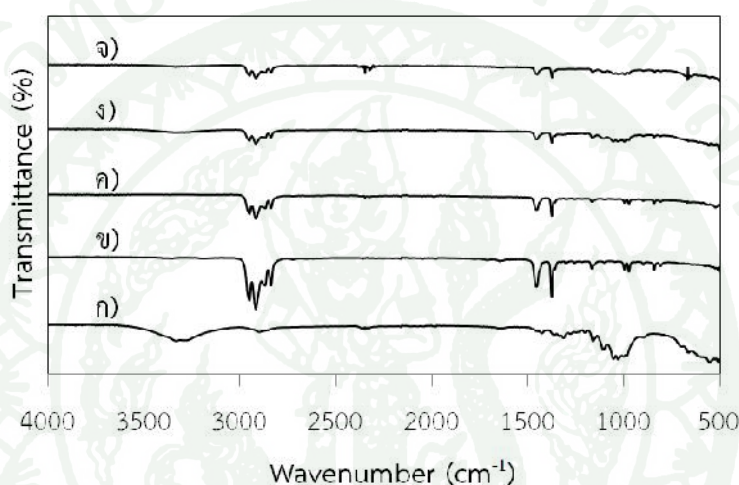


ภาพที่ 23 ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับของถาด ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที

ในถาดที่เติมไมโครเซลลูโลส (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) พบว่าค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.73 และหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.81, 0.82 และ 0.90 ที่ระยะเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าร้อยละความชื้นของถาดไอโซแทกติกพอลิพริลีน (i-PP) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.25 และหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.33, 0.35 และ 0.53 ที่ ระยะเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็น ได้ว่าการเติมไมโครเซลลูโลสสามารถทำให้ถาดไอโซแทกติกพอลิพริลีนดูดซับความชื้นได้สูงขึ้น เนื่องจากมีผลทำให้ไอโซแทกติกพอลิพริลีนที่มีความไม่ชอบน้ำให้มีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นได้ เพราะโดยธรรมชาติของเซลลูโลสซึ่งมีความชอบน้ำสูงเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของ เซลลูโลสที่มีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำโดยการสร้างพันธะ ไฮโดรเจนกับน้ำได้ (Franco และ González, 2005) ซึ่งในการทดสอบนี้โมเลกุลของน้ำจะอยู่ในรูป ของความชื้น ถึงแม้ว่าการเติมไมโครเซลลูโลสจะส่งผลให้ถาดมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ สูงขึ้น แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบค่าร้อยละความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นของถาดเมื่อมีการเติมและไมโคร เซลลูโลสและถาดไอโซแทกติกพอลิพริลีนจะพบว่ามีค่าร้อยละความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง 1 ซึ่งเป็นความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นในการดูดซับความชื้นที่สูงขึ้นของถาด ไอโซแทกติกพอลิพริลีนเมื่อมีการเติมไมโครเซลลูโลสจึงไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเนื่องจากการ ระบายของความชื้นได้

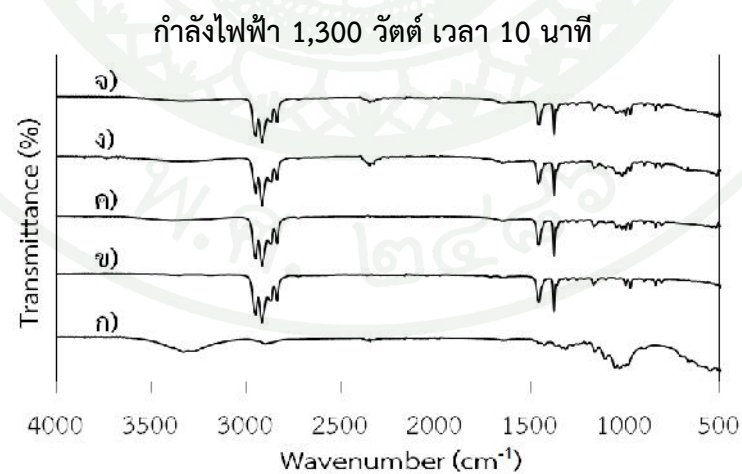
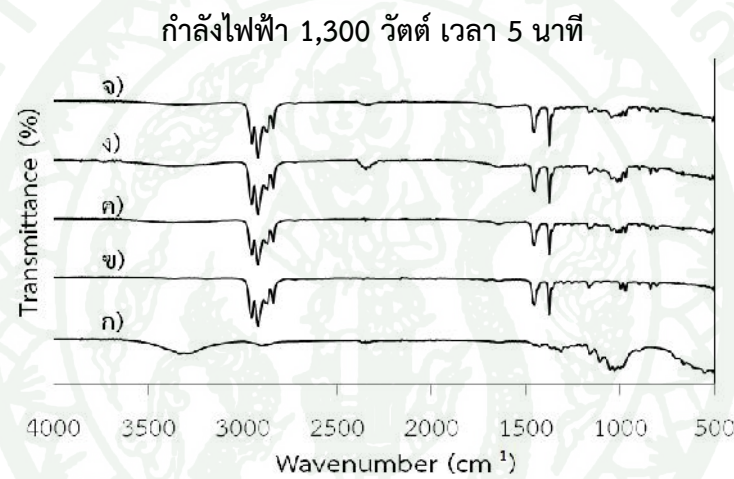
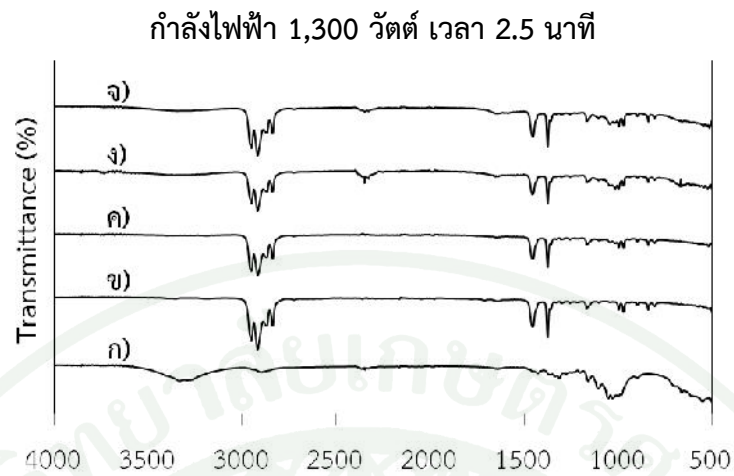
2.7 สมบัติเชิงเคมีของกรดไอโซแทคติกพอลิพพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

จากการตรวจสอบสมบัติเชิงเคมีของกรดไอโซแทคติกพอลิพพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ ด้วยเทคนิคฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm^{-1} แสดงดังภาพที่ 24 และภาพที่ 25 พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1591-1800 cm^{-1} และ 1490-1590 cm^{-1} ซึ่งสามารถ



ภาพที่ 24 ฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) pure i-PP, (ง) i-PP/MC-20 phr และ (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพพริลีนภายหลังจากการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟได้ (Mirabedini *et al.*, 2004) และไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นนี้กับกรดที่ไม่ได้ผ่านการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ (ภาพที่ 24) และภายหลังจากการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ (ภาพที่ 25) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1591-1800 cm^{-1} เกิดจากการยืดหดของหมู่ C=O (C=O stretching) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1490-1590 cm^{-1} เกิดจากการยืดหดแบบสั้นของหมู่ C=C (C=C stretching vibration) ซึ่งแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้อาจเกิดขึ้นจากการที่หมู่คาร์บอนิล (carbonyl) และหมู่แอลคีน (alkene) เกิดอันตรกิริยากับหมู่อีเทอร์ (ether, R-O-R) (Mirabedini *et al.*, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่าหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2300-2400 cm^{-1} มีความเข้มพีคสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรดก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ โดยพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นนี้แสดงถึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Kalisz *et al.*, 2008) ซึ่งสามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนยิ่งขึ้นหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ



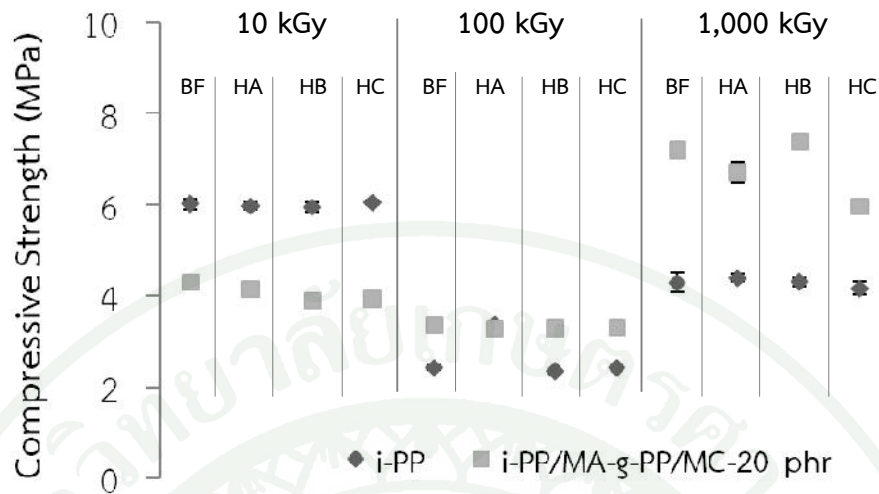
ภาพที่ 25 พูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) pure i-PP, (ง) i-PP/MC-20 phr และ (จ) i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

โดยเฉพาะในภาคที่มีการเติมไมโครเซลลูโลส 20 phr และไม่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 25 (ง)) จะมีความเข้มฟีดสูงกว่าภาคที่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ภาพที่ 25 (จ)) ทำให้ทราบว่า การเติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีผลทำให้โอกาสในการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในโครงสร้างเคมีของภาคต่ำลง ส่งผลให้ภาคที่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีเสถียรภาพเชิงเคมีที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับภาคที่ไม่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

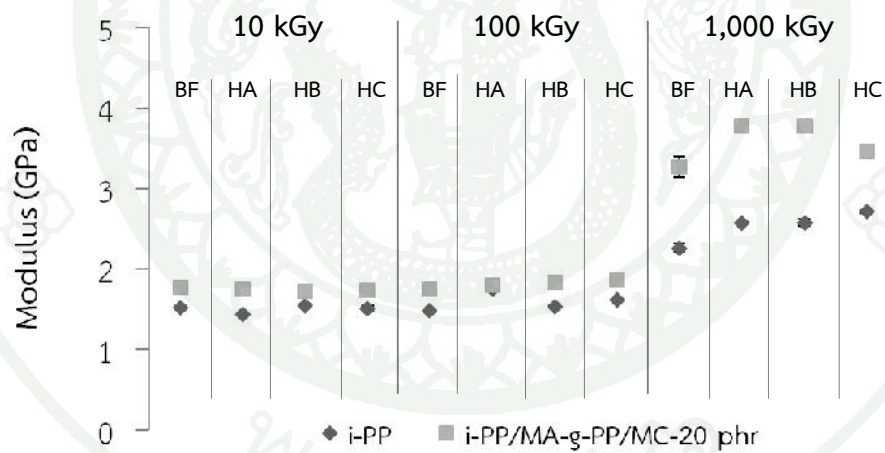
3. การสลายตัวจากรังสีแกมมาของภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

3.1 สมบัติเชิงกลของภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสและภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลทดสอบดึงแมชชีนตามมาตรฐาน ASTM D695 ได้ผลการทดสอบเป็นค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัส โดยค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสของภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส (i-PP) และภาคไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิฟอสฟอริส กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา ดังแสดงในภาพที่ 26 และภาพที่ 27 ตามลำดับ พบว่า เวลาที่ใช้หลังผ่านการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกดของภาค i-PP และภาค i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และแกมมา 1,000 kGy โดยให้ผลการทดสอบที่ตรงข้ามกับการนำมาอธิบายสมบัติเชิงกลที่ดีได้ (Cota *et al.*, 2007) เพราะการฉายรังสีแกมมาจะทำให้ค่าความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) และการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลและการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส รวมถึงการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนในไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริส และความสามารถในการแทนที่ของออกซิเจนในขณะฉายรังสีแกมมา ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ใช้ โดยถ้ามีการใช้ปริมาณรังสีแกมมาสูงก็จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมากยิ่งขึ้น (Abiona และ Osinkolu, 2010; Cota *et al.*, 2007) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับผลการทดสอบครั้งนี้ โดยพบว่า ระดับการสลายตัวของภาคทดสอบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุดหลังการฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 1,000 kGy แต่พบว่า มีการลดลงของค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสภายหลังการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 100 kGy อาจเนื่องจากการเกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) และการเชื่อมขวาง (cross-linking) ของสายโซ่โมเลกุลไอโซแทคติกพอลิฟอสฟอริสที่มีไม่มากพอ รวมถึงระดับการสลายตัวของภาคทดสอบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณรังสีแกมมาที่ใช้ ซึ่งที่ปริมาณ 100 kGy อาจไม่สูงพอที่จะทำ



ภาพที่ 26 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของภาค i-PP และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ และผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 10 kGy, 100 kGy และ 1,000 kGy



ภาพที่ 27 เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของภาค i-PP และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ และผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 10 kGy, 100 kGy และ 1,000 kGy

หมายเหตุ BF ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที

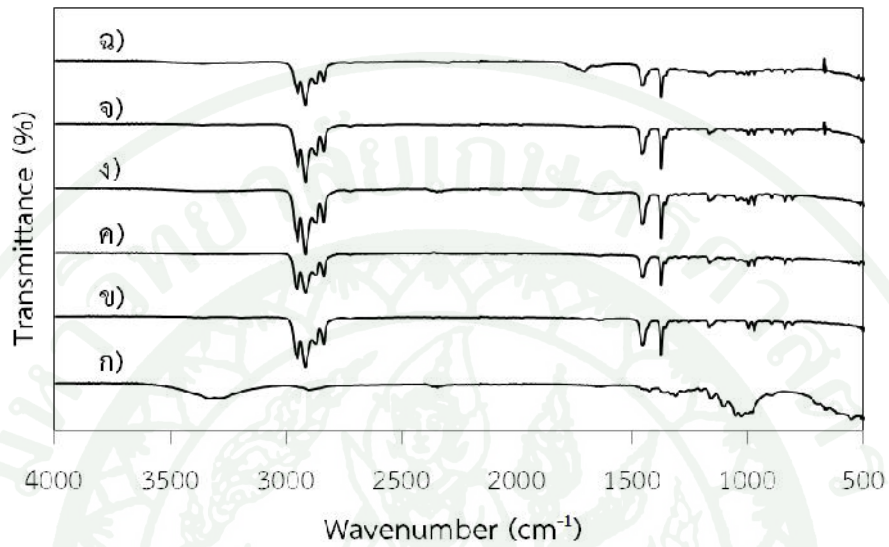
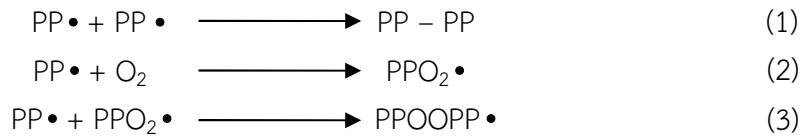
HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

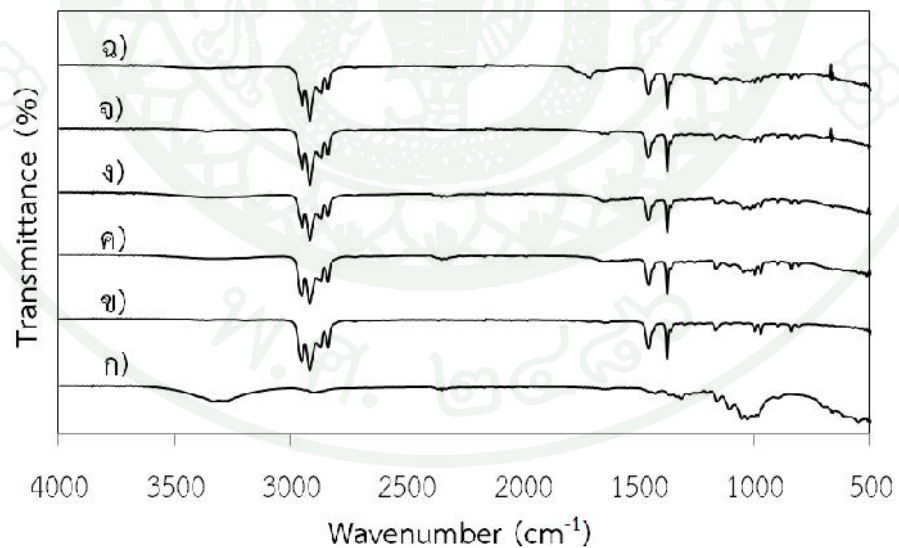
ให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงเชิงกล และการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นได้ ดังนั้น ที่ปริมาณการฉายรังสีแกมมา 1,000 kGy จะมีระดับการสลายตัวของกรดทดสอบสูงสุด โดยเฉพาะในกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ภายหลังจากการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 1,000 kGy จะเห็นว่าค่าต้านทานแรงกดอัดและค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นสูงสุดและมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับกรด i-PP แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมไมโครเซลลูโลสมีผลต่อการสลายตัวจากรังสีแกมมา โดยในโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) มีออกซิเจนอะตอมสูงเมื่อเทียบกับโครงสร้างโมเลกุลของไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน จึงทำให้มีโอกาสในการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น เนื่องจากสามารถเกิดการแทนที่ของออกซิเจนจากอากาศในขณะฉายรังสีแกมมามากขึ้น และพบว่าการเติมไมโครเซลลูโลสนั้นไม่ได้รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนแต่สามารถสร้างอันตรกิริยาระหว่างไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนได้โดยการเติมสารประสานพอลิพอฟริลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ เพราะสารทั้งสองมีสภาพขั้วตรงข้ามกัน กล่าวคือ ไมโครเซลลูโลสจะมีสภาพขั้วสูงหรือมีความชอบน้ำสูง ส่วนไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนจะมีสภาพขั้วต่ำหรือมีความไม่ชอบน้ำสูง ดังนั้นเมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาจะส่งผลให้โอกาสในการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลและการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนนั้นมีมากกว่าเมื่อเทียบกับกรด i-PP

3.2 สมบัติเชิงเคมีของกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

จากการตรวจสอบสมบัติเชิงเคมีของกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน (i-PP) และกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm^{-1} แสดงดังภาพที่ 28 และภาพที่ 29 ตามลำดับ พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1700 cm^{-1} และ 2270 cm^{-1} โดยเกิดจากการคาบเกี่ยว (overlap) ของหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1750 cm^{-1} และหมู่แอลคีน ($C=C$) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1990 cm^{-1} ซึ่งสามารถยืนยันการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการขาดออกและการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิพอฟริลีน และพบแนวโน้มของความเข้มพีคเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีแกมมา โดยให้ผลสอดคล้องกันกับ (Abiona และ Osinkolu, 2010) และผลของการฉายรังสีแกมมาซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันยังสามารถยืนยันถึงการเกิดอนุมูลแอลคิล (alkyl radicals, $PP \bullet$) บนพื้นผิวของไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน ซึ่งเกิดจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอม โดยโมเลกุล $PP \bullet$ จะสร้างการเชื่อมขวางระหว่างกัน ดังแสดงตามสมการที่ (1) และในระหว่างการฉายรังสีแกมมา $PP \bullet$ จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนได้เป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ (peroxy radicals, $PPO_2 \bullet$) ดังแสดงตามสมการที่ (2) ซึ่งอนุมูลเปอร์ออกไซด์นี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือผสมผสานตัว (combine) กับหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิลได้ (น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์) อีกทั้งยังสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ $PP \bullet$ ดังแสดงตามสมการที่ (3) (Cota *et al.*, 2007)



ภาพที่ 28 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) 1HA, (ง) G1HA, (จ) GG1HA และ (ฉ) GGG1HA



ภาพที่ 29 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคตรัมของ (ก) MC, (ข) MA-g-PP, (ค) 7HA, (ง) G7HA, (จ) GG7HA และ (ฉ) GGG7HA

หมายเหตุ 1 คือ i-PP
7 คือ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 G ภายหลังการฉายรังสีแกมมา 10 kGy
 GG ภายหลังการฉายรังสีแกมมา 100 kGy
 GGG ภายหลังการฉายรังสีแกมมา 1,000 kGy

จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีน (i-PP) และกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) พบว่า ความเข้มข้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1700 cm^{-1} และ 2270 cm^{-1} ของกรด (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) มีความเข้มข้นสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการเติมไมโครเซลลูโลสจะทำให้ปริมาณออกซิเจนอะตอมของกรดเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากการเพิ่มโอกาสในการเข้าไปแทนที่ของออกซิเจนในขณะที่ทำการฉายรังสีแกมมา ดังนั้น ในกรดที่เติมไมโครเซลลูโลสจะมีอัตราในการสลายตัวจากการฉายรังสีแกมมาสูงขึ้น โดยให้ผลสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้นจากการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการเติมไมโครเซลลูโลส แสดงให้เห็นถึงผลของการเติมไมโครเซลลูโลสที่มีต่อการเพิ่มโอกาสในการสลายตัวจากรังสีแกมมา

3.3 สมบัติเชิงกายภาพของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

3.3.1 การวิเคราะห์ผลึก

จากการวิเคราะห์ผลึกของกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีน (i-PP, ตัวอย่างที่ 1) และกรดไอโซแทคติกพอลิพรีลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่มีเติมสารประสานพอลิพรีลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยค่าร้อยละความเป็นผลึกของกรดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา ดังแสดงในตารางที่ 14 พบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึกของกรด มีแนวโน้มลดลงต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการฉายรังสี โดยที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy จะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกต่ำสุด และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งกรด i-PP และกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr เนื่องจากในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีสูงจะมีอัตราในการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการสร้างโครงผลึกของกรดลดต่ำลง เนื่องจากการขาดออกและการเชื่อมขวางของสายโซ่ไอโซแทคติกพอลิพรีลีน (Abiona และ Osinkolu, 2010; Cota *et al.*, 2007) ซึ่งสามารถยืนยันการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้จากสเปกตรัมของผลการทดสอบสมบัติเชิงเคมี และในกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr พบว่า มีค่าร้อยละความเป็นผลึกของต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละความเป็นผลึกของกรด i-PP เนื่องจาก ในการเติมไมโครเซลลูโลสมีผลทำให้กรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีปริมาณออกซิเจนอะตอมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มโอกาสในการเข้าไปแทนที่ของออกซิเจนในขณะที่ทำการฉายรังสีแกมมา ดังนั้น ในกรดที่เติมไมโครเซลลูโลสจะมีอัตราในการสลายตัวจากการฉายรังสีแกมมาสูงขึ้น เนื่องจาก

ตารางที่ 14 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของกรด i-PP และ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละความเป็นผลึก (% crystallinity)				
	ไม่ผ่านไมโครเวฟ	ไม่ฉายรังสี	10 kGy	100 kGy	1,000 kGy
1	51.38	-	-	-	-
1HA	-	58.76	53.22	51.38	51.97
1HB	-	57.65	57.20	51.34	49.59
1HC	-	61.37	57.99	57.79	54.88
7	50.94	-	-	-	-
7HA	-	54.04	54.04	50.71	48.19
7HB	-	54.27	53.04	53.27	48.01
7HC	-	61.73	58.29	53.55	49.41

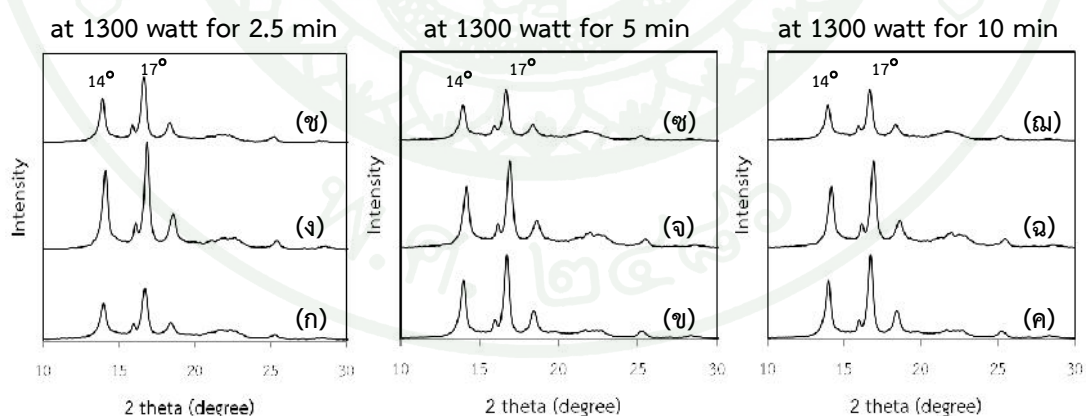
หมายเหตุ 1 คือ i-PP

7 คือ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที

HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที



ภาพที่ 30 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกรดไอโซแทกติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพริลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา 10 kGy ((ก), (ข) และ (ค)), 100 kGy ((ง), (จ) และ (ฉ)) และ 1,000 kGy ((ช), (ซ) และ (ฅ))

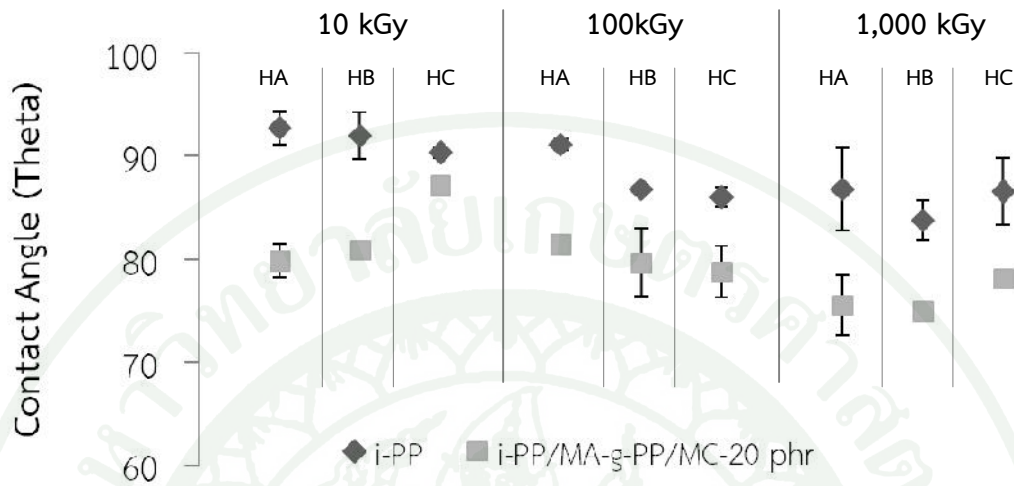
การสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สูงขึ้นอาจไปขัดขวางการสร้างโครงผลึกของกรด ส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกของกรดลดลง

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปของกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที และผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 10 kGy, 100 kGy และ 1,000 kGy ดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณรังสี 1,000 kGy ความเข้มพีกที่มุม 2 เซต่า ตำแหน่ง 14° และ 17° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงวัฏภาคแอลฟา (α -phase) ของไอโซแทกติกพอลิพพริน มีความสูงของพีกต่ำสุด แสดงให้เห็นได้ว่าการฉายรังสีแกมมาโดยใช้ปริมาณรังสีที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าร้อยละของความเป็นผลึกชนิดแอลฟาตกลงอย่างชัดเจนซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าร้อยละของความเป็นผลึกที่แสดงในตารางที่ 14

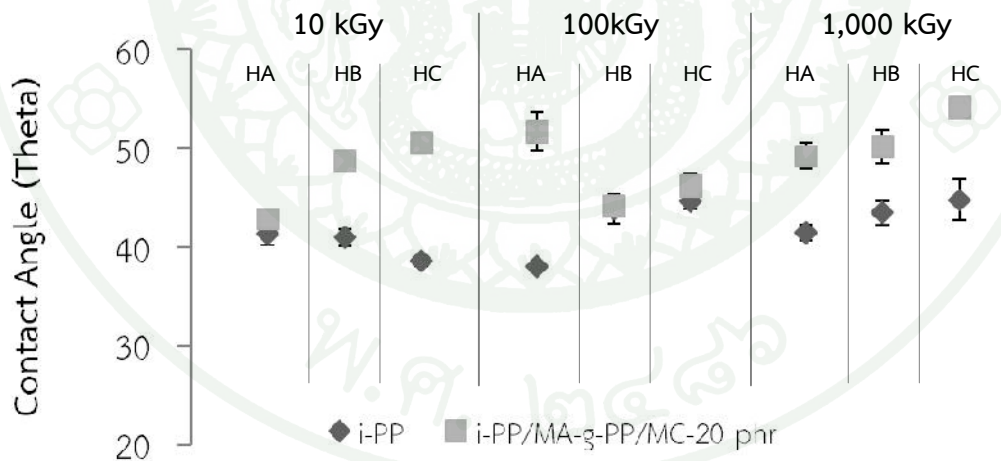
3.3.2 ลักษณะทางพื้นผิวของกรด

จากการทดสอบลักษณะทางพื้นผิวของกรดไอโซแทกติกพอลิพพริน (i-PP) และกรดไอโซแทกติกพอลิพพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสในปริมาณ 20 phr (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ ด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส โดยใช้ของเหลวในการทดสอบคือ น้ำ และน้ำมัน ได้ผลการทดสอบเป็นค่ามุมสัมผัส(เซต่า) ระหว่างของเหลวที่ใช้ทดสอบกับพื้นผิวของกรดทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 31 และ 32 ตามลำดับ จากภาพที่ 31 พบว่า ที่ปริมาณการฉายรังสี 100 และ 1,000 kGy กรด i-PP และกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีแนวโน้มของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำลง เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาจะทำให้พื้นผิวของกรดมีปริมาณออกซิเจนที่เกิดจากการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น ยืนยันได้จากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1700 cm^{-1} และ 2270 cm^{-1} โดยเกิดจากการคาบเกี่ยว (overlap) ของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1750 cm^{-1} และหมู่แอลคีน (C=C) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1990 cm^{-1} ทำให้เกิดการเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนได้เป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอนุมูลเปอร์ออกไซด์นี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิลได้ (น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์) ดังนั้นที่ปริมาณรังสีสูงขึ้นคือ 100 และ 1,000 kGy มีผลทำให้หยดน้ำมีโอกาสในการทำปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของกรดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำลง เนื่องจากหยดน้ำสามารถปกคลุมพื้นผิวของกรดได้มากขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าการฉายรังสีแกมมาสามารถให้เกิดจุดเริ่มต้นของการสลายตัวจากการเพิ่มเพิ่มโอกาสในการเข้าทำอันตรกิริยาของความชื้นหรือน้ำได้บนพื้นผิวของไอโซแทกติกพอลิพพริน นอกเหนือจากการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกทั้งยังพบว่า ในกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ที่เติมไมโครเซลลูโลสมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรด i-PP แสดงให้เห็นถึงความชอบน้ำของกรดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมไมโครเซลลูโลส เนื่องจากไมโครเซลลูโลสมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขี้สูง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของหยดน้ำ โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ดังนั้น ในกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr จะพบการสลายตัวภายหลังการ

ฉายรังสีแกมมาสูงกว่าเมื่อเทียบกับสภาพ i-PP ที่ไม่เติมไมโครเซลลูโลส เนื่องจากการสลายตัวจากการเข้าทำอันตรกิริยาของน้ำและความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 31 ค่ามุมสัมผัส (เซต่า) ของหยดน้ำที่ปกคลุมบนพื้นผิวของสภาพหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา



ภาพที่ 32 ค่ามุมสัมผัส (เซต่า) ของหยดน้ำมันที่ปกคลุมบนพื้นผิวของสภาพหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

หมายเหตุ HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

จากภาพที่ 32 พบว่า ที่ปริมาณการฉายรังสี 100 และ 1,000 kGy ค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำมันของกรด i-PP และกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาจะทำให้พื้นผิวของกรดมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขี้สูงขึ้น โดยมีลักษณะตรงข้ามกับหยดน้ำมันซึ่งมีความชอบน้ำต่ำหรือมีสภาพขี้ต่ำ ส่งผลให้หยดน้ำมันมีความสามารถในการปกคลุมพื้นผิวต่ำลง ทำให้ค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำมันของกรดสูงขึ้น โดยเฉพาะในกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ซึ่งมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขี้สูงขึ้นจากการเติมไมโครเซลลูโลสจะห้ค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำมันสูงกว่าในกรด i-PP เปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพคือ มีความเปราะ (embrittlement) และความแข็ง (stiffening)

3.3.3 การวิเคราะห์ความแข็ง

จากการทดสอบค่าความแข็งของกรดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ และผ่านการฉายรังสีแกมมา ดังแสดงในตารางที่ 15 พบว่า ค่าความแข็งของกรดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้ปริมาณรังสีแกมมาสูงขึ้น โดยที่การฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 1,000 kGy ให้ค่าความแข็งของกรดสูงสุด เนื่องจากมีโอกาสดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้นในขณะฉายรังสีแกมมา ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้น ส่งผลให้กรดมีการเปลี่ยน

ตารางที่ 15 ค่าความแข็งของกรดหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (shore D)			
	ปริมาณรังสีแกมมา (kGy)			
	ไม่ผ่านรังสี	10	100	1,000
1HA	69.00 ^a ±1.00	70.00 ^a ±0.00	73.33 ^c ±1.53	75.67 ^{efgh} ±0.58
1HB	69.33 ^a ±0.58	73.33 ^c ±0.58	74.67 ^{cdef} ±0.00	74.67 ^{cdef} ±0.58
1HC	69.67 ^{ab} ±0.58	72.00 ^b ±1.00	74.33 ^{cde} ±1.15	74.33 ^{cde} ±0.58
7HA	69.33 ^a ±0.58	74.00 ^{cd} ±0.00	74.00 ^{cd} ±1.00	76.67 ^h ±0.58
7HB	71.00 ^b ±1.00	74.67 ^{cdef} ±0.58	75.00 ^{defg} ±0.00	77.00 ^h ±0.00
7HC	72.67 ^c ±1.15	75.00 ^{defg} ±1.00	76.00 ^{fgh} ±1.00	76.33 ^{gh} ±0.58

หมายเหตุ 1 คือ i-PP

7 คือ i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr

HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์เป็นเวลา 2.5 นาที

HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

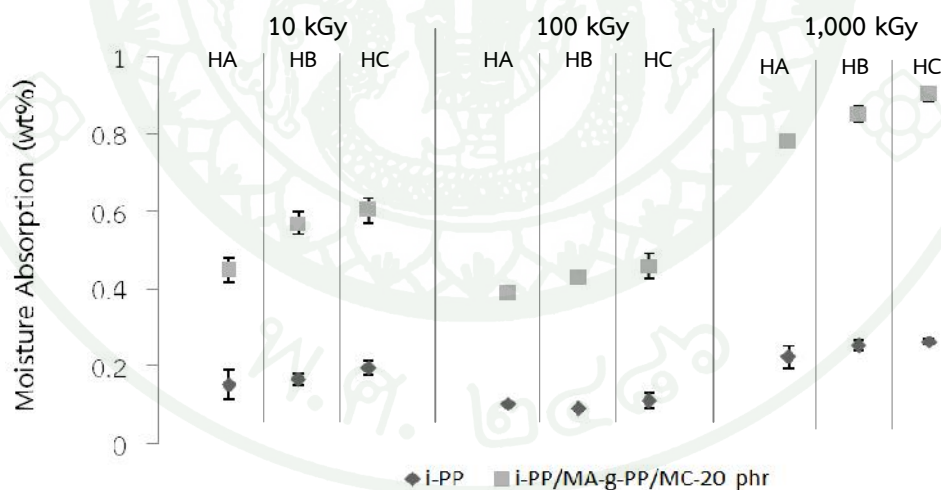
ตัวอักษร ^{a-h} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

($p < 0.05$)

แปลงเชิงกายภาพคือ มีความเปราะ (embrittlement) และความแข็ง (stiffening) (Abiona และ Osinkolu, 2010) เพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาจะส่งผลให้ค่าความแข็งของภาคเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ปริมาณรังสีสูงขึ้นจะยิ่งให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าภาคที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาจะมีโอกาสในการสลายตัวจากความเปราะและความแข็งของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มโอกาสในการเกิดการแตกหักของภาคจนมีลักษณะเป็นชิ้นที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสในการเข้าทำอันตรกิริยาของน้ำ รวมถึงสารเคมีและจุลินทรีย์ต่างๆเพิ่มขึ้นได้ โดยเฉพาะในภาค i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ที่มีค่าความแข็งเปราะสูงกว่าเมื่อเทียบกับภาค i-PP จะมีโอกาสในการเกิดการแตกหักของภาคสูงขึ้น ดังนั้น เมื่อมีการเติมไมโครเซลลูโลสจะส่งผลให้ภาคมีโอกาสในการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้น

3.3.4 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้น

จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นของภาค หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ และผ่านการฉายรังสีแกมมา ดังแสดงในภาพที่ 33 พบว่า ภายหลังจากการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของภาคไอโซเทคติกพอลิพริสตีนิเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพริสตีนิกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละ



ภาพที่ 33 ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของภาคหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและการฉายรังสีแกมมา

หมายเหตุ HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

ความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของกรดไอโซแทคติกพอลิพอฟริลีน (i-PP) เนื่องจากการเติมไมโครเซลลูโลส ซึ่งมีความชอบน้ำสูงหรือมีสภาพขี้สูง ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำหรือความชื้น โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้กรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของสูงกว่า i-PP ดังนั้น การเติมไมโครเซลลูโลสจึงสามารถเกิดการสลายตัวจากรังสีแกมมาได้มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาของน้ำ ความชื้น รวมถึงสารเคมีต่างๆได้ และพบว่า เมื่อใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟมากขึ้น ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถอธิบายได้จากผลของเวลาที่ใช้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ พบว่า เวลาที่ใช้มากขึ้นจะส่งผลให้กรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำลง เนื่องจากรังสีไมโครเวฟสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของพอลิพอฟริลีน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีขี้บนพื้นผิวพอลิพอฟริลีน โดยเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่แอลคีน (C=C) ที่พื้นผิว ทำให้พอลิพอฟริลีนมีค่าพลังงานอิสระพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น เมื่อใช้เวลาในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟมากขึ้นจะส่งผลให้น้ำหรือความชื้นสามารถเกิดอันตรกิริยาบนพื้นผิวของกรดได้มากขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การเตรียมไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย โดยการสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร พบว่า เซลลูโลสความยาวของเส้นใยสั้นลง ทำให้ไมโครเซลลูโลสที่เตรียม ได้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีหรืออันตรกิริยาไอโซแทคติกพอลิพอพรินสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความเป็นอนุภาคเคลื่อนที่อิสระจากการลดลงของลักษณะความเป็นเส้นใยยาวของเซลลูโลส จึงส่งผลดีต่อกระบวนการผสมเม็ดเรซินของคอมพอลิเมอร์รวมถึงกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากการกระจายตัวของไมโครเซลลูโลสภายในไอโซแทคติกพอลิพอพรินที่ดีขึ้น และพบว่า เมื่อเติมสารประสานพอลิพอพรินกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ไมโครเซลลูโลสกระจายตัวในไอโซแทคติกพอลิพอพรินดีขึ้น เนื่องจากหมู่มาเลอิคแอนไฮไดรด์ของพอลิพอพรินกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของไมโครเซลลูโลส จึงส่งผลดีต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของภาคได้ ดังนั้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร มีความเหมาะสมในการสกัดไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย โดยให้ผงไมโครเซลลูโลสที่มีขนาดเหมาะสมในการผลิตคอมพอลิพอพรินของไอโซแทคติกพอลิพอพริน และการเติมพอลิพอพรินกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการสร้างอันตรกิริยาระหว่างไอโซแทคติกพอลิพอพรินและไมโครเซลลูโลส

2. จากการทดสอบสมบัติของภาคไอโซแทคติกพอลิพอพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมสารประสานพอลิพอพรินกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ ทั้งก่อนและหลังการใช้งาน ภายใต้ดื่อบไมโครเวฟ พบว่า ก่อนการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟ ภาคไอโซแทคติกพอลิพอพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr ที่เติมสารประสานพอลิพอพรินกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์ (i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr) มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยมีค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสเท่ากับ 5.99 และ 377.37 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และหลังการใช้งานภายใต้ดื่อบไมโครเวฟ พบว่า ภาค i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr ที่สภาวะการใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยมีค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสเท่ากับ 5.86 เมกะปาสคาล และ 1.72 จิกะปาสคาล นอกจากนี้ พบว่า ที่การใช้กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เวลาที่ใช้ต่างกันจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสของภาค โดยให้ค่าการทดสอบแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์ และ 650 วัตต์ เวลาที่ใช้ต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดุลัสของภาค โดยให้ค่าการทดสอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) จากการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน พบว่า ภาคที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสทั้งที่เติมและไม่เติม MA-g-PP มีแนวโน้มของอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการเกิดผลึก และร้อยละความเป็นผลึกต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริน (i-PP) จากการวิเคราะห์ผลึกของภาค i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr พบว่า เมื่อใช้เวลาภายใต้ดื่อบไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ภาคจะมีร้อยละความเป็นผลึก

ลดลงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับกรด i-PP แสดงถึงเสถียรภาพเชิงผลึกที่ดีเมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ จากการทดสอบลักษณะทางพื้นผิว ก่อนและหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที ของกรดที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสทั้งที่เติมและไม่เติม MA-g-PP ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำและหยดน้ำมันมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ กรดที่เติมไมโครเซลลูโลสจะมีความชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำลงและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันสูงขึ้น และพบว่า หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟเมื่อใช้เวลาภายใต้ตู้อบไมโครเวฟมากขึ้น ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะมีค่าต่ำลง จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของกรด ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบที่มีขี้ จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของกรดที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสทั้งที่เติมและไม่เติม MA-g-PP ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ พบว่า กรดที่เติม MA-g-PP จะมีพื้นผิวเรียบ มีช่องว่างและโพรงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน และหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ พบว่า ลักษณะพื้นผิวของกรดไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกรดก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ จากการทดสอบความแข็งของกรดที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสทั้งที่เติมและไม่เติม MA-g-PP ก่อนการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ พบว่า กรดที่เติมไมโครเซลลูโลสจะมีความแข็งสูงขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับกรด i-PP และหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ พบว่า กรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีความแข็งสูงสุดที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 72.67 และจากการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นของกรดที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสทั้งที่เติมและไม่เติม MA-g-PP พบว่า การเติมไมโครเซลลูโลสและการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ เป็นปัจจัยที่ทำให้กรดดูดซับความชื้นได้ และเมื่อใช้เวลาในตู้อบไมโครเวฟมากขึ้นจะทำให้กรดดูดซับความชื้นสูงขึ้น ดังนั้นความเหมาะสมในการเตรียมกรด คือ ไมโครเซลลูโลสปริมาณ 20 phr และ MA-g-PP ปริมาณ 10 wt% โดยให้กรดที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด และสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานภายใต้ไมโครเวฟ คือ 1,300 วัตต์ เวลา 2.5 นาที โดยให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

3. ในส่วนของการฉายรังสีแกมมาของกรดทดสอบให้ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และกรด i-PP หลังผ่านการฉายรังสีแกมมา พบว่า เมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมา โดยเฉพาะที่ 1,000 kGy ซึ่งทำให้การสลายตัวโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โซโมเลกุลของ i-PP เกิดการขาดออกและการเชื่อมขวางมากขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสสูงขึ้น และสามารถนำผลการทดสอบมาอธิบายถึงการสลายตัวของกรดหลังผ่านการฉายรังสีแกมมาได้แต่ไม่สามารถนำมาอธิบายถึงความแข็งแรงของกรดได้ และพบว่า i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีค่าความต้านทานแรงกดและมอดูลัสสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรด i-PP แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมไมโครเซลลูโลสช่วยให้เกิดการสลายตัวจากรังสีแกมมาสูงขึ้น จากการตรวจสอบสมบัติเชิงเคมีของกรด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และกรด i-PP พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1700 cm^{-1} และ 2270 cm^{-1} จากการคาบเกี่ยวของหมู่คาร์บอนิลและหมู่แอลคีน ซึ่งสามารถยืนยันการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรด และพบแนวโน้มความเข้มพีคที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีแกมมา จากการวิเคราะห์ผลึก i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และกรด i-PP หลังผ่านการฉายรังสีแกมมา พบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึกของกรด มีแนวโน้มลดลงเมื่อมี

การเพิ่มปริมาณการฉายรังสี โดยที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy จะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกต่ำสุด และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งถาด i-PP และถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr เนื่องจากในการฉายรังสี แกมมาที่ปริมาณรังสีสูงขึ้นจะมีอัตราในการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการสร้างโครงผลึกของถาดลดต่ำลง และเมื่อเติมไมโครเซลลูโลสมีผลทำให้มีปริมาณออกซิเจนอะตอมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น จากการเพิ่มโอกาสในการเข้าไปแทนที่ของออกซิเจนในขณะที่ทำการฉายรังสีแกมมา จากการทดสอบลักษณะทางพื้นผิวของถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และถาด i-PP พบว่า หลังการฉายรังสีแกมมา ส่งผลให้หยดน้ำมีโอกาสในการทำปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของถาดเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวถาด ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำลง และพบว่า ในถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำกว่าเมื่อเทียบกับถาด i-PP จากการทดสอบค่าความแข็งของถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และถาด i-PP พบว่า ค่าความแข็งของถาดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้ปริมาณรังสีแกมมาสูงขึ้น โดยที่การฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 1,000 kGy ให้ค่าความแข็งของถาดสูงสุด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพคือ มีความเปราะและความแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยในถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr จะมีค่าความแข็งสูงกว่าเมื่อเทียบกับถาด i-PP และจากการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นของถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr และถาด i-PP พบว่า หลังการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy ค่าร้อยละความชื้นที่ดูดซับเอาไว้ของถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับถาด i-PP ดังนั้นถาด i-PP/MA-g-PP/MC-20 phr สำหรับงานวิจัยนี้สามารถเกิดการสลายตัวจากรังสีแกมมาและสลายตัวสูงสุดที่ปริมาณรังสี 1,000 kGy

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดสอบถาดสำหรับบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟนั้น ยังไม่มีการทดสอบในส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้จริงอาหารแช่เย็นหรืออาหารแช่แข็ง ซึ่งนิยมบรรจุในบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องนี้ โดยอาจจะมีการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายมวลสารทางการบรรจุ เพื่อทราบถึงปริมาณสารที่อาจเคลื่อนย้ายจากถาดสู่อาหารได้ รวมถึงการทบทวนคุณสมบัติของถาดเมื่อมีการใช้งานทางการบรรจุอาหารแช่เย็นหรืออาหารแช่แข็ง และการศึกษาสมบัติย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากถาดในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครเซลลูโลสซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อทราบถึงผลของการเติมไมโครเซลลูโลสที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. การบรรจุอาหาร (Food Packaging). พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ บริษัท เอส.พี.เอ็ม, กรุงเทพฯ.
- เจริญ นาคะสรรค์. 2542. กระบวนการแปรรูปพลาสติก (Plastic processing). พิมพ์ครั้งที่ 1. ม.ป.ท.
- ชिरารุณี เพชรเย็น. 2553. เอกสารประกอบการสอนปฏิบัติการ (Teaching Laboratory) รายวิชา 01053434 การแปรรูปวัสดุชีวฐาน (Bio-based materials processing) ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ม.ป.ท.
- ธาริณี นามพิชญ์. 2550. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2550. ม.ป.ท.
- รายงานสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมเฉพาะประเภท: อุตสาหกรรมปั่นด้าย-ทอผ้า/กองเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมสำนักงานปลัดฯ กระทรวงอุตสาหกรรม. ม.ป.ท.
- ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. 2545. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ (Polymer Characterization). พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- วิไล รังสาดทอง. 2552. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. บริษัทแท็กซี่ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2543. วิทยาศาสตร์เส้นใย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร. ม.ป.ป. วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1 (Polymer Science I). โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- อัจฉราพร ไสละสุต และชิเงรุ วาดานาเบ. 2520. หนังสือวิศวกรรมสิ่งทอ. ม.ป.ท.
- อัมพวัน ต้นสกุล. 2551. สมบัติทางวิศวกรรมของอาหารและวัสดุชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ หจก. สามลดา, กรุงเทพฯ.

อิทธิพล แจ่มชัด. 2544. **พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymers composites)**. ม.ป.ท.

อรอุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Abu-Sharkh, B.F. and H. Hamid. 2004. Degradation study of date palm fibre /polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis. **Polymer Degradation and Stability**. **85**: 967-973.

Abiona, A.A. and A.G. Osinkolu. 2010. Gamma-irradiation induced property modification of polypropylene. **Journal of Physical Sciences**. **5:7**: 960-967.

Ashori, A. and A. Nourbakhsh. 2010. Performance properties of microcrystalline cellulose as a reinforcing agent in wood plastic composites. **Composites: Part B**. **41**: 578-581.

Aht-Ong, D., D. Atong and C. Pechyen. 2011. Surface and mechanical properties of cellulose micro-fiber reinforced recycle polyethylene film. **Materials Science Forum**. **695**: 469-472.

Amash, A. and P. Zugenmaier. 2000. Morphology and properties of isotropic and oriented samples of cellulose fibre-polypropylene composites. **Polymer**. **41**: 1589-1596.

Barra G., M.O., J.S. Crespo, J.R. Bertolino, V. Soldi and A.T. Nunes Pires. 1999. Maleic anhydride grafting on EPDM:Qualitative and quantitative determination **J. Braz. Chem. Soc**. **10:1**: 31-34.

Bengtsson, M., M. Le Baillif and K. Oksman. 2007. Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre-polypropylene composites. **Composites: Part A**. **38**: 1922-1931.

Bullions, T.A., D. Hoffman, R.A. Gillespie, J. Price-O'Brien and A.C. Loos. 2006. Contributions of feather fibers and various cellulose fibers to the mechanical properties of polypropylene matrix composites. **Composites Science and Technology**. **66**: 102-114.

- Chandrasekaran, S., S. Ramanathan and T. Basak. 2012. Microwave material processing-A review. **AICHE Journal**. 58:2.
- Chongprakobkit, S., M. Opaprakasit and S. Chuayjuljit. 2007. Use of PP-g-MA prepared by solution process as compatibilizer in polypropylene/polyamide 6 blends. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. 17:1: 9-16.
- Ciolacu , D., F. Ciolacu and VALENTIN I. POPA. 2011. Amorphous cellulose-structure and characterization. **Cellulose Chemistry and Technology**. 45: 13-21.
- Caraschi, J.C. and A.L. Leão. 2002. Woodflour as reinforcement of polypropylene. **Materials Research**. 5:4: 405-409.
- Cota, S.S., V. Vasconcelos, M. Senne Jr., L.L. Carvalho, D. B. Rezende and R.F. Côrrea. 2007. Changes in mechanical properties due to gamma radiation of high-density polyethylene (HDPE). **BRAZ J CHEM ENG**. 24:2: 259-265.
- Colom, X., F. Carrascob, P. Pagès and J. Cañavate. 2003. Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. **Composites Science and Technology**. 63: 161-169.
- de la Orden, M.U., C. González Sánchez, M. González Quesada and J. Martínez Urreaga. 2010. Effect of different coupling agents on the browning of cellulose-polypropylene composites during melt processing. **Polymer Degradation and Stability**. 95: 201-206.
- GAUTHIER, R., C. JOLY, A.C. COUPAS, H. GAUTHIER and M. ESCOUBES. 1998. Interfaces in polyolefin/cellulosic fiber composites:Chemical coupling, morphology, correlation with adhesion and aging in moisture. **POLYMER COMPOSITES**. 19:3.
- Jakob, E., G. Va´rhegyi and O. Faix. 2000. Thermal decomposition of polypropylene in the presence of wood-derived materials. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 56: 273-285.

