



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อธิพลเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ดัดแปรต่อสมบัติทางกลเชิงความร้อน และการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน และการสลายตัวด้วยรังสีแกมมา
Structural Effects of Modified Zeolite on Thermomechanical and Barrier Properties of Active Polypropylene Film and γ -Ray Degradation

نامผู้วิจัย นางสาวฐิติมา สระมณี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชिरาวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ดวงเดือน อางองค์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎกานนท์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ดัดแปรต่อสมบัติทางกลเชิงความร้อน และการป้องกันการซึมผ่าน
ของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน และการสลายตัวด้วยรังสีแกมมา

Structural Effects of Modified Zeolite on Thermomechanical and Barrier
Properties of Active Polypropylene Film and γ -Ray Degradation

โดย

นางสาวฐิติมา สระมณี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
พ.ศ. 2557

ฐิติมา สระมณี 2557: อิทธิพลเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ดัดแปรต่อสมบัติทางกลเชิงความร้อน และการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มแอคติฟพอลิโพรพิลีน และการสลายตัวด้วยรังสีแกมมา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชिरารุณี เพชรเย็น, วท.ด. 128 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ผ่านกระบวนการเป่าฟิล์มที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดต่อสมบัติความเป็นผลึกและสมบัติทางเคมี พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นมีโครงสร้างแบบฟาวจาไซต์และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ได้ดีกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ซึ่งมีโครงสร้างแบบเอ็มเอฟไอ จากนั้นศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มแอคติฟพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าฟิล์มที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและผ่านการดัดแปรมีสมบัติที่ดีดังนี้ สมบัติความเป็นผลึกพบว่าที่ความเข้มฟลักซ์ตำแหน่ง 2 เซต้า เท่ากับ 10° 15.6° และ 20.3° มีพื้นที่ได้ฟลักซ์สูงขึ้นแสดงถึงความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สมบัติทางกายภาพพบว่าการกระจายตัวที่ดีและมีขนาดรูพรุนระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ที่สม่ำเสมอ สมบัติทางกลเชิงความร้อนพบว่าฟิล์มมีความแข็งแรงและมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สมบัติการต้านทานการซึมผ่านพบว่ามีสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสลายตัวด้วยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ พบว่าที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 50 กิโลเกรย์ เกิดการสลายตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและผ่านการดัดแปรดีที่สุด โดยมีสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติการต้านทานการซึมผ่านลดลงอย่างเด่นชัด เนื่องจากรังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิดฟรีเรดิเคิลส่งผลให้เกิดการแตกตัวของพันธะหลักในฟิล์มพอลิโพรพิลีน นอกจากนั้นอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่ผ่านการดัดแปรทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพและช่วยเพิ่มความสามารถในการสลายตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Titima Sramanee 2014: Structural Effects of Modified Zeolite on Thermomechanical and Barrier Properties of Active Polypropylene Film and γ -Ray Degradation. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Chiravoot Pechyen, Ph.D. 128 pages.

This research was studied the influence of polypropylene (PP) film mixed modified and unmodified zeolite Y and ZSM-5 with polyethylene glycol 4000 (PEG 4000) by blown film extruder at 1 3 and 5 wt%. For structure of zeolite Y and zeolite ZSM-5 on crystallization and chemical properties found that zeolite Y was a FAU structure and better reacted to PEG 4000 than that of zeolite ZSM-5 which was a MFI structure. The study to optimum condition for preparing active PP with modified and unmodified zeolite Y and ZSM-5 films found that PP/modified zeolite Y at 3 wt% was a good film. XRD patterns at $2\theta = 10^\circ$ 15.6° and 20.3° were higher, which increasing of crystallization. Morphology showed the good dispersion and smooth void space of particle and matrix. Thermomechanical properties were slightly increased of strength and glass transition temperature. Oxygen gas and water vapour permeability were clearly increased. The study to optimum condition for irradiated degradation by gamma ray at irradiation dose of 10 50 100 kGy found that irradiation dose of 50 kGy was a good degradation of PP/modified zeolite Y film. It found that chemical properties, morphology, mechanical and barrier properties were obviously decreased because gamma ray induced free radical and affected on the break bond in main chain of PP film. Moreover, modified zeolite Y as efficiency catalyst and could to accelerate degradation of PP film.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางในการค้นคว้าวิจัย พร้อมทั้งพิจารณาและแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ สรรพกุล และดร.ดวงเดือน อาจองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำ พร้อมทั้งชี้แนะในงานวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดชนก มีใจเชื้อ ผู้ทรงวุฒิภายนอก สำหรับคำแนะนำในงานวิจัยพร้อมทั้งตรวจแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ อบรมสั่งสอนและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้วิจัย อีกทั้งนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่และแม่บ้านของภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่านที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการปฏิบัติงานตลอดการศึกษาได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนหลักจากทุน “โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2555 ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2557 และทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2557 อีกทั้งขอขอบพระคุณบริษัทเอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด มหาชน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่และพี่สาว ที่ได้อบรม สั่งสอน แนะนำ และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาจนทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสศึกษาในระดับที่สูง รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ ที่คอยห่วงใยกันเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ

ฐิติมา สระมณี

มิถุนายน 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก การตัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ด้วย พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	103
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคและฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสม อนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปร และไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	105
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคและฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสม อนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปร และไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	107
ภาคผนวก ง การเตรียมและการขึ้นรูปฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิด วายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปร ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ผ่านกระบวนการเป่าฟิล์ม	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็น และชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วย พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	112
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	117
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ช่วงของค่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ	19
2 การดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์ที่อัตราส่วนระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ต่อสารละลายเอทานอลที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เท่ากับ 1:0.3 (กรัม)	37
3 การผันแปรอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ในเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน)	38
4 การผันแปรปริมาณความเข้มข้นของรังสีแกมมาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมและมีการผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน)	41
5 ตำแหน่งเลขคลื่นของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	47
6 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	52
7 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่มีการดัดแปรและไม่มีการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	55
8 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	79
9 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	80
10 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
11 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำในฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	92
 ตารางผนวกที่	
ง1 อัตราส่วนระหว่างเม็ดพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคซีโอไลต์ ในหน่วยกรัม	110
ฉ1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	118
ฉ2 ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	119
ฉ3 ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	120
ฉ4 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนในฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	121
ฉ5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำในฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	122
ฉ6 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา	123

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ฉ7 ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา 4000	124
ฉ8 ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา	125
ฉ9 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำในฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา	126

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิสไตรีน	9
2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์	10
3 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	10
4 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน	11
5 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน	12
6 โครงสร้างแบบทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียมซิลิเกต	14
7 โครงสร้างแบบทฤษฎีของอนุภาคซีโอไลต์ (ก) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย และ (ข) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5	15
8 โครงสร้างของซีโอไลต์ตามชนิดของรูพรุน (ก) โครงสร้างแบบกรง และ (ข) โครงสร้างแบบช่อง	16
9 พิกแสดงตำแหน่งมุม 2 เซต้าของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	44
10 FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	46
11 กลไกการดัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	48
12 พิกแสดงตำแหน่งมุม 2 เซต้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ก) P1 ข) P2 ค) P3 ง) P4 จ) P5 ฉ) P6 และ ข) P7	49
13 พิกแสดงตำแหน่งมุม 2 เซต้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ก) P1 ข) P8 ค) P9 ง) P10 จ) P11 ฉ) P12 และ ข) P13	51
14 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (ก) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย: ก) P1 ข) P2 ค) P3 ง) P4 จ) P5 ฉ) P6 และ ข) P7 (ข) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5: ก) P1 ข) P8 ค) P9 ง) P10 จ) P11 ฉ) P12 และ ข) P13	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
15	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามแนวพื้นผิวสัมผัสของฟิล์ม (ก) P1 (ข) P2 (ค) P3 (ง) P4 (จ) P5 (ฉ) P6 (ช) P7 (ซ) P8 (ณ) P9 (ญ) P10 (ฎ) P11 (ฏ) P12 และ (ฐ) P13	56
16	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามแนวตัดขวางของฟิล์ม (ก) P1 (ข) P2 (ค) P3 (ง) P4 (จ) P5 (ฉ) P6 (ช) P7 (ซ) P8 (ณ) P9 (ญ) P10 (ฎ) P11 (ฏ) P12 และ (ฐ) P13	59
17	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	63
18	การจัดเรียงของสายโซ่ในแนวตามเครื่อง (MD) และแนวขวางเครื่อง (TD)	64
19	ร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	65
20	ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	66
21	มอดูลัสสะสม (ก) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ข) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปร (ค) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปร และ (ง) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร	67
22	$\tan \delta$ (ก) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ข) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปร (ค) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปร และ (ง) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนในฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	74
24	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำในฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000	75
25	FT-IRสเปกตรัมของฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ (ก) ฟิล์มพอลิพรพิลีน (ข) ฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายที่ผ่านการดัดแปร และ (ค) ฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร	77
26	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสี	82
27	กลไกการแตกตัวของฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผ่านการฉายรังสี	84
28	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	87
29	ร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	88
30	ยังสัมมูลัสของฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์	89

อิทธิพลเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ดัดแปรต่อสมบัติทางกลเชิงความร้อน และการ
ป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน และการสลายตัวด้วยรังสีแกมมา

Structural Effects of Modified Zeolite on Thermomechanical and
Barrier Properties of Active Polypropylene Film and γ -Ray Degradation

คำนำ

การผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุผลิตผลทางการเกษตร ถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ เนื่องจากผลิตผลทางการเกษตรเป็นสินค้าที่สร้างรายได้เป็นจำนวนมากทั้งยังเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรทั่วโลก ดังนั้นการขนส่งผลิตผลเหล่านี้สู่มือผู้บริโภคต้องคำนึงถึงคุณภาพและความสดใหม่อยู่เสมอจึงต้องมีการปกป้องที่ดีจากบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณภาพ สามารถลดการเสื่อมเสียและป้องกันแรงกระทำจากภายนอกได้ดี โดยบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ควรมีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อความชื้น และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ดีหลัง การเก็บเกี่ยว

สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตมาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ในกลุ่มของพอลิโอเลฟิน ซึ่งมีข้อดีคือ หาซื้อง่าย ราคาถูก และมีความแข็งแรงต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยเฉพาะพอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์โพรพิลีน โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนมีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิล (methyl: CH_3) ซึ่งสามารถเกิดได้ 3 แบบ คือ อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic PP) คือพอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic PP) คือพอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลเรียงตัวเป็นระเบียบอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล และซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic PP) คือพอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลเรียงตัวเป็นระเบียบอยู่สลับด้านกันของสายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดผลึกได้บ้าง สำหรับการใช้งานทางการบรรจุนิยมใช้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์โพรพิลีนโดยใช้ระบบตัวเร่งปฏิกิริยา Ziegler-Natta ทำให้มีสมบัติทางด้านความแข็งตึง (stiffness) สูง สามารถทนทานต่อแรงบิดทำให้ไม่เสียรูปได้ง่าย และทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีการเค้นสูง (environment stress crack resistance) ในด้านของสมบัติทางความร้อนพอลิโพรพิลีนสามารถทนต่อความร้อนได้เป็นอย่างดี มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง (melting temperature: T_m) ประมาณ 160 ถึง 170 องศาเซลเซียส (งามทิพย์, 2550) และมีอุณหภูมิในการสลายตัวประมาณ 550 องศาเซลเซียส

(Ozmihci *et al.*, 2001) แต่เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงและการจัดเรียงตัวเป็นผลึก พบว่าหมู่เมทิลของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่กว่าหมู่ไฮโดรเจนของพอลิเอทิลีน จึงทำให้พอลิโพรพิลีนมีการเรียงตัวของผลึกไม่เป็นระเบียบ ส่งผลต่อความใส ความแข็งแรง ความทนทานต่อความร้อน และการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส (Lv *et al.*, 2010) ดังนั้นในการใช้งานของพอลิโพรพิลีนจึงมีการปรับปรุงการจัดเรียงตัวของผลึกเพื่อเพิ่มสมบัติให้เหมาะสม โดยมีการเติมสารเติมแต่ง เช่น สารก่อผลึก (nucleating agent) โดยสารก่อผลึกนี้จะเพิ่มความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ ทำให้มีสมบัติเชิงกลและการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สดีขึ้น ในขณะเดียวกันผลึกจะมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอเป็นผลทำให้พอลิเมอร์ยังคงความใส (อรอุษา, 2546) สำหรับสารที่นำมาใช้เป็นสารก่อผลึกในพอลิโพรพิลีนส่วนใหญ่จะเป็นสารจำพวก ทัลค์ (talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate: CaCO_3) เคลย์ (clay) และอนุภาคซีโอไลต์ (zeolite)