- Jia, N., S.M. Li, M.G. Ma, J.F. Zhu and R.C. Sun. 2011. Synthesis and characterization of cellulose-silica composite fiber in ethanol/water mixed solvents. **BioResources**. 6(2): 1186-1195.
- Joly, C., R. Gauthier and B. Chabert. 1996. Physical chemistry of the interface in polypropylene/cellulose-fibre composites. **Composites Science and Technology** 56: 161-765.
- Kaczmarek, H., D. Oldak, P. Malanowski and H. Chaberska. 2005. Effect of short wavelength UV-irradiation on ageing of polypropylene/cellulose compositions. **Polymer Degradation and Stability**. 88: 189-198.
- Kalisz, S., K. Svoboda, Z. Robak, D. Baxter and L.K. Andersen. 2008. Application of FTIR absorption spectroscopy to characterize waste and biofuels for pyrolysis and gasification. **ISSN 1733-4381**. 8: 51-62.
- Khan, A.M., J. Ganster and H. Fink. 2009. Hybrid composites of jute and man-made cellulose fibers with polypropylene by injection moulding. **Composites: Part A** 40: 846-851.
- Kim, H.S., B.H. Lee, S.W. Choi, S. Kim and H.J. Kim. 2007. The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites **Composites: Part A**. 38: 1473-1482
- Kim, S.J., J.B. Moon, G.H. Kim and C.S. Ha. 2008. Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites: Comparison of wood fiber and cotton fiber. **Polymer Testing**. 27: 801-806.
- Klemm, D., F. Kramer, S. Moritz, T. Lindström, M. Ankerfors, D. Gray and A. Dorris. 2011. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. **Angew Chem Int Ed**. 50: 5438-5466.
- Kotek, J., I. Kelnar, J. Baldrian and M. Raab. 2004. Tensile behaviour of isotactic polypropylene modified by specific nucleation and active fillers. **European Polymer Journal**. 40: 679-684.

- Lee, S.H., S. Wang, G. M.P. and H. Xu. 2007. Evaluation of interphase properties in a cellulose fiber-reinforced polypropylene composite by nanoindentation and finite element analysis. **Composites: Part A**. 38: 1517–1524.
- Ljungberg, N., J.Y. Cavallè and L. Heux. 2006. Nanocomposites of isotactic polypropylene reinforced with rod-like cellulose whiskers. **Polymer**. 47: 6285-6292.
- Luz, S.M., J. Del Tio, G.J.M. Rocha, A.R. Goncalves and A.P. D. Jr.. 2008. Cellulose and cellulignin from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites: Effect of acetylation on mechanical and thermal properties. **Composites: Part A**. 39: 1362–1369.
- Mirabedinia. S.M., H. Rahimia, Sh. Hamedifara and S.M. Mohsenib. 2004. Microwave irradiation of polypropylene surface: a study on wettability and adhesion. **International Journal of Adhesion & Adhesives**. 24: 163–170.
- Mwaikambo, L.Y., E. Martuscelli and M. Avella. 2000. Kapok/cotton fabric–polypropylene composites. **Polymer Testing**. 19: 905–918,
- Ogaji, I.J., E.I. Nep, and J.D. Audu-Peter. 2011. Advances in natural polymers as pharmaceutical excipients. **Pharm Anal Acta**. 3:1.
- Panda, P.K. and R. Nayak. 2010. Effect of Thermal and Microwave Treatment on Low Temperature Mechanical Property of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite: An Experimental Exploration. **National Institute of Technology, Rourkela**. 0-58.
- Qiu, W., T. Endo and T. Hirotsu. 2006. Structure and properties of composites of highly crystalline cellulose with polypropylene: Effects of polypropylene molecular weight. **European Polymer Journal**. 42: 1059–1068.
- Rana, A.K., A. Mandal, B.C. Mitra, R. Jacobson, R. Rowell and A.N. Banerjee. 1998. Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: Effect of compatibilizer. **Journal of Applied Polymer Science**. 69: 329-338.

- Samir, M.A.S.A., F. Alloin and A. Dufresne. 2005. Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their Application in nanocomposite field. **Biomacromolecules**. 6: 612-626.
- Satgé, C., R. Granet, B. Verneuil, P. Branland and P. Krausz. 2004. Synthesis and properties of biodegradable plastic films obtained by microwave-assisted cellulose acylation in homogeneous phase. **C. R. Chimie**. 7: 135-142.
- Sclavonsa, M., P. Franquineta, V. Carliera, G. Verfailliea, I. Fallaisa, R. Legrasa, M. Laurentb and F.C. Thyriomb. 2000. Quantification of the maleic anhydride grafted onto polypropylene by chemical and viscosimetric titrations, and FTIR spectroscopy. **Polymer**. 41: 1989-1999,
- 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. **Packag. Technol. Sci**. 13: 205-210.
- Spoljaric, S., A. Genovese and R.A. Shanks. 2009. Polypropylene-microcrystalline cellulose composites with enhanced compatibility and properties. **Composites:Part A**. 40: 791-799.
- Terinte, N., R. Ibbett and K.C. Schuster. 2011. Overview on native cellulose and microcrystalline cellulose I structure studied by x-ray diffraction (WAXD): Comparison between measurement. **Lenzinger Berichte**. 89: 118-131.





ภาคผนวก ก
การเตรียมสารที่ใช้ในขั้นตอนการสกัดไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย

การเตรียมสารที่ใช้ในขั้นตอนการสกัดไมโครเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้าย

1. การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร (molar) ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (ml)

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยการดูสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยปิเปตปริมาณ 167 มิลลิลิตร (ml) ลงในขวดวัดปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 833 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนสารคนให้สารเข้ากัน ซึ่งจะมีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร สามารถคำนวณปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ตามสูตรด้านล่าง

$$M = (10DP)/MW$$

โดย M = ความเข้มข้นในหน่วยโมลต่อลิตร

D = ความหนาแน่นของกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.18 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

P = น้ำหนักโมเลกุลของกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 37 กรัม/โมล

MW = น้ำหนักโมเลกุลของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.46 กรัม/โมล

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

โดย C_1 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.97 โมลต่อลิตร

V_1 = ปริมาตรเริ่มต้นคือ ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในการปรับความเข้มข้น

C_2 = ความเข้มข้นสุดท้ายของกรดไฮโดรคลอริกที่ต้องการ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 โมลต่อลิตร

V_2 = ปริมาตรสุดท้ายคือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ต้องการ

2. สกัดเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

2.1 นำเศษผ้าฝ้ายมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อเอาสารที่เคลือบที่ผิวออก แล้วตากให้แห้ง จากนั้นตัดเศษผ้าฝ้ายเป็นชิ้นเล็กๆให้มีขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ชั่งน้ำหนักเศษผ้าฝ้ายที่ตัดแล้วมา 80 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร

2.2 เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาณ 1,500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องกวนและผสม (mixing/overhead stirrers) โดยควบคุมความเร็วใบพัด 350 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2.3 ทิ้งให้อุณหภูมิต่ำลงและรอให้เซลลูโลสตกตะกอน รินสารละลายกรดไฮโดรคลอริกทิ้ง แล้วกรองเส้นใยเซลลูโลสออกด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ โดยล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง และอบ

ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเซลล์โลสที่ได้ไปทำการบดด้วยเครื่องบด เป็นเวลา 1 นาที จนได้ผงไมโครเซลล์โลส และนำไปอบอีกครั้งก่อนนำไปผสมกับเม็ดพลาสติกใน ขั้นตอนต่อไป





การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครเซลลูโลส และกรดพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

1. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครเซลลูโลส

1.1 เตรียมตัวอย่าง โดยนำไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการบดเป็นผง ปริมาณ 1-3 มิลลิกรัม อัดให้มีลักษณะเป็นแผ่นบางซึ่งอาศัยเครื่องอัดความดันที่มีแรงอัด 10 ตันต่อตารางนิ้ว

1.2 นำไมโครเซลลูโลสที่อัดเป็นแผ่นใส่ในแผ่นใส่ตัวอย่างจากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยวัดในช่วงคลื่น 400-4000 cm^{-1} โดยใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T) ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 32 ครั้ง และมีความละเอียด 4.0 cm^{-1}

1.3 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็น ร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wavenumber) ที่มีความสัมพันธ์กัน

2. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกรดพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

2.1 เตรียมตัวอย่าง โดยตัดกรดพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสให้มีขนาด 4 ตารางเซนติเมตร

2.2 นำกรดตัวอย่างที่ตัดแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยวัดในช่วงคลื่น 400-4000 cm^{-1} โดยใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T) ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 32 ครั้ง และมีความละเอียด 4.0 cm^{-1}

2.3 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็น ร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wavenumber) ที่มีความสัมพันธ์กัน



ภาคผนวก ค

การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และการขึ้นรูปถาดไอโซเทคติก
พอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิธด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และการขึ้นรูปถาดไอโซแทคติก พอลิพพรลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

1. การผลิตเม็ดพลาสติกคอมพอลิธ

1.1 นำเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพพรลีน (Isotactic-Polypropylene pellets) เกรด EL-Pro P702J ซึ่งมี Melt Index (230°C/2.16 kg) 12 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 0.910 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิพพรลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene-grafted-Maleic Anhydride) ซึ่งมี Melt Index (190°C/1.0 kg) 49 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 0.903 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มาผสมกับไมโครเซลลูโลสตามอัตราส่วนดังตารางผนวกที่ ค1 จากนั้นเขย่าให้ไมโครเซลลูโลสและพอลิพพรลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ในสูตรที่มีการเติมสารประสาน) กระจายอย่างสม่ำเสมอกับเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพพรลีน

ตารางผนวกที่ ค1 อัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติกไอโซแทคติกพอลิพพรลีนกับไมโครเซลลูโลส ในหน่วยกรัม