อนุภาคซีโอไลต์ เป็นสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปทรงประกอบด้วยโครงสร้างแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของซิลิเกต (SiO_4)⁻⁴ และอะลูมินेट (AlO_4)⁻⁵ ซึ่งรวมเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ทีอะตอม (T-atom) และสามารถเกิดการจัดเรียงตัวโดยการเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ของหน่วยโครงสร้างเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่แตกต่างกัน (Georgiev *et al.*, 2009) สำหรับชนิดของซีโอไลต์สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ โดยแบ่งตามอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ 1. ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมสูง มีสมบัติความมีขั้วต่ำจึงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี แต่ดูดซับความชื้นได้น้อยและมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้น้อย ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ซีเอสเอ็ม 5 (ZSM-5) และซีโอไลต์เบตา (zeolite beta) 2. ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมปานกลาง มีสมบัติความมีขั้วและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนปานกลาง ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เฟอริไรท์ (ferrierite) และมอร์ดไนท์ (mordenite) และ 3. ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำ มีสมบัติความมีขั้วสูงจึงดูดซับความชื้นได้ดีและมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ซีโอไลต์เอ (zeolite A) และซีโอไลต์วาย (zeolite Y) (ตะวัน, ม.ป.ป) ซีโอไลต์ในกลุ่มที่ 3 นี้จะแสดงสมบัติการดูดซับที่ดีและเหมาะสมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Pehlivan *et al.*, 2005) นอกจากนั้นโครงสร้างที่มีรูปทรงของซีโอไลต์ยังแสดงสมบัติการดูดซับและการคาย (adsorption/desorption) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดีเช่นกัน (Kim and Ahn, 2011) แต่โดยทั่วไปแล้วการผสมอนุภาคซีโอไลต์บนเมทริกซ์ของพอลิเมอร์จะมีการดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์ก่อนการผสม เนื่องจากโครงสร้างอนุภาคซีโอไลต์มีความหนาแน่นของประจุสูงจึงแสดงความมีขั้ว แต่พอลิเมอร์ส่วนใหญ่แสดงความเป็นขั้วต่ำจึงทำให้อนุภาคซีโอไลต์กระจายตัวไม่ดีส่งผลให้สมบัติต่างๆ ลดลงได้ ดังนั้นการดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์สามารถทำได้โดยการเติมสารเชื่อมประสาน (coupling

agent) ซึ่งมีสมบัติความมีขี้และไม่ขี้ในอนุภาคเดียวกัน สารเชื่อมประสานที่นิยมนำมาดัดแปร อนุภาคซีโอไลต์ ได้แก่ สเตียริกแอซิด (stearic acid) แคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) และ พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (polyethylene glycol 4000: PEG 4000) นอกจากนั้นแล้วการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ยังต้องคำนึงถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มส่วนใหญ่ทำมาจาก พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายยากหรือใช้เวลานานในการย่อยสลายจึงเป็นผลทำให้มีการคิดค้นวิธีในการย่อยสลายพอลิเมอร์เหล่านั้น และหนึ่งในวิธีที่ช่วยเร่งการย่อยสลายของพอลิเมอร์ คือการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ เกิดการแตกขาดเป็นผลทำให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้เร็วขึ้น โดยพบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ เมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาแล้วจะทำให้คุณสมบัติในการสลายตัวลดลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ (Dawood and Miura, 2002; Chiu, 2009)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนสำหรับบรรจุผลิตผลทางการเกษตร โดยศึกษาสมบัติของอนุภาคซีโอไลต์ 2 ชนิด คือ ซีโอไลต์ชนิดวาย และซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 โดยทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติความเป็นผลึก เพื่อเปรียบเทียบสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของอนุภาคซีโอไลต์ในการขึ้นรูป โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) เครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extruder) ศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติความเป็นผลึก สมบัติทางกล สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ สมบัติการดูดซับแก๊ส และสมบัติทางความร้อน จากนั้นนำแต่ละสูตรมาเปรียบเทียบและสร้างแบบจำลองเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนที่บรรจุผลิตผลทางการเกษตร นอกจากนั้นแล้วในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน โดยนำฟิล์มมาผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ตามลำดับ จากนั้นศึกษาสมบัติทางเคมีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ และสมบัติทางความร้อน เพื่อชี้เน้นถึงความสามารถในการย่อยสลายได้ของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ดัดแปรต่อสมบัติความเป็นผลึก และสมบัติทางเคมี สำหรับการนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน

2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ดัดแปรต่อสมบัติความเป็นผลึก สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางกลเชิงความร้อน และสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำ

3. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสลายตัวของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ดัดแปร โดยผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีที่แตกต่างกัน

การตรวจเอกสาร

บรรจุนก

1. บรรจุนก

บรรจุนก หมายถึง ภาชนะหรือโครงสร้างที่ใช้เพื่อปกป้องความเสียหายของผลิตภัณฑ์รักษาคุณภาพ เกิดความสะดวกในการใช้สอย สะดวกในการขนส่ง และเพื่อการสื่อสารต่างๆ โดยใช้ทั้งศาสตร์ ศิลปะ และเทคโนโลยีร่วมกัน นอกจากนี้บรรจุนกยังรวมถึงฉลากและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการมัดหรือปิดผนึกภาชนะบรรจุ (งามทิพย์, 2550)

2. หน้าที่หลักของบรรจุนก

2.1 การรับรองสินค้า (contain) บรรจุนกทำหน้าที่รองรับสินค้าให้รวมกันเป็นกลุ่มและหมวดหมู่ หรือตามรูปร่างของภาชนะ ทำให้สะดวกในการเก็บรักษา ขนส่ง ลำเลียง และการบริโภค

2.2 การปกป้องผลิตภัณฑ์ (protection) บรรจุนกทำหน้าที่รักษาสภาพสินค้าให้คงอยู่ในสภาพที่ดี และป้องกันคุ้มครองสินค้าที่อยู่ภายในจากความเสียหายด้วยเหตุต่างๆ ทั้งจากสภาพแวดล้อม มนุษย์ สัตว์ และการขนส่งโยกย้าย

2.3 เคลื่อนย้ายได้ (handing) บรรจุนกต้องเคลื่อนย้ายได้สะดวก เช่น ถ้าใส่ในกล่องต้องเป็นกล่องที่มีหูหิ้วหรือช่องสำหรับสอดเครื่องมือเพื่อจับหรือยกได้สะดวก น้ำหนักของบรรจุนกไม่น้อยจนเกินไปทำให้ยกหรือขนย้ายไม่สะดวก

2.4 การรักษา (preserve) บรรจุนกช่วยรักษาคุณภาพของสินค้าให้คงเดิมตั้งแต่ผู้ผลิตจนถึงผู้บริโภคคนสุดท้าย รวมทั้งในระหว่างการใช้งานของผู้บริโภคด้วย เช่น สินค้าประเภทอาหาร บรรจุนกจะต้องทำหน้าที่ถนอมและช่วยรักษาคุณภาพ รสชาติ และคุณค่าทางอาหาร มิให้เน่าเสีย เหม็นหืน หรือขึ้นรา

2.5 การขนส่ง (transportation) บรรจุกัณฑ์ช่วยทำให้การขนส่งสินค้าไปยังแหล่งตลาดเป็นไปด้วยความสะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย และใช้ต้นทุนที่เหมาะสม รวมทั้งการใช้บรรจุกัณฑ์เพื่อการขนส่งแบบต่างๆ เช่น กล่อง ลัง และกระเบ เป็นต้น

2.6 เอกลักษณ์ของตัวเอง (identification) บรรจุกัณฑ์ต้องมีเอกลักษณ์ของตัวเอง เพื่อให้ผู้บริโภคแยกแยะได้ว่าผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดไม่เหมือนกัน และเมื่อนำไปวางเรียงรวมกับผลิตภัณฑ์ของคู่แข่ง ผู้บริโภคสามารถแยกผลิตภัณฑ์นั้นออกมาได้

2.7 สร้างความสะดวก (convenience) การบริโภคอุปโภคสินค้าต่างๆ ของผู้บริโภคล้วนแต่ต้องการความสะดวกในการกิน การใช้บรรจุกัณฑ์ที่เปิดปิดง่ายหรือบรรจุกัณฑ์ประเภทที่ทำหน้าที่ฉีกหรือพ่นออกมาได้ ทำให้เกิดความสะดวกในการใช้อย่างมาก

2.8 ดึงดูดความสนใจ (attractiveness) หน้าที่ของบรรจุกัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ขายในร้านค้าสมัยใหม่ซึ่งไม่มีพนักงานขายนั้น บรรจุกัณฑ์ต้องทำหน้าที่แทนพนักงานขาย จึงกล่าวได้ว่าบรรจุกัณฑ์ต้องทำหน้าที่เหมือนพนักงานขายที่พูดไม่ได้ (silent salesman)

2.9 ช่วยสื่อสารการตลาด (communication) บรรจุกัณฑ์ที่นำมาใช้บรรจุหีบห่อทุกชนิดย่อมจะมีพื้นที่บนบรรจุกัณฑ์นั้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูลต่างๆ กับผู้ซื้อได้ด้วยตราสินค้า (brand) เพื่อจะสื่อให้ทราบว่าผลิตภัณฑ์นั้นมาจากใครและมีคุณภาพระดับใด สามารถอธิบายคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ บอกวิธีการใช้ ส่วนประกอบต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ปริมาณการบรรจุ อายุการใช้งาน และคำเตือน รวมทั้งสร้างรูปภาพเพื่ออธิบายถึงตัวผลิตภัณฑ์ด้วยสิ่งที่เรียกว่าฉลาก (label) (สมพงษ์, 2550)

บรรจุกัณฑ์แอดตีฟ

1. บรรจุกัณฑ์แอดตีฟ

การบรรจุแบบแอดตีฟ หมายถึง วิธีการบรรจุที่บรรจุกัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ และสภาวะแวดล้อมมีปฏิสัมพันธ์กันเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อความปลอดภัย หรือปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ พร้อมกับการถนอมรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย ซึ่งการบรรจุแบบแอดตีฟนับว่า

เป็นนวัตกรรมทางการบรรจุอาหาร เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและการค้ายุคใหม่ (งามทิพย์, 2550; พรชัย, 2552)

2. ชนิดของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

2.1 สารดูดซับแก๊สออกซิเจน (oxygen scavengers) การใช้สารดูดซับแก๊สออกซิเจนเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณแก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ โดยสารดูดซับแก๊สออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจนเพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนไปทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ออกไป โดยทั่วไปแล้วการใช้สารดูดซับแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ทำให้สามารถลดปริมาณแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.01 ซึ่งเหลือน้อยกว่าแก๊สออกซิเจนที่เหลือจากการดูดเอาแก๊สออกให้เป็นสุญญากาศ (vacuum) หรือการอัดแก๊สเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ (gas flush) สารดูดซับออกซิเจนที่ผลิตออกมาในเชิงการค้ามีหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบซอง (sachet) แบบฉลากและแผ่นการ์ด (labels and card) แบบผสมเข้าไปในวัสดุบรรจุภัณฑ์ (blended into package material) แบบฝา (closure) และแบบผนังด้านข้าง (sidewall)

2.2 สารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide scavengers) สารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนใหญ่เป็นสารดูดซับที่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผงเหล็ก เป็นผลทำให้สามารถดูดซับได้ทั้งออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในเวลาเดียวกัน

2.3 สารดูดความชื้นและสารดูดน้ำ (moisture and water remover) สารดูดความชื้นจะช่วยปกป้องผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความชื้น โดยจะดูดความชื้นที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ และความชื้นที่ผ่านเข้ามาในบรรจุภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งจะช่วยป้องกันหรือชะลอการเสื่อมเสียของอาหารที่ไวต่อความชื้น สารดูดความชื้นทำจากวัสดุหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล เคลย์ และสารโมเลกุลที่มีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งสารดูดความชื้นประเภทซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ถึงร้อยละ 35 ของน้ำหนักตัว และสามารถรักษาสภาพแห้งของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุอาหารแห้งให้มีค่าปริมาณน้ำอิสระได้ ต่ำกว่า 0.2 ส่วนสารประเภทที่มีสมบัติการคัดแยกโมเลกุล (molecular sieves) เช่น อนุภาคซีโอไลต์สามารถดูดความชื้นได้ถึงร้อยละ 24 ของน้ำหนักตัว นอกจากนี้ในขณะที่ยังสามารถดูดกลืนได้อีกด้วย

2.4 การปล่อยสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial release) สารต้านจุลินทรีย์นี้จะถูกใส่เข้าไปในบรรจุภัณฑ์หรือเคลือบที่ผิวซึ่งส่งผลช่วยในการลด ชะลอ หรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ผิวของอาหาร และทำให้สามารถยืดอายุการเก็บหรือเพิ่มความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ของอาหาร

สำหรับสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้งาน ได้แก่ เอทานอล แอลกอฮอล์อื่นๆ กรดอินทรีย์ และเกลือของกรดนั้น สารที่ยังยั้งเชื้อรา เอนไซม์ สารสกัดจากธรรมชาติ และสมุนไพร

2.5 สารดูดซับแก๊สเอทิลีน (ethylene scavenger) แก๊สเอทิลีนจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรโมเลกุลเป็น C_2H_4 ซึ่งมีสมบัติเป็นสารเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของพืชและเร่งการสุกของผลไม้ การผลิตแก๊สเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสื่อมเสียทางเคมีและทางกายภาพ โดยเมื่อปริมาณแก๊สเอทิลีนสภาวะบรรยากาศรอบๆ ผักและผลไม้เพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราการหายใจเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณแก๊สเอทิลีนต่ำลงมีผลทำให้อัตราการหายใจช้าลง ดังนั้นการกำจัดแก๊สเอทิลีนทำให้กระบวนการสุกและการเสื่อมเสียของผักและผลไม้ช้าลง และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาออกไปได้ สารดูดซับแก๊สเอทิลีนที่ใช้ในเชิงการค้ามีทั้งแบบที่บรรจุลงในซองขนาดเล็กและแบบที่ผสมเข้าไปในโครงสร้างของฟิล์ม โดยมักใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารดูดซับแก๊ส เอทิลีน การทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สเอทิลีนกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนี้ไม่สามารถย้อนกลับได้ และในการใช้งานจริงจะใช้สารดูดซับแก๊สเอทิลีนเพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นในการดูดซับปริมาณแก๊สเอทิลีนที่ผักและผลไม้สร้างขึ้น นอกจากนั้นยังมีสารดูดซับแก๊สเอทิลีนในรูปแบบอื่นๆ เช่น การใช้ถ่าน กัมมันต์ (activated carbon) ไดอะตอมไมต์ (diatomite) เบนโทไนท์ (bentonite) และอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) โดยในหลายประเทศแถบทวีปเอเชียได้รายงานว่าการใช้สารเหล่านี้ผสมในฟิล์มพลาสติกหรือในกระดาศมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สเอทิลีนได้เป็นอย่างดี (พรชัย, 2552)

พลาสติก

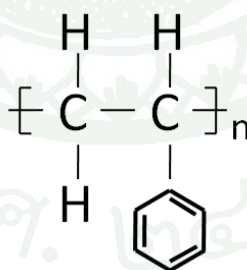
1. พลาสติก

พลาสติก หมายถึง วัสดุประเภทพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถทำให้ไหล (flow) และหล่อขึ้นรูป (mould) ได้ โดยใช้ความร้อนและความดันร่วมกัน พลาสติกที่ใช้ในการบรรจุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมเซต (thermoset) ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดสายโซ่เชื่อมขวาง (cross-linked) หรือร่างแห (network) การขึ้นรูปทางความร้อนจะทำให้เกิดการไหลได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งจะทำให้เกิดการแข็งตัว และไม่สามารถหลอมหรือละลายได้อีก ตัวอย่างเช่น อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) ฟอรัลดีไฮด์ (formaldehyde) เมลามีนฟอรัลดีไฮด์ (melamine formaldehyde) ยูเรียฟอรัลดีไฮด์ (urea formaldehyde) และยางสังเคราะห์ที่ผ่านการบ่ม (cured rubbers) ส่วนเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เป็นพลาสติกชนิดโซ่ตรงหรือกิ่ง ประกอบด้วยพลาสติกแบบผลึก

(crys- talline) แบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) และแบบอสัณฐาน (amorphous) มีความอ่อนตัวและไหลเมื่อได้รับความร้อน สามารถนำมาหลอมใหม่เพื่อปรับรูปทรงและขนาด หรือรีไซเคิลได้หลายๆ รอบ ตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น (งามทิพย์, 2550; โอนดาร์, 2552)

2. ชนิดของพลาสติก

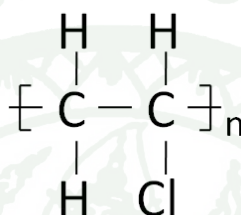
2.1 พอลิสไตรีน (polystyrene: PS) โครงสร้างของพอลิสไตรีนจะมีวงเบนซีน ซึ่งมีขนาดใหญ่เป็นตัวขัดขวางไม่ให้เกิดผลึกได้ส่งผลให้เป็นพลาสติกที่เป็นอสัณฐานหรือไม่มีความเป็นผลึก มีความแข็งตึงสูง กรอบเปราะ แตกหักได้ง่าย ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 74 ถึง 105 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส เป็นพลาสติกที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์คงรูปประเภทถ้วยและถาด สำหรับการใช้งานเป็นโฟมต้องมีการเติมสารพองตัวทำให้พลาสติกพอลิสไตรีนเกิดโฟมที่เรียกว่าอีพีเอส (expanded polystyrene: EPS) ซึ่งนิยมใช้ทำเป็นวัสดุกันกระแทกหรือถ้วยโฟมบรรจุอาหารร้อน เนื่องจากพลาสติกชนิดนี้เป็นฉนวนความร้อนที่ดี นอกจากนั้นมีการนำพอลิสไตรีนมาผลิตเป็นฟิล์มพลาสติกห่ออาหาร เนื่องจากมีสมบัติ น้ำหนักเบา ใสแข็งแรง และขึ้นรูปได้ง่าย แต่ไม่นิยมนำพอลิสไตรีนมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสอาหารโดยตรง เนื่องจากสารสไตรีนอาจปนเปื้อนลงสู่อาหารได้ โครงสร้างโมเลกุลของพอลิสไตรีนแสดง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิสไตรีน

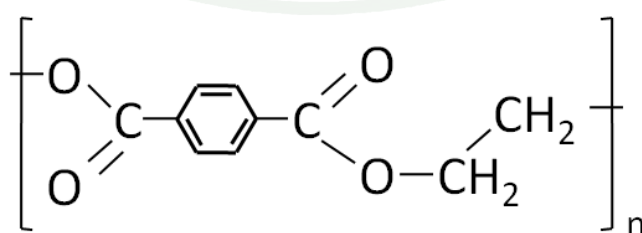
2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride: PVC) เป็นพลาสติกที่ใช้งานได้หลากหลาย สามารถอยู่ในรูปของบรรจุภัณฑ์คงรูปหรืออาจทำให้นิ่มและยืดหยุ่นได้ โดยปกติพอลิไวนิลคลอไรด์จะมีลักษณะที่แข็งเปราะ และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวเท่ากับ 212 องศาเซลเซียส พอลิไวนิลคลอไรด์มีลักษณะการเรียงตัวแบบอะแทกติกทำให้มีความเป็นผลึกต่ำ จึงต้องมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ลง

ไป พอลิไวนิลคลอไรด์มีสมบัติเด่น คือ ใส สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไขมันได้ดี จึงนิยมนำมาทำเป็นฟิล์มห่อบรรจุภัณฑ์อาหาร แต่พอลิไวนิลคลอไรด์สลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกความร้อน ดังนั้น ก่อนนำมาใช้งานจึงต้องมีการเติมสารอื่นๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติ เช่น แอนติออกซิแดนต์ (antioxidant) และสารคงสภาพต่อแสงอัลตราไวโอเลต (UV-light stabilizer) เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและจากแสงอัลตราไวโอเลตตามลำดับ โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์แสดง ดังภาพที่ 2



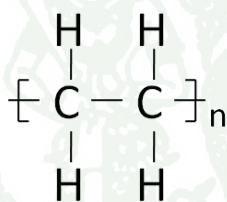
ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลคลอไรด์

2.3 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate: PET) เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ (polyester) และนิยมนำมาผลิตเป็นขวดบรรจุภัณฑ์ที่มีความใสและความวาว พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความเป็นผลึกสูงจึงสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดีและทนต่อสารเคมีจำพวกแอลกอฮอล์ กรด และน้ำมัน แต่ไม่เหมาะสำหรับบรรจุสารจำพวกต่าง นอกจากนั้น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังมีความสามารถทนต่อการกระแทกได้ดี มีความเหนียว มีความแข็งแรงสูง เป็นฉนวน ไฟฟ้าที่ดีในอุณหภูมิห้อง และสามารถเก็บแช่เย็นได้ โดยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีช่วงของการทนอุณหภูมิกว้างตั้งแต่ -40 ถึง 220 องศาเซลเซียส เพราะมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้วเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวเท่ากับ 265 องศาเซลเซียส โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแสดง ดังภาพที่ 3



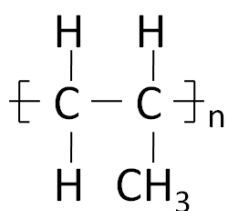
ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

2.4 พอลิเอทิลีน (polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่อยู่ในตระกูลพอลิโอเลฟิน ซึ่งมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมบรรจุเนื่องจากมีราคาต่ำ และมีสมบัติทางการบรรจุที่ดีหลายประการ เช่น ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี มีความเป็นขั้วต่ำทำให้ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ง่ายเนื่องจากมีจุดอ่อนตัว (softening point) อยู่ที่ 80 ถึง 130 องศาเซลเซียส จึงมักใช้เป็นฟิล์มด้านในของภาชนะบรรจุที่ต้องการปิดผนึกด้วยความร้อน และพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะสามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรจิเตตไฮโดรคาร์บอน นอกจากนั้นพอลิเอทิลีนยังมีความเหนียว และใส เนื่องจากมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ -120 องศาเซลเซียส ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิห้อง และทนทานในการใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดี สามารถบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ -70 ถึง 70 องศาเซลเซียส โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแสดง ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน

2.5 พอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่อยู่ในตระกูลพอลิโอเลฟิน เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน ในโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนมีหมู่เมทิลอยู่ทำให้การจัดเรียงตัวไม่ค่อยหนาแน่น ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นต่ำกว่าพอลิเอทิลีนและความใสมากกว่าพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็ง เหนียว ทนต่อสารเคมี และสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ -20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส จึงสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิสูง ซึ่งเหมาะทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอุ่นอาหารเข้าไมโครเวฟ รูปแบบที่นิยมใช้พอลิโพรพิลีน คือทำเป็นถุงร้อนหรือซองฟิล์ม ขวด ภาชนะฉีดขึ้นรูป และกล่องบรรจุอาหาร แต่พอลิโพรพิลีนยังมีข้อเสียคือปิดผนึกด้วยความร้อนยาก และกรอบเปราะเมื่อใช้งานในอุณหภูมิต่ำเนื่องจากจุดที่เกิดการเปราะ (brittleness point) มีค่าสูงซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 0 ถึง -1 องศาเซลเซียส และเมื่อเจอความร้อนและแสงแดดสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย (ดวงฤทัย, 2550; สมพงษ์, 2550; วิริยะ, 2554) โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนแสดง ดังภาพที่



ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน

สารเติมแต่ง

การนำพอลิเมอร์มาใช้งานโดยตรงอาจยังมีข้อจำกัดด้านสมบัติต่างๆ อยู่ จึงมีการนำพอลิเมอร์มาผสมกับสารอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มสมบัติที่ดีและมีความคงทนต่อการใช้งาน หรือช่วยให้กระบวนการผลิตเกิดได้ง่ายขึ้น โดยสารที่ผสมลงไปนี้เรียกว่า สารเติมแต่ง (additive) โดยทั่วไปแล้วสารเติมแต่งควรมีสมบัติต่างๆ ได้แก่ ทำหน้าที่อย่างมีประสิทธิภาพ มีความเสถียรภายใต้สภาวะการขึ้นรูปและการใช้งาน ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดกลิ่นหรือรส มีราคาถูก และไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป ตัวอย่างของสารเติมแต่ง มีดังนี้

1. ฟิลเลอร์

ฟิลเลอร์ (filler) ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์ ลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ฟิลเลอร์ที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่แล้วสารอนินทรีย์จะใช้กับเทอร์โมพลาสติก ในขณะที่สารอินทรีย์จะใช้ในพลาสติกเทอร์โมเซต ตัวอย่างฟิลเลอร์อินทรีย์ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ เคาลิน ซิลิกา และคาร์บอนแบล็ก ส่วนตัวอย่างฟิลเลอร์อินทรีย์ ได้แก่ ผงไม้ เยื่อไม้ และแป้ง

2. เส้นใยเสริมแรง

เส้นใยเสริมแรง (reinforcing fiber) ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งตึงให้กับพอลิเมอร์ และเรียกวัสดุผสมว่า วัสดุเชิงประกอบหรือคอมโพสิต เส้นใยเสริมแรงที่สำคัญและใช้กันมากกับพอลิเมอร์ ได้แก่ ไยแก้ว ไยคาร์บอน และใยอะรามิด

3. พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ทำหน้าที่เพิ่มความอ่อนตัว เพิ่มความสามารถในการหักงอ และเพิ่มความสามารถในการดึงยืดของพอลิเมอร์ โดยการทำให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้าย แก้วลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้พลาสติไซเซอร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบ พลาสติก และลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปเกิดง่ายขึ้น

4. สารประสาน

สารประสาน (coupling agent) ทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์ กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับเฟสทั้งสอง ทำให้มีการยึดเกาะ ระหว่างเฟสดีขึ้น ตัวอย่างสารประสานที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ สารโครเมียมเชิงซ้อน ไสเลน ไททานต และเซอร์โค เนียมอะลูมิเนต สำหรับการใส่สารเชื่อมประสานมี 2 วิธี คือ การนำสารประสานไป เคลือบหรือปรับแต่งที่พื้นผิวของฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงแล้วจึงนำไปผสมกับพอลิเมอร์ และการ นำสารประสานไปผสมกับพอลิเมอร์โดยตรงระหว่างกระบวนการคอมพาวด์ดิง

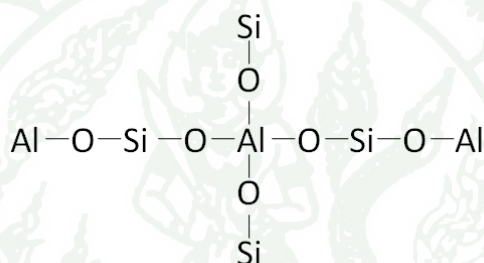
5. สารก่อผลึก

สารก่อผลึก (nucleating agent) ทำหน้าที่เพิ่มความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ ทำให้มีสมบัติ เชิงกลที่ดี ผลึกเกิดได้เร็วขึ้น ในขณะเดียวกันผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ จึงทำให้แสงผ่านได้ ดี และมีความโปร่งใสมากขึ้น สารก่อผลึกที่ดีควรมีสมบัติ ไม่ละลายในพอลิเมอร์ มีจุดหลอมเหลวสูง กว่าพอลิเมอร์ ไม่ระเหย และกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ ตัวอย่างสารที่นำมาใช้เป็นสารก่อผลึกได้แก่ สาร อนินทรีย์ เช่น ทัลค์ ซิลิกา และแคลซิน สารอินทรีย์ เช่น เกลีโอของกรดโมโน หรือพอลิคาร์บอซิลิก ผงสี เป็นต้น และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเอไมด์ 6,6 หรือ พอลิเอทิลีนทาลาเลฟทาเลต เป็นต้น (อรอุษา, 2546)

ซีโอไลต์

1. ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (zeolite) คือสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปทรง 3 มิติ ประกอบด้วยโครงสร้างแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของซิลิเกต (SiO_4)⁻⁴ และอะลูมินेट (AlO_4)⁻⁵ ซึ่งรวมเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า ทีอะตอม (T-atom) และสามารถเกิดการจัดเรียงตัวโดยการเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ของหน่วยโครงสร้างเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่ต่างกันไป ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างแบบทรงสี่หน้าของอะลูมิโนซิลิเกต

2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์

หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ (secondary building units: SBUs) เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนของซิลิกาหรืออะลูมินา จากการศึกษาโครงสร้างของ SBUs พบว่าประกอบไปด้วยโครงสร้าง 9 แบบ ได้แก่ S4R S6R S8R D4R D6R D8R Complex 4-1 Complex 5-1 และ Complex 4-4-1

3. ประเภทของซีโอไลต์

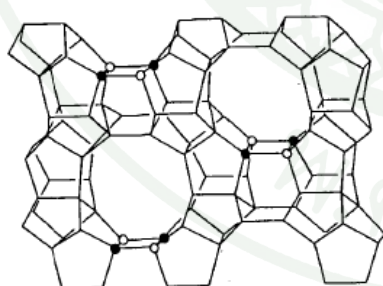
แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ โดย The International Zeolite Association (IZA) ซึ่งเป็นองค์กรนานาชาติในเครือข่ายของ IUPAC ได้แบ่งตามปัจจัยที่ต่างกันได้แก่

3.1 การแบ่งซีโอไลต์ตามอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

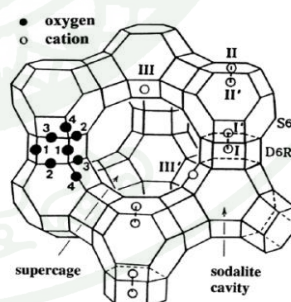
3.1.1 ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมสูง ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมมากกว่า 7 ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากการสังเคราะห์ สมบัติ ที่ได้ค่อนข้างมีความมีขั้วต่ำจึงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี แต่ดูดซับความชื้นได้น้อย และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้น้อย ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ได้แก่ ซีโอไลต์เบตา (zeolite beta) ซีเอสเอ็ม 5 (ZSM-5) ดังภาพที่ 7 (ก)

3.1.2 ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมปานกลาง ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมประมาณ 3 ถึง 7 ซึ่งมีสมบัติความมีขั้วและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนปานกลาง ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ได้แก่ เฟอริไรท์ (ferrierite) โมเดนไนท์ (mordenite)

3.1.3 ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำ ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมประมาณ 1 ถึง 3 ซึ่งมีสมบัติความมีขั้วสูงจึงดูดซับความชื้นได้ดี และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี พบมากในธรรมชาติ ได้แก่ คลิнопติโลไลต์ (clinoptilolite) ชาบาไซต์ (chabazite) และเกิดจากการสังเคราะห์ ได้แก่ ซีโอไลต์เอ (zeolite A) ซีโอไลต์วาย (zeolite Y) ดังภาพที่ 7 (ข)



(ก)



(ข)

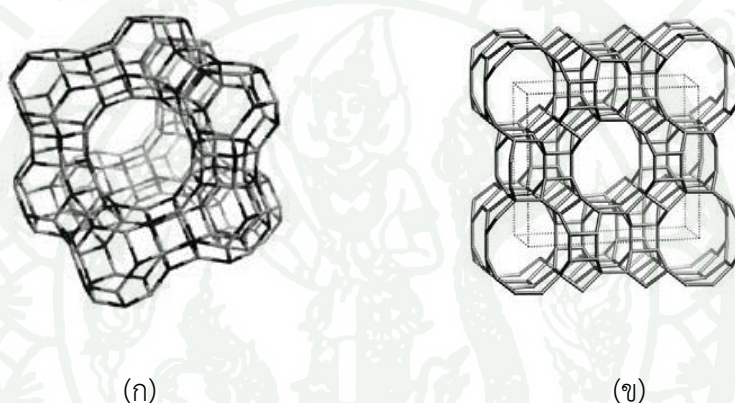
ภาพที่ 7 โครงสร้างแบบทุติยภูมิของอนุภาคซีโอไลต์ (ก) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และ (ข) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย

ที่มา: Van Der Gaag (1987); Seo *et al.* (2013)

3.2 การแบ่งซีโอไลต์ตามชนิดรูพรุน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

3.2.1 โครงสร้างแบบกรง (cage structure) เป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นโพรง โดยช่องเปิดของโพรงหรือหน้าต่าง (window) จะมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายใน (cavity) ดังภาพที่ 8 (ก)

3.2.2 โครงสร้างแบบช่อง (channel structure) เป็นโครงสร้างที่ช่องเปิดวางตัวในแนวเดียวกันและช่องเปิดนั้นมีขนาดเท่ากับขนาดโพรง จะเกิดเป็นโครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมต่อกันคล้ายท่อยาวจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งของโครงผลึก ดังภาพที่ 8 (ข)



ภาพที่ 8 โครงสร้างของซีโอไลต์ตามชนิดของรูพรุน (ก) โครงสร้างแบบกรง และ (ข) โครงสร้างแบบช่อง

ที่มา: Lobo (2003)

3.3 การแบ่งซีโอไลต์ตามขนาดหน้าต่างรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

3.3.1 รูพรุนจุลภาค (microporous) มีขนาดรูพรุน 0.2 ถึง 2 นาโนเมตร สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และแอลกอฮอล์ ได้ โดยโมเลกุลที่อยู่ในรูพรุนจุลภาคจะมีอันตรกิริยาที่แรงกับผนังรูพรุน

3.3.2 รูพรุนมัธยภาค (mesoporous) มีขนาดรูพรุน 2 ถึง 50 นาโนเมตร สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สารประกอบอะโรมาติก และเอนไซม์บางชนิดได้

3.3.3 รูพรุนมหภาค (macroporous) มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร เป็นรูพรุนที่สังเกตได้ทางกายภาพด้วยตาเปล่าและจากกล้องไมโครสโคป โดยโมเลกุลที่อยู่ในรูพรุนมหภาค จะไม่มีความแตกต่างจากโมเลกุลที่ดูดซับบนผิวชั้นนอกของวัสดุ

4. สมบัติของซีโอไลต์

4.1 สมบัติการดูดซับน้ำ (desicant) ซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติมักมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำประมาณ 1 ถึง 5 ทำให้มีความเป็นขั้วสูง ซึ่งซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงนั้นสามารถดูดซับสารที่มีขั้ว เช่น น้ำ ได้ดี เนื่องจากมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (exchangeable cation) จึงเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำของซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

4.1.1 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำย่อมมีโครงสร้างที่เป็นประจุลบ และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในปริมาณมากส่งผลให้รูพรุนมีสนามไฟฟ้าสูงในสภาวะปกติ จึงมีน้ำดูดซับในรูพรุนตลอดเวลา โดยซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุด ส่วนซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้นไป จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง

4.1.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ไอออนแต่ละชนิดจะมีความแข็งแรง ความอ่อนที่แตกต่างกันไปขึ้นกับขนาดและประจุของไอออนนั้นๆ ทำให้อันตรกิริยาของน้ำกับไอออนบวกเหล่านั้นแตกต่างกันไปด้วย โดยไอออนบวกที่มีขนาดเล็กและประจุสูงจะมีความหนาแน่นของประจุสูง ในขณะที่ไอออนบวกที่มีขนาดใหญ่และประจุต่ำจะมีความหนาแน่นของประจุต่ำ โดยน้ำจะมีอันตรกิริยากับประจุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าประจุที่มีความหนาแน่นต่ำ