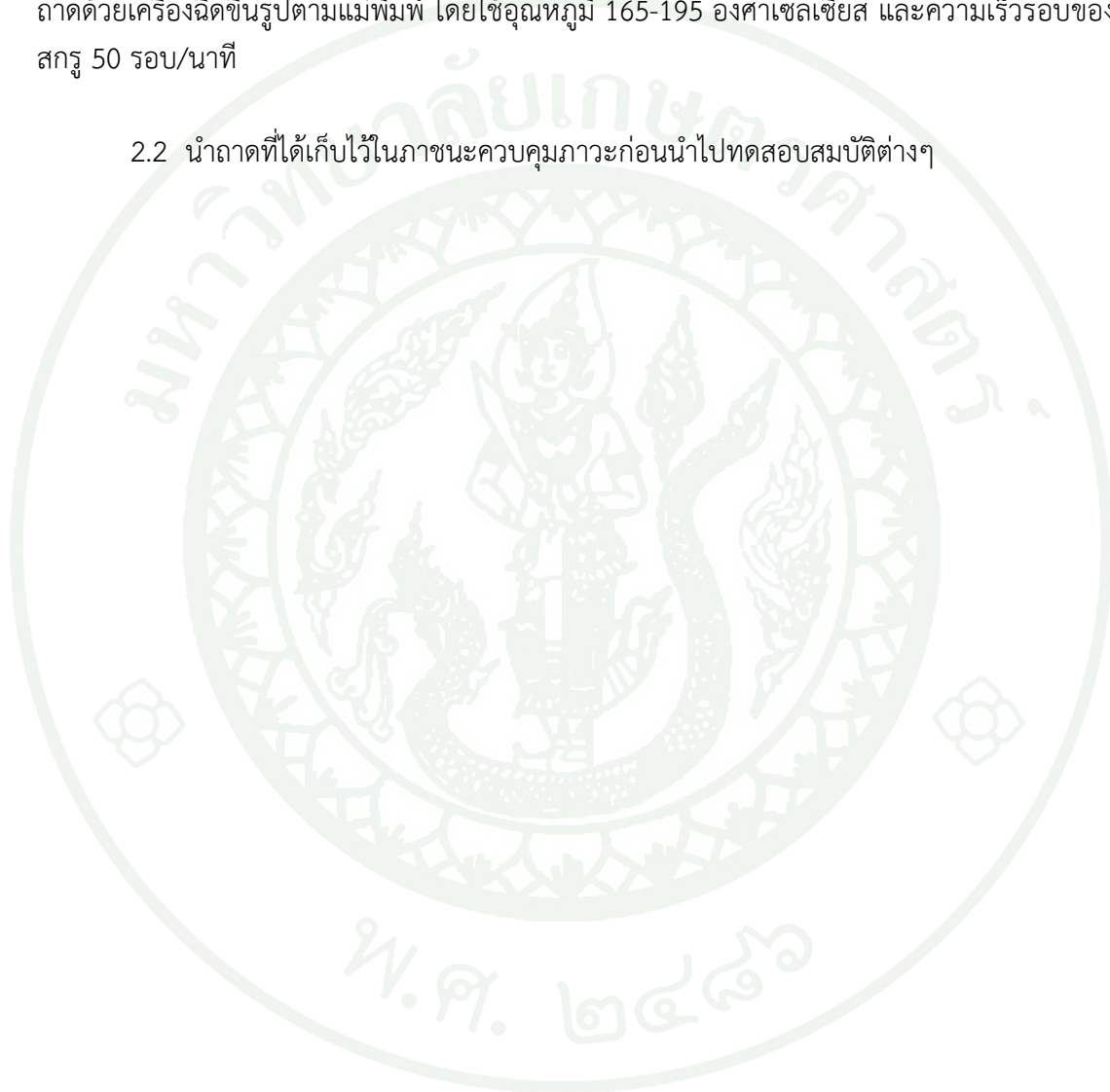
สูตรที่	สารเคมี (กรัม)		
	i-PP resin	MA-g-PP resin	MC
1	3,000	-	-
2	3,000	-	150
3	3,000	-	300
4	3,000	-	600
5	2,700	300	150
6	2,700	300	300
7	2,700	300	600

1.2 นำไปผสมเพื่อผลิตเป็นเม็ดพลาสติกคอมพอลิธด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้ อุณหภูมิ 165-170 องศาเซลเซียส ได้เป็นเม็ดพลาสติกคอมพอลิธของไอโซแทคติกพอลิพพรลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

2. การขึ้นรูปภาคไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

2.1 นำเม็ดพลาสติกคอมพอสิตของไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสที่ได้มาอบไล่ความชื้น โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปเป็นภาคด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ โดยใช้อุณหภูมิ 165-195 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรู 50 รอบ/นาที

2.2 นำภาคที่ได้เก็บไว้ในภาชนะควบคุมภาวะก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ





การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. มาตรฐานการทดสอบ ASTM D695

2. อุปกรณ์

เครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชีน

3. วิธีการทดสอบ

3.1 เตรียมภาควัดตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานทั้งหมด 5 ชิ้น

3.2 เปิดเครื่องทดสอบแล้วปรับระยะหัวกดซึ่งอยู่ด้านบนของฐานวางภาควัดตัวอย่างให้มีระยะห่างจากฐาน 50 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการกดที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3 ใส่ตัวอย่างในเครื่องทดสอบ ปรับสกรูให้แน่น

3.4 เลือกค่าและหน่วยที่ต้องการได้แก่ ค่าความต้านทานแรงกด (MPa) ค่ามอดุลัส (MPa และ GPa)

3.5 กดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ

3.6 บันทึกค่าทดสอบที่ได้

การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

1. วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถาด

1.1 อุปกรณ์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.2 วิธีการทดสอบ

1.2.1 เตรียมถาดตัวอย่างโดยนำไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นหักถาดตัวอย่างทันทีเพื่อให้เกิดรอยหัก โดยเลือกชิ้นที่มีขนาดเล็กและมีรอยหักที่กว้างและชัดเจน

1.2.2 ใช้เทปกาวคาร์บอนติดที่ด้านบนของฐานวางตัวอย่าง (specimen stub) จากนั้นนำถาดตัวอย่างติดลงบนเทปกาวคาร์บอน

1.2.3 นำฐานวางตัวอย่างที่ถาดตัวอย่างถูกติดเอาไว้แล้ว ไปผ่านการฉาบผิวด้วยทองคำภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ทองคำเปลี่ยนสภาพเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความสามารถในการนำไฟฟ้า ก่อนนำไปวิเคราะห์

1.2.4 นำตัวอย่างเข้าเครื่อง SEM

1.2.5 บันทึกภาพตัวอย่างและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2. ทดสอบสมบัติพื้นผิวของถาด

2.1 อุปกรณ์

เครื่องวัดมุมสัมผัส

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 ตัดถาดตัวอย่างให้มีขนาด 40x40 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวางบนฐานวางตัวอย่าง

2.2.2 ปรับฐานวางตัวอย่าง โดยการเลื่อนขึ้นหรือลง เพื่อปรับระยะห่างระหว่างถาดตัวอย่างและเข็มหยดให้เหมาะสม

2.2.3 นำน้ำหรือน้ำมันใส่ในเข็มหยดตัวอย่าง (syring) แล้วหยดลงบนตัวอย่าง ซึ่งในการหยดจะควบคุมโดยการกดปุ่มที่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อถ่ายภาพและบันทึกภาพ

2.2.4 ทำความสะอาดเข็มหยด โดยนำกระดาษทิชชูสัมผัสน้ำยาทำความสะอาด เพื่อให้น้ำหรือน้ำมันที่หยดลงมามีปริมาตรเท่ากันคือ ปริมาตรเท่ากับ 5 ไมโครลิตร

3. การทดสอบสมบัติผลึกของถาด

3.1 อุปกรณ์

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี (XRD)

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ตัดถาดตัวอย่างให้มีขนาด 40x40 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวางบนฐานวางตัวอย่าง

3.2.2 นำตัวอย่างเข้าเครื่อง XRD จากนั้นปรับช่วงในการยิงรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 0-80 องศา ของมุมสองเซต่า (2 Theta)

3.2.3 นำตัวอย่างเข้าเครื่อง XRD

3.2.4 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

4. การทดสอบความแข็งของถาด

4.1 มาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240

4.2 อุปกรณ์

เครื่องทดสอบความแข็งดูโรมิเตอร์ โดยใช้หัวกดชนิด D และมีน้ำหนักหัวกด 5 กิโลกรัม

4.3 วิธีการทดสอบ

4.3.1 ตัดถาดตัวอย่างให้มีขนาด 40x40 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวางบนฐานวางตัวอย่าง โดยให้ขอบตัวอย่างอยู่ห่างจากหัววัดอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร

4.3.2 ยึดหัววัดกับแท่นทดสอบ (test stand) โดยหมุนเกลียวเข้าในแกน แล้ววางตุ้มน้ำหนักบนด้านบนของแท่นทดสอบเหนือหัววัด โดยเสียบลงในแกน จากนั้นปรับและยึดฐานด้านล่างให้หัววัดอยู่เหนือตัวอย่างอย่างน้อย 0.25 นิ้ว และปรับเข็มช่วยอ่านที่หัววัด (เข็มสีแดงบนหน้าปัด) ของคูโรมิเตอร์ให้เท่ากับ 0

4.3.3 หมุนปุ่มสำหรับเลื่อนตัวอย่างขึ้น ให้ตัวอย่างสัมผัสกับหัววัดและดันให้ตุ้มน้ำหนักเลื่อนขึ้นประมาณ 0.25 นิ้ว

4.3.4 บันทึกผลการทดสอบ

5. การทดสอบการดูดซับความชื้นของถาด

5.1 มาตรฐานการทดสอบ ASTM D570-98

5.2 อุปกรณ์

โถดูดความชื้น ตู้อบ และเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง

5.3 วิธีการทดสอบ

5.3.1 ตัดถาดตัวอย่างให้มีขนาด 40x40 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถาดตัวอย่างที่อบแล้วไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้เป็น W_i

5.3.2 นำถาดตัวอย่างที่อบแล้วไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นที่ได้ทำการปรับให้มีสภาวะความชื้นร้อยละ 100 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถาดตัวอย่างออกจากโถดูดความชื้นไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้เป็น W_f

5.3.3 สามารถคำนวณค่าร้อยละความชื้นที่ถาดดูดซับเอาไว้ตามสูตรด้านล่าง

$$\text{Moisture absorption (\%)} = [(W_f - W_i)/W_i] \times 100$$

โดย Moisture absorption = ร้อยละความชื้นที่สกัดดูดซับเอาไว้

W_f = น้ำหนักของถาดหลังปรับสภาวะความชื้นร้อยละ 100

W_i = น้ำหนักของถาดหลังอบในตู้อบและก่อนปรับสภาวะความชื้นร้อยละ 100



การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

1. การวิเคราะห์อุณหภูมิในการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการหลอมเหลว

1.1 อุปกรณ์

เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

1.2 วิธีการทดสอบ

1.2.1 ตัดตัวอย่างปริมาณ 10 ± 0.5 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียม (aluminium crucible) โดยใช้ขนาด 10 ไมโครลิตร ปิดฉนวนฝาถ้วย

1.2.2 ใส่ถ้วยตัวอย่างในเครื่อง DSC จากนั้นปรับตั้งค่าข้อมูลที่ต้องการ โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเพิ่มจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถึง 230 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิจาก 230 ถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

1.2.3 จดบันทึกค่าที่ได้



ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

1. ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสของกรดไอโซแทคติกพอลิพพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟ

ตารางผนวกที่ จ1 ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสของกรดไอโซแทคติกพอลิพพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (MPa)	ค่ามอดูลัส (MPa)
1	5.49 ^a ±0.03	288.73 ^{ab} ±5.15
2	5.65 ^b ±0.03	309.23 ^{bc} ±15.59
3	5.43 ^a ±0.02	254.87 ^a ±6.54
4	5.49 ^a ±0.06	329.47 ^c ±7.26
5	5.68 ^b ±0.04	277.21 ^{ab} ±11.06
6	5.89 ^c ±0.05	302.11 ^{bc} ±10.93
7	5.99 ^d ±0.00	377.37 ^d ±51.25