4.1.3 ขนาดและลักษณะของรูพรุน ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าจะสามารถดูดซับน้ำได้ปริมาณมากกว่า แต่อันตรกิริยาของน้ำกับพื้นผิวภายในของซีโอไลต์ที่มีรูพรุนใหญ่จะเกิดได้ไม่ดี ดังนั้นการยึดติดของน้ำจึงไม่แข็งแรงเท่ากับซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

4.2 สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchangers) จากธรรมชาติของซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำ จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่เสมอ โดยน้ำที่อยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ดังสมการที่ 1



โดยไฮดรอกไซด์ไอออน ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสนี้ สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในโครงสร้างซีโอไลต์ได้เป็นอย่างดี

4.3 สมบัติการคัดแยกโมเลกุล (molecular sieves) ความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์เกิดจากแรงขับเคลื่อนทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic driving force) เพื่อให้พลังงานของระบบลดลง การดูดซับจึงเป็นกระบวนการคายความร้อนเสมอ จะมากหรือน้อยขึ้นกับอันตรกิริยาระหว่างผนังรูพรุนซีโอไลต์กับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้ โดยที่ซีโอไลต์ที่มีความมีขั้วสูง (หรือมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำ) จะสามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วสูง ส่วนซีโอไลต์ที่มีขั้วต่ำจะดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วต่ำได้ดี สมบัติการดูดซับนี้จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการคัดสรรการดูดซับ (adsorption selectivity) ของซีโอไลต์แล้วสถานะที่ใช้งานในการดูดซับก็มีผลต่อการคัดสรรในการแยกด้วยเช่นกัน

5. การสังเคราะห์ซีโอไลต์

ปัจจุบันมีการพัฒนาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์โดยไม่ใช้น้ำ การใช้สารละลายที่มีฟลูออไรด์เป็นตัวกลาง หรือการใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น โดยในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 4 ประการ ได้แก่

5.1 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม (Si/Al ratio) อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นปัจจัยที่กำหนดความเป็นไปได้ของโครงสร้างที่จะตกผลึก เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นตัวกำหนดชนิดและจำนวนหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ โดยที่อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำจะก่อให้เกิดโครงสร้างแบบ S4R D4R S6R และ D6R เป็นต้น โครงสร้างที่เกิดขึ้นจึงมักเป็นโครงสร้างแบบกรงมากกว่าโครงสร้างแบบช่อง ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมสูงจะเกิดโครงสร้างแบบ Complex 5-1 เป็นต้น ดังตารางที่

ตารางที่ 1 ช่วงของค่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ

ชนิด	โครงสร้าง	อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม
Zeolite A	LTA	1-1.25
Alpha	LTA	2-3
Ferrierite	FER	6-12
Zeolite Y	FAU	1.5-3
Gmelinite	GME	3-4
ZSM-20	FAU	3.5-5
ZSM-5	MFI	15-∞
EU-1	Novel	50-2500
SSZ-23	CHA	250-750
Beta	BEA	12-∞

ที่มา: ตะวัน (ม.ป.ป)

5.2 ค่าความเป็นเบส (basicity) การก่อผลึกของซีโอไลต์จำเป็นต้องมีตัวกลางเพื่อให้ชนิดของอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดการจัดเรียงตัวได้ และเนื่องจากอะลูมินาและซิลิกาสามารถละลายได้ในสารละลายเบส ดังนั้นการสังเคราะห์ซีโอไลต์จึงสังเคราะห์ขึ้นในสภาวะเบส โดยเบสจะสลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ซิลานอล (silanol: Si-OH) และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พันธะออกไซด์ของทั้ง Si-O-Si และ Al-O-Al แต่เนื่องจากสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาละลายน้ำได้ยาก จึงสามารถรวมตัวกันใหม่กลายเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำหนักโมเลกุลหลากหลายขึ้นกับความเข้มข้นของเบส โดยหากความเป็นเบสสูงเกินไปจะทำให้ซิลิกาละลายได้ดีจนไม่สามารถเกิดเป็นผลึกได้

5.3 สารเทมเพลต (template) การก่อผลึกของซีโอไลต์เป็นกระบวนการจัดเรียงตัวตามธรรมชาติ (self-assembly) เพื่อเพิ่มความเป็นผลึกให้กับระบบ การสังเคราะห์ซีโอไลต์จึงเริ่มจากการสร้างความไม่เป็นระเบียบให้ระบบก่อนและจำเป็นต้องมีสารที่เหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นระเบียบเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวดีขึ้น สารที่ทำหน้าที่ในการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกนี้เรียกว่า สารเทมเพลต โดย

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือสารเติมเพลทอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียม ลิเทียม แคลเซียม และโพแทสเซียม เป็นต้น และสารเติมเพลทอนินทรีย์ ได้แก่ เกลือของแอลคิลแอมโมเนียม เป็นต้น

5.4 อุณหภูมิและเวลา (temperature and time) อุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เป็นปัจจัยสำคัญทั้งในแง่ของอัตราการตกผลึกและโครงสร้างของซีโอไลต์ที่จะเกิดขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกของซีโอไลต์จะไม่สูงเกินไปเพราะจะทำให้ความดันในระบบสูงเกินไป และเกิดการเรียงตัวของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่หนาแน่นไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำจะเกิดการตกผลึกง่าย จึงไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 110 องศาเซลเซียส ส่วนเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นเป็นตัวกำหนดความสมบูรณ์ของผลึก หากเวลาที่ใช้ในการตกผลึกมากเกินไปจะมีผลทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น (ตะวัน, ม.ป.ป)

กระบวนการแปรรูปพลาสติก

1. กระบวนการอัดรีด

กระบวนการอัดรีด (extrusion process) เป็นกระบวนการแปรรูปหลักของอุตสาหกรรมพลาสติก การอัดรีดเทอร์โมพลาสติกทำได้โดยมีมอเตอร์ส่งถ่ายกำลังผ่านชุดส่งถ่ายกำลัง เพื่อขับเคลื่อนสกรูให้เกิดการหมุน จากนั้นจึงใส่เม็ดพลาสติกลงในกรวยเติม เม็ดพลาสติกที่อยู่ในร่องของสกรูจะถูกพาไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง จากนั้นพลาสติกจะถูกหลอมเหลวโดยได้รับความร้อนจากแผ่นความร้อนที่อยู่รอบๆ กระบอกบาร์เรล พลาสติกที่หลอมเหลวจะมีลักษณะเหลวหนืด และพลาสติกเหลวหนืดนี้จะถูกส่งออกไปยังแม่พิมพ์ตามที่ต้องการ เครื่องอัดรีดสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกในรูปแบบต่างๆ เช่น ผลิตเส้นใย (fiber) ท่อขนาดเล็ก (tube) ท่อนขนาดกลางและใหญ่ (pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) และฟิล์มพลาสติก (film) นอกจากนี้แล้ว ยังใช้เครื่องอัดรีดเป็นอุปกรณ์หลักในเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น การเคลือบพลาสติกลงบนวัสดุอื่น (extrusion coating process) การอัดรีดเป่า (extrusion blow molding) และการเป่าฟิล์ม (extrusion blow film process) เครื่องอัดรีดที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตและแปรรูปพลาสติกเป็นเครื่องอัดรีดแบบสกรู ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง (เจริญ, 2542)

2. ชนิดของเครื่องอัดรีด

2.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) มีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

2.1.1 กรวยเติมพลาสติก (feed hopper) อุปกรณ์ใช้เติมพลาสติกลงในกระบอกละและสกรู มีลักษณะการตกของเม็ดพลาสติกตามแรงโน้มถ่วง ภายใต้อานในของกรวยเติมจะมีความมันเพื่อลดแรงเสียดทาน และมีความชันมากพอที่จะให้พลาสติกไหลได้เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งาน กรวยเติมประกอบไปด้วยฝาปิดเพื่อใช้ในการป้องกันฝุ่นละอองและความชื้น มีหน้าต่างแก้วสำหรับสังเกตระดับของวัสดุภายในกรวยเติม ลิ้นที่ส่วนล่างของกรวยเติมสามารถเปิดและปิดให้พลาสติกไหลและหยุดได้ เครื่องเป่าอากาศร้อนใช้สำหรับไล่ความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของพลาสติกก่อนที่จะป้อนเข้าสู่สกรู และเครื่องกวหน้าทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เม็ดพลาสติก

2.1.2 ระบบเกียร์ทดและมอเตอร์ขับเคลื่อน (reduction gear and drive motor) กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนสกรูหมุนได้จากมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วของการหมุนได้ โดยมอเตอร์จะต่อกับระบบเกียร์ทดและเพลาขับ โดยทั่วไประบบเกียร์ทดและมอเตอร์จะต้องให้สกรูหมุนด้วยอัตราคงที่มีทอร์กสูงที่ทุกค่าของอัตราสกรู และไม่มีภาระการสึกของสกรูขณะทำการเปลี่ยนอัตราสกรูอย่างต่อเนื่อง

2.1.3 สกรู (extruder screw) สกรูที่ใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 25 ถึง 200 มิลลิเมตร มีความยาวเป็น 20 ถึง 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง และใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนอยู่ในช่วง 5 ถึง 500 กิโลวัตต์ หน้าที่หลักของสกรู คือรับเม็ดพลาสติกจากกรวยเติมเข้ามาในกระบอกละทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน และช่วยเพิ่มความดันของพลาสติก หลอมทำให้สามารถส่งพลาสติกหลอมไปยังส่วนอื่นๆ ของสกรูและหัวตายได้ สกรูของเครื่องอัดรีดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนป้อน (feed หรือ solid conveying section) ส่วนหลอมอัด (compression หรือ transition หรือ plasticating zone) ส่วนส่งพลาสติกหลอม (metering หรือ melt pumping section) โดยส่วนป้อนเป็นส่วนที่มีความลึกของสกรูมากที่สุด มีหน้าที่ในการดึงเม็ดพลาสติกจากกรวยเติมพลาสติกลงในกระบอกละ และมีส่วนให้ความร้อนแก่พลาสติก ทำให้เกิดการผสมของพลาสติกกับวัสดุต่างๆ เช่น สารตัวเติมและสี ส่วนหลอมอัดความลึกของร่องเกลียวจะค่อยๆ ลดลงเพื่อให้เกิดแรงดันของพลาสติกหลอม และทำให้ความหนาของชั้นพลาสติกที่ห่อหุ้มสกรูลดลงจึงเกิดการส่งผ่านความร้อนจากกระบอกละได้ดี ในช่วงนี้จะมีความร้อนและแรงเสียดทานจากสกรูสูง ทำให้พลาสติกหลอมผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และส่วนส่งพลาสติกหลอมลักษณะของสกรูจะมีความลึกของร่องเกลียวคงที่ พลาสติกหลอมในส่วนนี้จะมีความดันเพิ่มขึ้น และมีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ความดันที่เกิดขึ้นมีความสำคัญ ต่อการส่งพลาสติกไปยังหัวตาย ซึ่งความดันจะเพิ่มขึ้นจากส่วนป้อนและมีค่าสูงสุดที่ส่วนปลายของสกรู

2.1.4 กระบอก (cylinder หรือ barrel) หน้าที่ของกระบอกในเครื่องอัดรีดคือเป็นตัวบรรจุสกรู และเป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้แก่พลาสติก โดยทั่วไปกระบอกในส่วนป้อนพลาสติกที่อยู่ด้านล่างของกรวยเติม จะมีการใช้น้ำหล่อเย็นเพื่อป้องกันพลาสติกติดเป็นก้อน ส่วนกระบอกในส่วนอื่นๆ จะห่อด้วยแผ่นตัวให้ความร้อนเป็นช่วงๆ และรอบๆ กระบอกจะมีระบบพัดลมเป่าหรือระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิของพลาสติกหลอมให้ได้ตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ วัสดุที่ใช้ทำกระบอกต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการขัดสี การกัดกร่อน และความดันสูง

2.1.5 ชุดให้ความร้อนและหล่อเย็น การให้ความร้อนแก่พลาสติกที่อยู่ในกระบอก ทำได้โดยการใช้ชุดตัวให้ความร้อนไฟฟ้าหุ้มรอบกระบอก เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแต่ละช่วงได้ ตัวควบคุมอุณหภูมิจะต้องมีประสิทธิภาพในการปรับอุณหภูมิให้คงที่ ถ้าอุณหภูมิของกระบอกสูงเกินไป ตัวควบคุมจะทำให้ตัวหล่อเย็นทำงาน ซึ่งจะใช้พัดลมเป่าหรือน้ำเป็นตัวช่วยในการควบคุมอุณหภูมิ

2.1.6 แผ่นเบรกเกอร์ ตะแกรงกรอง และอะแดปเตอร์ ส่วนปลายของกระบอกเครื่องอัดรีดจะมีอะแดปเตอร์ยึดแผ่นเบรกเกอร์และกำหนดทิศทางให้พลาสติกหลอมไหลผ่านไปยังหัวดาย ซึ่งมักจะมีการติดตั้งตัวให้ความร้อน ชุดวัดอุณหภูมิและความดันของพลาสติกที่ไหลเข้าหัวดาย แผ่นเบรกเกอร์เป็นแผ่นโลหะกลมที่มีการเจาะรูจำนวนมาก ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนการไหลจากเป็นเกลียวตามสกรูเป็นการไหลแบบลามินาร์ และช่วยให้พลาสติกหลอมเกิดเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี นอกจากนี้แผ่นเบรกเกอร์ยังรองรับตะแกรงกรอง ซึ่งตัวตะแกรงกรองจะช่วยกรองไม่ให้สิ่งสกปรกและพลาสติกที่ไม่หลอมไหลผ่านหัวดาย

2.1.7 ดายของเครื่องอัดรีด (extrusion die) เป็นส่วนที่ยึดติดกับส่วนปลายกระบอกต่อจากแผ่นเบรกเกอร์และตะแกรงกรอง ดายทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลาสติกหลอมให้มีรูปร่างตามลักษณะของหัวดาย ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการ และสามารถแบ่งชนิดของหัวดายออกตามชนิดของผลิตภัณฑ์ คือ เส้นใย แผ่นพลาสติกฟิล์มพลาสติก เป็นต้น

2.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรูสองตัวอยู่ในกระบอกเดียวกัน การแบ่งเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะแบ่งตามทิศทางการหมุน และการหมุนของสกรูในลักษณะที่สั่นเกลียวของสกรูตัวหนึ่งแทรกอยู่ในร่องเกลียวของสกรูอีกตัวหนึ่ง ทิศทางการหมุนของ สกรูแบ่งออกเป็น 2 แบบ

คือการหมุนในทิศทางตรงกันข้ามและการหมุนในทิศทางเดียวกัน เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ มักใช้ใน กระบวนการแปรรูปพลาสติกใน 2 ลักษณะ คือการแปรรูปพอลิเมอร์ที่แปรรูปยาก เนื่องจากพอลิเมอร์บางกลุ่มไหลยากในขณะหลอม หรือสลายตัวง่ายที่อุณหภูมิสูง เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะช่วยส่ง พลาสติกหลอมได้เร็ว ทำให้พลาสติกอยู่ในกระบอกและตายสั้นมาก และเหลืออยู่ในกระบอกน้อย กระบวนการแปรรูปแบบพิเศษชนิดต่างๆ มักใช้ในการผสมหรือทำคอมพาวด์พลาสติกกับสารเติมแต่ง นอกจากนี้การอัดรีดที่มีแก๊สเกิดขึ้นในขณะการแปรรูป นิยมใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ในการดึงเอา แก๊สออกจากระบบ ขนาดของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ วัดจากความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของ กระบอกด้านเดียว จะอยู่ในช่วง 25 ถึง 244 มิลลิเมตร อัตราส่วนของความยาวกระบอกต่อเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (L/D) อยู่ในช่วง 39:1 ถึง 48:1

3. กระบวนการเป่าฟิล์ม

การเป่าฟิล์ม (blown film process) เป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกเหมือนกับกระบวนการอัดรีดแบบอื่นๆ การผลิตเริ่มจากการอัดรีดท่อของเทอร์โมพลาสติกหลอม โดยอัดรีดในแนวตั้งฉาก กับแนวของเครื่องอัดรีด จากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (axial direction) แล้วใช้ลมเป่าท่อกันในขณะเดียวกัน ทำให้พลาสติกหลอมพองออกในแนวรัศมี (radial direction) เกิดเป็นลูกโป่งที่มีผนังบาง (thin-walled bubble) เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งจะมีความมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตายหลายเท่า ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยหัว เป่ามีลักษณะเป็นวงแหวนอยู่ด้านนอกของหัวตาย (cooling ring) ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่ เหมาะสมและถูกจำกัดให้อยู่ในส่วนที่ช่วยพองฟิล์ม (sizing basket หรือ calibration unit) หลังจากนั้นลูกโป่งจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะหุ้มก้ามหอยและป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้ง 2 ตัว (nip rolls) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น ซึ่งจะถูกพันเป็นม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำเป็นถุงหรือ นำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ต่อไป ในกระบวนการเป่าฟิล์ม ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าคือ ความเร็ว ของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่ง อัตราการพองของลูกโป่ง คืออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าน ศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตาย ส่วนอัตราการดึง คืออัตราส่วนระหว่างความเร็ว ของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้งกับความเร็วของการอัดรีด ซึ่งความเร็วของการอัดรีดคำนวณได้จากน้ำหนัก ของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แล้วแปรเป็นปริมาตรและหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตาย เครื่อง เป่าฟิล์มประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ดังนี้

3.1 เครื่องอัดรีด (extruder) เครื่องอัดรีดที่ใช้ในการเป่าฟิล์มส่วนใหญ่เป็นเครื่องอัดรีดแบบ สกรูเดี่ยว ซึ่งสกรูแบ่งออกเป็น 3 โซนคือ โซนป้อน โซนหลอมอัด และโซนส่งความลึกของร่องสกรูใน

ส่วนของโซนส่งขึ้นกับชนิดของพลาสติกที่ใช้ หน้าที่ของเครื่องอัดรีดคือ ทำให้เม็ดพลาสติกหลอมเป็นเนื้อเดียว มีอุณหภูมิคงที่และสม่ำเสมอ และมีแรงดันมากพอที่ทำให้พอลิเมอร์ไหลผ่านหัวตายด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ ขนาดของเครื่องอัดรีดขึ้นกับขนาดความกว้างและความหนาที่ฟิล์มที่ต้องการ รวมถึงอัตราการดึงของเครื่องม้วนฟิล์ม

3.2 หัวตาย (die unit) หัวตายที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม เป็นตายแบบวงแหวนสองชั้น (annular die) ซึ่งประกอบด้วย ส่วนนอกของตาย (outer die body) และส่วนแกน (die mandrel)

3.3 ส่วนหล่อเย็นและรองรับลูกโป่ง (cooling and calibration unit) พลาสติกหลอมที่ไหลผ่านหัวตายแล้วถูกเป่าเป็นลูกโป่ง จะมีการหล่อเย็นโดยการเป่าลมเย็นผ่านวงแหวนหล่อเย็น (cooling ring) ซึ่งวงแหวนจะเป็นตัวปรับทิศทางของลมเป่าให้กระทบลูกโป่งในแนวตั้งฉาก หน่วยรองรับลูกโป่ง (calibration unit) ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับลูกโป่งจัดและปรับให้ลูกโป่งอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ใต้ฉากและอยู่ในแนวศูนย์กลางของหัวตายและเป็นตัวค้ำไม่ให้ลูกโป่งแกว่งไปมา ด้านบนของหน่วยรองรับจะมีบอร์ดรวบฟิล์มและพับฟิล์ม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อสมบัติของฟิล์มหากปรับไม่ได้จะทำให้ฟิล์มมีรอยพับยับทำให้สูญเสียสมบัติเชิงกล

3.4 ส่วนดึง (haul-off unit) ส่วนดึงทำหน้าที่ในการดึงฟิล์ม โดยมีอัตราการดึงที่เหมาะสมกับขนาดของลูกโป่ง และอัตราเร็วของสกรู

3.5 ส่วนม้วนฟิล์ม (winder) มีแกนหลักที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า สามารถใช้ท่อพลาสติกสวมแล้วยึดให้แน่นด้วยสกรู พลาสติกจะถูกรวบฟิล์มพันลงบนแกนพลาสติก แล้วหมุนเก็บอย่างต่อเนื่องที่อัตราเร็วเดียวกับการอัดรีด

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน จะเป็นพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์มมากที่สุด นอกจากกลุ่มนี้แล้วยังมีกลุ่มอื่นที่นิยมใช้ในการเป่าฟิล์ม เช่น ไนลอน พอลิคาร์บอเนต พอลิโพรพิลีน เป็นต้น ซึ่งเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเป่าฟิล์มต้องมีค่าความหนืดสูง และมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าวัสดุที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยการอัดรีดแบบธรรมดา (เจริญ, 2542; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544)

การย่อยสลายของพลาสติก

1. ปัจจัยในการย่อยพลาสติก

1.1 การย่อยสลายแบบต่อเนื่อง พลาสติกสามารถแตกตัวหรือเกิดการฉีกขาดได้ด้วยแรงทางกายภาพ โดยรอยแตกหรือรอยฉีกขาดมักเป็นจุดเริ่มของการสลายตัวของพลาสติก ระดับของรอยแตกถือว่าเป็นสิ่งสำคัญเพราะยังมีจำนวนรอยแตกมากก็จะทำให้พลาสติกมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับสารเคมีมากขึ้น การสลายตัวทางเคมีมักเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของพลาสติกกับสารเคมี เช่น น้ำ กรด หรือสารเคมีอื่นๆ

1.2 กระบวนการย่อยสลายของพลาสติก โดยขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมในแต่ละสภาวะจะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญ เช่น แก๊สออกซิเจน น้ำ แสงแดด หรือจุลินทรีย์ต่างๆ สภาพแวดล้อมในธรรมชาติอาจทำให้ประสิทธิภาพของกลไกในการเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่สภาวะ

1.3 อัตราการย่อยสลายของพลาสติก โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของพลาสติก ซึ่งพลาสติกบางชนิดจะสลายตัวเร็วเพราะส่วนประกอบเคมีของพอลิเมอร์มีความแตกต่างกัน สำหรับปัจจัยหนึ่งในการหาความสามารถในการสลายตัวของพอลิเมอร์ คือพันธะเคมีของพอลิเมอร์และโครงสร้างทางเคมี นอกจากนั้นความสามารถในการสลายตัวของพอลิเมอร์ในพลาสติกยังขึ้นอยู่กับสูตรของพลาสติก กระบวนการผลิต สารเติมแต่ง และสารเคลือบในกระบวนการผลิตพลาสติก

2. ชนิดของการสลายตัวของพลาสติก

2.1 การย่อยสลายทางแสง (photodegradation) เป็นการสลายตัวที่เกิดจากผลของแสงอาทิตย์ การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โพลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) เมื่อสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกตัวของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่เมื่อสายโซ่ในแต่ละจุดขาดไปเรื่อยๆ จะทำให้พลาสติกบอบบางและแตกสลาย แต่การย่อยสลายนี้อาจไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอม

โพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนานบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2.2 การย่อยสลายทางความร้อน (thermal degradation) พอลิเมอร์ที่ผ่านการย่อยสลายทางความร้อน จะเกิดการแตกตัวของของสายโซ่ ณ ตำแหน่งที่ได้รับพลังงานความร้อนสูง โดยมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป

2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) เป็นการสลายตัวที่เกิดจากจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย การย่อยสลายทางชีวภาพมีผลต่อการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเมทาไลน์ สำหรับกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพจะเริ่มจากพลาสติกถูกย่อยสลายเป็นเศษเล็กๆ จากการกระทำของน้ำ แสงแดด หรือแก๊สออกซิเจน จากนั้นเศษเล็กๆ เหล่านี้จะเป็นอาหารของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งพลาสติกที่ย่อยสลายได้ส่วนใหญ่เป็นพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากพันธะของเอสเตอร์ มีความไวต่อการถูกทำลายด้วยน้ำ

โดยทั่วไปการย่อยสลายทางชีวภาพมี 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