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340, 650 และ 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5, 5 และ 10 นาที

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าความต้านทานแรงกดและค่ามอดูลัสของกรดไอโซแทคติกพอลิพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟ

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (MPa)	ค่ามอดูลัส (GPa)
1HA	5.42 ^c ± 0.07	1.45 ^{ef} ± 0.02
1HB	5.00 ^b ± 0.03	1.35 ^{cd} ± 0.01
1HC	4.94 ^b ± 0.07	1.34 ^{cd} ± 0.01
1MA	4.99 ^{bc} ± 0.03	1.35 ^{cde} ± 0.01
1MB	5.20 ^{def} ± 0.04	1.43 ^{fg} ± 0.04
1MC	5.12 ^{cde} ± 0.09	1.31 ^{bc} ± 0.02
1LA	5.41 ^a ± 0.09	1.36 ^{ab} ± 0.03
1LB	5.40 ^a ± 0.13	1.51 ^{cde} ± 0.03
1LC	5.38 ^a ± 0.03	1.38 ^{ab} ± 0.05
2HA	5.39 ^c ± 0.03	1.40 ^{de} ± 0.08
2HB	5.06 ^b ± 0.09	1.26 ^{ab} ± 0.04
2HC	5.03 ^b ± 0.05	1.21 ^a ± 0.04
2MA	5.06 ^c ± 0.09	1.26 ^{ab} ± 0.04
2MB	5.06 ^{fg} ± 0.09	1.41 ^{efg} ± 0.05
2MC	5.20 ^{def} ± 0.08	1.33 ^{cd} ± 0.04
2LA	5.62 ^{bc} ± 0.01	1.49 ^{cd} ± 0.05
2LB	5.64 ^{bcd} ± 0.10	1.55 ^{def} ± 0.05
2LC	5.59 ^{bc} ± 0.09	1.52 ^{de} ± 0.06
3HA	4.99 ^b ± 0.12	1.32 ^{bc} ± 0.05
3HB	4.78 ^a ± 0.09	1.22 ^a ± 0.04
3HC	4.99 ^b ± 0.05	1.20 ^a ± 0.06
3MA	4.77 ^a ± 0.09	1.22 ^a ± 0.04
3MB	4.90 ^{ab} ± 0.06	1.2 ^{ab} ± 0.02
3MC	4.84 ^a ± 0.06	1.22 ^a ± 0.03
3LA	5.41 ^a ± 0.06	1.33 ^a ± 0.04
3LB	5.36 ^a ± 0.04	1.44 ^{bc} ± 0.02
3LC	5.50 ^{ab} ± 0.07	1.43 ^{bc} ± 0.03
4HA	4.98 ^b ± 0.09	1.44 ^{ef} ± 0.06

ตารางผนวกที่ จ2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (MPa)	ค่ามอดุลัส (GPa)
4HB	4.96 ^b ±0.03	1.45 ^{ef} ±0.03
4HC	4.95 ^b ±0.05	1.45 ^{ef} ±0.05
4MA	4.88 ^{ab} ±0.12	1.45 ^{fg} ±0.03
4MB	5.24 ^{efg} ±0.04	1.64 ^{ij} ±0.06
4MC	5.07 ^{cd} ±0.11	1.47 ^s ±0.05
4LA	5.68 ^{cd} ±0.03	1.56 ^{def} ±0.05
4LB	5.56 ^{bc} ±0.08	1.61 ^{fgh} ±0.05
4LC	5.64 ^{bcd} ±0.02	1.65 ^{ghi} ±0.04
5HA	5.61 ^{de} ±0.08	1.47 ^{ef} ±0.04
5HB	5.35 ^c ±0.05	1.34 ^{cd} ±0.03
5HC	5.39 ^c ±0.08	1.35 ^{cd} ±0.03
5MA	5.35 ^{gh} ±0.05	1.34 ^{cd} ±0.03
5MB	5.69 ^k ±0.02	1.44 ^{fg} ±0.05
5MC	5.54 ^{ij} ±0.06	1.39 ^{def} ±0.04
5LA	5.07 ^f ±0.04	1.58 ^{efg} ±0.02
5LB	5.05 ^f ±0.01	1.68 ^{hi} ±0.08
5LC	5.10 ^{fg} ±0.05	1.62 ^{fgh} ±0.04
6HA	5.66 ^e ±0.08	1.49 ^{fg} ±0.01
6HB	5.44 ^c ±0.04	1.45 ^{ef} ±0.03
6HC	5.50 ^{cd} ±0.05	1.46 ^{ef} ±0.01
6MA	5.44 ^{ghi} ±0.04	1.45 ^{fg} ±0.03
6MB	5.75 ^{kl} ±0.11	1.58 ^{hi} ±0.046
6MC	5.70 ^k ±0.08	1.54 ^h ±0.04
6LA	5.25 ^s ±0.17	1.65 ^{ghi} ±0.02
6LB	5.20 ^{fg} ±0.07	1.67 ^{hi} ±0.03
6LC	5.15 ^{fg} ±0.07	1.69 ^{hi} ±0.03
7HA	5.85 ^f ±0.17	1.72 ⁱ ±0.04
7HB	5.65 ^e ±0.08	1.63 ^h ±0.01
7HC	5.39 ^c ±0.13	1.55 ^s ±0.04
7MA	5.65 ^{jk} ±0.08	1.63 ⁱ ±0.01
7MB	5.83 ^l ±0.07	1.70 ^j ±0.01
7MC	5.55 ^{ij} ±0.02	1.61 ⁱ ±0.01
7LA	5.86 ^e ±0.01	1.73 ^{ij} ±0.04

ตารางผนวกที่ จ2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (MPa)	ค่ามอดุลัส (GPa)
7LB	5.79 ^{de} ±0.14	1.71 ^{ij} ±0.01
7LC	5.85 ^e ±0.13	1.77 ^j ±0.02

หมายเหตุ HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที
 MA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 MB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 MC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที
 LA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 LB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 LC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 340 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที
 ตัวอักษร ^{a-l} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. ค่าความต้านทานแรงกดของธาตุไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ จ3 ค่าความต้านทานแรงกดของธาตุไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (MPa)		
	10 kGy	100 kGy	1,000 kGy
1	6.02 ^b ±0.11	2.44 ^a ±0.06	4.31 ^a ±0.23
2	6.30 ^{cd} ±0.07	3.43 ^d ±0.02	6.98 ^c ±0.03
3	6.33 ^{cd} ±0.09	3.60 ^e ±0.03	9.37 ^f ±0.03
4	6.17 ^{ab} ±0.05	3.06 ^b ±0.07	8.51 ^e ±0.08
5	6.43 ^{de} ±0.02	3.47 ^d ±0.06	5.98 ^b ±0.15
6	6.56 ^e ±0.15	3.25 ^c ±0.09	8.18 ^d ±0.14
7	4.32 ^a ±0.12	3.37 ^d ±0.06	7.19 ^{de} ±0.09

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-e} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. ค่ามอดุลัสของภาคไอโซเทคติกพอลิพอพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส ก่อนการใช้งาน ภายใต้ต้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ จ4 ค่ามอดุลัสของภาคไอโซเทคติกพอลิพอพรินเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสก่อนการใช้งานภายใต้ต้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่ามอดุลัส (GPa)		
	10 kGy	100 kGy	1,000 kGy
1	1.52 ^{bc} ±0.02	1.49 ^{bc} ±0.02	2.26 ^a ±0.05
2	1.46 ^{bc} ±0.03	1.47 ^b ±0.04	2.75 ^b ±0.04
3	1.25 ^a ±0.03	1.56 ^{cd} ±0.05	2.98 ^c ±0.05
4	1.54 ^c ±0.08	1.39 ^a ±0.05	2.79 ^b ±0.07
5	1.44 ^b ±0.04	1.62 ^d ±0.04	3.11 ^d ±0.02
6	1.64 ^d ±0.01	1.71 ^e ±0.01	3.38 ^e ±0.04
7	1.78 ^e ±0.06	1.76 ^f ±0.03	3.27 ^e ±0.13

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-f} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

5. ค่าความต้านทานแรงกดของธาตุไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ จ5 ค่าความต้านทานแรงกดของธาตุไอโซแทคติกพอลิพอพริลีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (MPa)		
	10 kGy	100 kGy	1,000 kGy
1HA	4.32 ^{ab} ±0.08	3.37 ^a ±0.06	4.41 ^a ±0.08
1HB	4.27 ^{ab} ±0.15	2.34 ^b ±0.03	4.31 ^a ±0.09
1HC	4.83 ^b ±1.10	2.44 ^a ±0.05	4.17 ^a ±0.14
7HA	4.17 ^{ab} ±0.15	3.31 ^b ±0.06	6.72 ^c ±0.23
7HB	3.92 ^a ±0.02	3.29 ^b ±0.05	7.41 ^d ±0.14
7HC	3.93 ^a ±0.07	3.33 ^b ±0.12	5.97 ^b ±0.11

หมายเหตุ HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที
 ตัวอักษร ^{a-c} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

6. ค่ามอดุลัสของภาคไอโซเทคติกพอลิฟอสฟอรีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ จ6 ค่ามอดุลัสของภาคไอโซเทคติกพอลิฟอสฟอรีนเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสหลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่ามอดุลัส (GPa)		
	10 kGy	100 kGy	1,000 kGy
1HA	4.32 ^b ±0.08	1.76 ^d ±0.03	2.58 ^b ±0.01
1HB	4.27 ^b ±0.15	1.54 ^b ±0.02	2.58 ^b ±0.04
1HC	4.83 ^b ±1.10	1.62 ^c ±0.01	2.72 ^c ±0.01
7HA	4.17 ^a ±0.15	1.81 ^e ±0.04	3.79 ^f ±0.08
7HB	3.92 ^a ±0.02	1.85 ^{ef} ±0.02	3.78 ^f ±0.07
7HC	3.93 ^a ±0.07	1.87 ^f ±0.01	3.47 ^e ±0.08

หมายเหตุ HA หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 2.5 นาที
 HB หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
 HC หลังการใช้งานภายใต้ตู้อบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1,300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที
 ตัวอักษร ^{a-f} ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายพงษ์พัฒน์ ศุขวัฒน์กุล
เกิดวันที่	26 พฤศจิกายน 2531
สถานที่เกิด	อุดรธานี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีการบรรจุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	รางวัลชมเชย จากงานประกวดนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2555 ประเภทนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	<ol style="list-style-type: none"> 1. ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2554 2. ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหารแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี งบประมาณ 2554 3. ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2555