2.4 การย่อยสลายทางเคมี (chemical degradation) เป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยทั่วไปปฏิกิริยาเคมีมีหลายแบบที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการสลายตัว อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่มีผลทำให้พันธะในโครงสร้างของพอลิเมอร์ถูกทำลายลง

2.5 การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation) เป็นการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก

มีผลทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ (Stevens, 2002)

การฉายรังสีแกมมา

รังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ไม่มีประจุ ไม่มีมวล และไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง มีอำนาจทะลุทะลวงสูง โดยรังสีแกมมาเกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสของอะตอมธาตุที่เป็นไอโซโทปรังสี ตัวอย่างเช่น โคบอลต์-60 ซึ่งได้มาจากการกระตุ้นโคบอลต์-59 ในถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โคบอลต์-60 สลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีพลังงานควอนตัมประมาณ 1.173 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ และ 1.333 ล้านอิเล็กตรอน หน่วยของรังสีจะใช้หน่วยเป็นแรด (radiation absorbed dose: rad) คือ ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนในมวลสาร โดยกำหนดให้ 1 แรด เป็นปริมาณรังสีที่สารใดๆ ที่มีมวล 1 กิโลกรัม ดูดกลืนหรือรับพลังงานไว้ 10^{-2} จูล หรือ 1 rad เท่ากับ 10^{-2} J/kg หรือ เกรย์ (gray: Gy) ในระบบ SI ดังนั้น 1 Gy จึงเท่ากับ 1 J/kg หรือเท่ากับ 100 rad รังสีแกมมาเป็นรังสีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรมอาหาร ด้านการเกษตร และอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ การนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสีนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนไปสู่พอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากมาย เช่น การเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslink) การเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ (grafting) หรือเกิดการเสื่อมสลาย เป็นต้น (กฤษฎา และ ชญาภา, 2550)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุ นิยมผลิตฟิล์มเป็นวัสดุประกอบหรือวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากมีสมบัติของฟิล์มที่ดีและมีความหลากหลาย เหมาะสำหรับนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปฟิล์มคอมพอสิตพอลิโพรพิลีนจะมีการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานการซึมผ่าน และสมบัติทางความร้อนเป็นหลัก เนื่องจากสามารถบอกประสิทธิภาพของฟิล์มได้ โดยในงานวิจัยของ Ozmihci *et al.* (2001) ได้ทำการเตรียมฟิล์มคอมพอสิตพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ธรรมชาติ และศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิต โดยอนุภาคซีโอโลต์ธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งแทนการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ในงานวิจัยนี้ได้ตัดแปรพื้นผิวของอนุภาคซีโอโลต์ด้วยสารดัดแปร 3 ชนิดคือ สเตียริกแอซิด แคลเซียมสเตียเรต และพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความมีขั้วซึ่งเข้ากันได้ยากกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความไม่มีขั้ว ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซีโอโลต์บนพอลิโพรพิลีนจึงมีการดัดแปรพื้นผิวของ

อนุภาคซีโอโลต์ด้วยสารดัดแปรและทำการวิเคราะห์ผลของสารดัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) พบว่าอนุภาคซีโอโลต์ที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มีขนาดของกลุ่มก้อนบนพอลิโพรพิลีนลดลงซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 6 ไมครอน เมื่อเทียบกับอนุภาคซีโอโลต์ที่ไม่มีการดัดแปรซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 600 ไมครอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มาเป็นสารดัดแปรพื้นผิวที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากออกซิเจนอะตอมของพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุภาคซีโอโลต์ และส่งผลให้อนุภาคซีโอโลต์เกิดการกระจายตัวดีบนพอลิโพรพิลีน นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ธรรมชาติ โดยมีการผันแปรปริมาณอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 2 ถึง 4 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอนุภาคซีโอโลต์ไม่เกิดการยึดติดหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับพอลิโพรพิลีน ส่วนค่าความสามารถในการดึงยึดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคซีโอโลต์กับพอลิโพรพิลีนทำให้มีการดึงยึดได้ง่ายขึ้น จากการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์และมีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำเล็กน้อย แต่ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์มีโครงสร้างที่มีรูพรุนจึงเหมาะกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการซึมผ่านของไอน้ำสูง และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeters: DSC) พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว และปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 2 ถึง 4 โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอนุภาคซีโอโลต์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ส่วนฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันของอนุภาคซีโอโลต์กับพอลิโพรพิลีน สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analyzer: TGA) พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์มีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอโลต์ประมาณ 10 องศาเซลเซียส แสดงว่าอนุภาคซีโอโลต์ต้านทานอุณหภูมิในการสลายตัวเริ่มต้นของฟิล์มพอลิโพรพิลีน และจากค่าร้อยละของสารที่เหลืออยู่ภายหลังการทดสอบ (remaining mass) พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมด้วยอนุภาคซีโอโลต์ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละของสารที่เหลืออยู่มากที่สุด แสดงว่ามีการกระจายตัวของอนุภาค

ซีโอไลต์ที่ไม่ดีเกิดขึ้น และจากการวิเคราะห์ทางจุลศาสตร์พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ใช้พลังงานกระตุ้นในการสลายตัวน้อยกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์มีสมบัติเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีจึงสามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนได้

Biswas *et al.* (2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคซีโอไลต์บนโครงสร้างที่ต่างกันของโคพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีน-เอทิลีน (poly(propylene-co-ethylene): CoPP) และเทอร์พอลิเมอร์พอลิโพรพิลีน-เอทิลีน-1-บิวทีน (poly(propylene-co-ethylene-co-1-butene): TerPP) และศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมฟิล์มวัสดุคอมพอสิตที่มีรูพรุน จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกคอมพอสิตทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างเมื่อมีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ แต่สำหรับค่าความแข็งแรงตึงของวัสดุคอมพอสิตทั้ง 2 มีความแตกต่างเมื่อมีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ โดยพบว่าค่าความแข็งแรงตึงมีค่าลดลง เนื่องจากเมทริกซ์ของคอมพอสิตและอนุภาคซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการยึดติดที่ต่ำ แต่มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมอนุภาคซีโอไลต์ สำหรับการศึกษาช่องว่างในรูพรุนของอนุภาคซีโอไลต์ พบว่าขนาดและพื้นที่ของช่องว่างในรูพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของโครงสร้างโดยจำนวน น้ำหนัก และปริมาณเฉลี่ยของช่องว่างในรูพรุนของงานวิจัยนี้ถูกคำนวณจากการทดสอบอัตราการดัดยัดและปริมาณอนุภาคซีโอไลต์ที่เติมในฟิล์มคอมพอสิต โดยพบว่าโครงสร้างและรูปร่างของช่องว่างในรูพรุนของอนุภาคซีโอไลต์ที่ผสมในฟิล์มคอมพอสิตมีพื้นที่ผิวของเมทริกซ์เรียกว่าการเติมอนุภาคประเภทแคลไซต์อื่นๆ

Lv *et al.* (2010) ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วยไดออกไซด์ซิลิกอน โดยมีการผันแปรปริมาณอนุภาคซีโอไลต์ตั้งแต่ร้อยละ 0.3 ถึง 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อนุภาคซีโอไลต์ 5A ซึ่งมีขนาดอนุภาค 5.3 ไมครอนและมีขนาดรูพรุนประมาณ 5 อังสตรอม และอนุภาคซีโอไลต์ 13X ซึ่งมีขนาดอนุภาค 2.51 ไมครอน และมีขนาดรูพรุนประมาณ 10 อังสตรอม จากนั้นได้ทดสอบสมบัติความเป็นผลึกด้วยการทดสอบเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (x-ray diffractometer: XRD) พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ 13X ทั้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรมีผลต่อการเกิดผลึกในพอลิโพรพิลีนมากกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคซีโอไลต์ 13X ทั้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปร สำหรับสมบัติทางความร้อนทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่าปริมาณการเติมอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรเล็กน้อยในพอลิโพรพิลีนมีผลต่อการเหนี่ยวนำให้อุณหภูมิในการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร และพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ 13X มีประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดผลึกมากกว่าอนุภาคซีโอไลต์ 5A โดยอนุภาคซีโอไลต์ 13X ที่ผ่านการดัด

แปรและมีปริมาณสารที่ผสมในพอลิพรพิลีนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการเกิดผลึกสูงสุดประมาณร้อยละ 50.48 และมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงต่อนแรงดึงและค่าความแข็งแรงต่อนแรงดัดโค้งเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับอนุภาคซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านการดัดแปร พบว่ามีความแข็งแรงต่อนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นและมีค่าความแข็งแรงต่อนแรงดึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงต่อนแรงกระแทกของทั้งสองชนิดที่เติมในพอลิพรพิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.8 เท่าของพอลิพรพิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์

Jiang *et al.* (2012) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 โดยทำการสังเคราะห์ภายในขั้นตอนเดียวของวิธีการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal crystallization method) ซึ่งมีการใช้พอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเหนียวทำให้เกิดผลึก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature: T_c) ความเข้มข้นของพอลิอะคริลาไมด์ และชนิดของพอลิอะคริลาไมด์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (anionic polyacrylamide) นอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (nonionic polyacrylamide) และแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (cationic polyacrylamide) ที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของรูพรุน สำหรับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ซึ่งทำการสังเคราะห์โดยการเติมแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ 0.1 กรัม และทำการผันแปรอุณหภูมิในการเกิดผลึกที่ 120 150 และ 180 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่มีการเติมพอลิอะคริลาไมด์ และมีอุณหภูมิในการเกิดผลึกที่ 180 องศาเซลเซียส พบว่าการเกิดผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดผลึก และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของผลึก พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันการเติมแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ส่งผลให้ขนาดของผลึกมากกว่าการไม่เติมแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ สำหรับการเติมแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จะเริ่มแสดงโครงสร้างที่มีรูพรุนตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และปริมาตรของรูพรุนมีการเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดผลึก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ถูกห่อหุ้มไว้ภายในผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 กระบวนการเกิดผลึกจึงส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนของอนุภาคซีโอไลต์ขึ้น เนื่องจากแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สไนโตรเจน พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่มีการเติมและไม่มีการเติมแอนไอออนิกอะคริลาไมด์มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจุลภาค สำหรับการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของพอลิอะคริลาไมด์ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแอนไอออนิกจาก 0.1 กรัม เป็น 0.2 หรือ 0.3 กรัม ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุน

ของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ส่งผลให้ค่าการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (surface area and porosity analyzer: BET) ลดลง ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับอนุกรมในการเกิดผลึก และที่อุณหภูมิในการเกิดผลึกต่ำส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวไมโครพอร์ (micropore surface area) และปริมาตรผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่มีรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ อย่างไรก็ตาม ปริมาณทั้งหมดของผลึกมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูพรุนขนาดกลางในผลึกกลายมาเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าพื้นที่ผิวไมโครพอร์ และสำหรับการศึกษาอิทธิพลของชนิดพอลิอะคริลาไมด์ ซึ่งประกอบด้วย 3 ชนิด คือ แอน ไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ นอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ และแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ พบว่าพื้นที่ผิวของพอลิอะคริลาไมด์แต่ละชนิดแสดงประจุที่แตกต่างกัน โดยแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์แสดงประจุลบ นอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์แสดงความเป็นกลาง และแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์แสดงประจุบวก ความเป็นประจุของพอลิอะคริลาไมด์ส่งผลต่อการกระจายตัวของผลึกอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 โดยประจุลบของแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จะต้านทานการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซีโอไลต์ และช่วยให้มีการกระจายตัวของผลึกได้ดีขึ้น

นอกจากการศึกษสมบัติดังกล่าวของวัสดุคอมพอสิตพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ข้างต้น ยังพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมากและมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของวัสดุคอมพอสิต ทำให้เกิดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องขึ้น โดยงานวิจัยของ Kim and Ahn (2011) ได้ศึกษาสมบัติของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดโมเดนไนท์ (mordenite) และฟาวจาไซต์ (faujasite) ประเภทเอกซ์ (X) และวาย (Y) ต่อการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds: VOCs) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ระบบการคายความร้อนจากไมโครเวฟ ในงานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมดูดซับและการคายสาร โดยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เลือกมาทดสอบ ได้แก่ เบนซีน (benzene), โทลูอีน (toluene), ออร์โทไซลีน (ortho-xylene), เมทาไซลีน (meta-xylene), พาราไซลีน (para-xylene), เมทานอล (methanol), เอทานอล (ethanol), ไอโซโพรพานอล (iso-propanol) และเมทิลเอทิลคีโตน (methy ethylketone: MEK) และศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงกายภาพของอนุภาคซีโอไลต์ ได้แก่ ความเป็นกรด (acidity), อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม, ขนาดและลักษณะของผลึก, ขนาดและลักษณะของรูพรุน, พื้นที่ผิวสัมผัส และปริมาณรูพรุน (pore volume) จากการทดสอบการดูดซับที่สถานะแก๊สด้วยวิธี N_2 adsorption/ desorption พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทวาย มีช่วงกว้างของ ลูปฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่ชัดเจนว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดอื่น เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทวาย มีรูพรุนขนาดมัธยภาค ซึ่งมี

ขนาดเล็กกว่า 4 นาโนเมตร และมีปริมาณรูพรุนสูง และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์และโมเดนไนท์ พบว่าขนาดและลักษณะของรูพรุนส่งผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ มีลักษณะโครงสร้างเป็นโพรงซึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจน 12 อะตอม วางตัวในแนวทรงสี่หน้า (tetrahedral) และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงประมาณ 7.4 อังสตรอม ส่วนอนุภาคซีโอไลต์ชนิดโมเดนไนท์ มีลักษณะโครงสร้างเป็นโพรงซึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจน 12 อะตอมเกิดเป็นช่องเปิดตามแนวแกนเอกซ์ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6.5 ถึง 7.0 อังสตรอม ซึ่งช่องเปิดนี้อาจมีการเชื่อมต่อกันตามแนวแกนเวีย โดยประกอบไปด้วยออกซิเจนอีก 8 อะตอม และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.6 ถึง 5.7 อังสตรอม และ 3.7 ถึง 4.8 อังสตรอม ดังนั้นอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดีกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดโมเดนไนท์ เนื่องจากมีขนาดรูพรุนที่กว้างกว่า สำหรับการทดสอบการคายสารอินทรีย์ระเหยง่าย (โทลูอินและเมทิลเอทิลคีโตน) ของอนุภาคซีโอไลต์โดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเอกซ์และเวีย พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเอกซ์ มีประสิทธิภาพในการคายสารได้ดีกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเวีย เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเอกซ์มีโครงสร้างของรูพรุนขนาดมัธยภาคคล้ายทรงกระบอก (cylindrical mesopore) ขณะที่ซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเวียมีโครงสร้างของรูพรุนคล้ายขวดหมึก (ink-bottle) ช่องเปิดแคบกว่าปริมาณช่องว่างภายใน นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเอกซ์มีปริมาณน้ำในโครงสร้างมากกว่าซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ประเภทเวีย ซึ่งเป็นส่วนช่วยให้เกิดความร้อนในโมเลกุลได้มากขึ้นเมื่อสัมผัสกับรังสีไมโครเวฟจึงส่งผลให้เกิดการคายสารได้ดีกว่า

Yi *et al.* (2011) ได้ศึกษาการพัฒนาระบบการเคลื่อนย้ายแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide: SO_2) แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (nitrogen monoxide: NO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide: CO_2) ในระบบเดียวกัน โดยใช้วิธีการดูดซับด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดเวีย ซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ และซีโอไลต์ชนิดเอ และวิเคราะห์ผลด้วยกฎของเฮนรี (Henry's law) พบว่าอนุภาคซีโอไลต์มีแนวโน้มในการดูดซับแก๊สจากมากสุดไปน้อยสุด คือ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ ตามลำดับ โดยพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์แสดงความมีขั้วที่แข็งแรงจึงส่งผล มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี สำหรับพฤติกรรมทางจลศาสตร์ถูกวิเคราะห์ผลด้วยกราฟแบบ breakthrough curve และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ผลของการเคลื่อนย้ายสารและการแพร่ผ่านด้วยสมการเส้นตรง จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถบ่งบอกกลไกการแพร่ผ่านสารในรูพรุนจุลภาคได้ โดยซีโอไลต์ชนิดเวียมีความต้านทานต่ำสุดในการเคลื่อนย้ายสาร เนื่องจากมีขนาดรูพรุนและการกระจายตัวที่สูง ในขณะที่ซีโอไลต์ชนิดเอมีผลต่อการขัดขวางการแพร่ผ่านมากที่สุด

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับร่วม (co-adsorption) ของแก๊สทั้ง 3 ชนิด พบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงความชันของกราฟ breakthrough curve มากกว่าแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ เนื่องจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์จะเกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไนโตรเจนและคาร์บอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาไม่สามารถถูกตรวจสอบได้ในอนุภาคซีโอไลต์

Zhao *et al.* (1996) ได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์โดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์ 60 ที่ปริมาณรังสีเท่ากับ 10 กิโลเกรย์ พบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ เมื่อผ่านการฉายรังสีแล้วจะทำให้อุณหภูมิในการสลายตัว (degradation temperature: T_d) ลดลงประมาณ 2.5 เท่าของพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ และยังพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์หรือพลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าอนุภาคซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์มีตำแหน่งกัมมันต์ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามีความเสถียรทางความร้อน และมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูง ดังนั้นเมื่อพอลิโพรพิลีนผ่านการฉายรังสีจะเกิดการขาดของสายโซ่ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนเข้าจับที่ตำแหน่งกัมมันต์ของอนุภาคซีโอไลต์ได้ดีขึ้น และจากการศึกษาชนิดอนุภาคซีโอไลต์ที่เติมลงในพอลิโพรพิลีนแล้วผ่านการฉายรังสีพบว่าอนุภาคซีโอไลต์วายที่มีประจุบวกเป็นโซเดียม และโมเดนไนท์ที่มีประจุบวกเป็นโซเดียมเช่นกันจะทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนลดลง ในขณะที่ซีโอไลต์แอลที่มีประจุบวกเป็นโพแทสเซียม และเพอร์เรียไรท์ที่มีประจุบวกเป็นโพแทสเซียมเช่นกันจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการสลายตัว ส่วนซีโอไลต์วายที่มีประจุบวกเป็นไฮโดรเจน พบว่ามีประสิทธิภาพเป็นตัวเร่งได้ดีที่สุด เนื่องประจุบวกของไฮโดรเจนสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนของประจุบวกได้ดี

Dawood and Miura (2001) ได้ศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาบนพอลิโพรพิลีนโดยใช้อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นตัวเร่งไพโรไลซิสในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 325 ถึง 375 องศาเซลเซียส พบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสสูงขึ้นเมื่อพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ถูกฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้ม 10 กิโลเกรย์ โดยปฏิกิริยาที่สูงนี้มีส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการเผาไหม้ลดลงและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำเพาะของไฮโดรคาร์บอน C_7 ถึง C_{10} มากขึ้น จากผลดังกล่าวพบว่าการฉายรังสีจะช่วยเพิ่มอัตราการการแตกตัวของโมเลกุลคูให้เร็วขึ้น โดยเกิดจากการเหนี่ยวนำของพันธะไม่อิ่มตัวบนสายโซ่พอลิโพรพิลีนแล้วเกิดเป็นฟรีเรดิเคิลทำให้เกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น

Chiu (2009) ได้ศึกษาผลของอนุภาคซีโอไลต์ต่อสมบัติการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 325 และ 500 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซิลิกาอะลูมินา และอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 พบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์มีร้อยละการสลายตัวเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 97 เมื่อเทียบกับการสลายตัวทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และนอกจากนั้นยังส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการสลายตัว โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว แก๊ส และสิ่งตกค้างของแข็งมีความแตกต่างกันระหว่างการสลายตัวทางความร้อนปกติและการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการสลายตัวโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายมีร้อยละการสลายตัวมากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ และใช้ความร้อนในการสลายตัวต่ำกว่า 375 องศาเซลเซียส โดยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายมีประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 325 ถึง 375 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์ผลผลิต ผลที่ได้จากการสลายตัวด้วยเครื่องไพโรไลเซอร์แก๊สโครมาโตกราฟฟี (pyrolyzer GC/MS) โดยได้นำมา ใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของแก๊ส ซึ่งไม่เพียงแต่แสดงปริมาณแก๊สที่ลดลงแต่ยังสามารถแสดงการลดลงของจำนวนคาร์บอนเมื่อพอลิโพรพิลีนถูกสลายตัวด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย

Lopez *et al.* (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 และโคลนแดง (red mud) ต่อการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) ของขยะพลาสติก สำหรับลักษณะทางกายของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด พบว่าอนุภาคซีโอไลต์แสดงความเป็นกรดอ่อนและกรดแก่ และมีพื้นที่ผิวของอนุภาคที่สูงประมาณ $412.0 \text{ เมตร}^2 \text{ กรัม}^{-1}$ ในขณะที่โคลนแดงแสดงความเป็นกรดน้อยกว่า และมีพื้นที่ผิวของอนุภาคประมาณ $27.49 \text{ เมตร}^2 \text{ กรัม}^{-1}$ จากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 440 และ 500 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องพบว่าซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 มีประสิทธิภาพที่ดีในการเกิดลักษณะและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไพโรไลซิส และเหนี่ยวนำให้เกิดผลิตผลเป็นแก๊สและของเหลวในสัดส่วนที่ดีของทั้ง 2 อุณหภูมิในใช้ในการทดสอบ ซึ่งพบปริมาณสารอะโรมาติกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับโคลนแดงพบว่าต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ในการเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิส ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้โคลนแดงเป็นตัวเร่งไม่มีความแตกต่างกับการไม่ใช้ตัวเร่ง แต่ในขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 องศาเซลเซียส พบปริมาณแก๊สและสัดส่วนของสารอะโรมาติกในของเหลวเพิ่มมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

1.1 เม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP resin) (EL-PRO™ P600F, SCG Chemicals Co., Ltd., ประเทศไทย)

1.2 ผงอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย ขนาดประมาณ 150 ไมครอน (zeolite Y) (Sigma-Aldrich Co. LLC., ประเทศเยอรมนี)

1.3 ผงอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ขนาดประมาณ 150 ไมครอน (zeolite ZSM-5) (Acros Organics, ประเทศ สหรัฐอเมริกา)

1.4 โพลีเอทิลีนไกลคอล 4000 (polyethylene glycol 4000: PEG 4000) (Ajax Finechem Pty., Ltd., ประเทศนิวซีแลนด์)

1.5 เอทานอล (ethanol absolute) (Carlo Erba Reagenti, ประเทศอิตาลี)

2. เครื่องมือ

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

2.2 เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) (Model C-MAG HS 7, IKA, ประเทศเยอรมนี)

2.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) (Model WD-11B, Han Yong Scientific Equipment Co., Ltd., ประเทศเกาหลีใต้)

2.4 ตู้อบลมร้อน (binder) (Model ED53/E2, Scientific Promotion Co., Ltd., ประเทศไทย)

2.5 ตู้อบลมร้อนแบบสุญญากาศ (vacuum drying ovens) (VD23, Binder, ประเทศเยอรมนี)

2.6 เครื่องควบคุมความชื้น (dessicator) (Model DRY-300-2, Excellent Dry Technical Co., Ltd., ประเทศไต้หวัน)

2.7 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) (CTE-D20L800, Chareon, ประเทศไทย)

2.8 เครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extruder) (LF-400-COEX, Lab Tech Engineering, ประเทศไทย)

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

2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) (XL30 SEM, FEI company, ประเทศเนเธอร์แลนด์)

2.11 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (x-ray diffractometer: XRD) (Bruker AXS advanced x-ray solutions GmbH, ประเทศเยอรมัน)

2.12 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer: FTIR) (Model Perkin Elmer system 2000, Perkin Elmer, Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.13 เครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชชีน (instron universal testing machine) (model 5965, Instron Co., Ltd., ประเทศไทย)

2.14 เครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลเซอร์ (dynamic mechanical analyzer) (Gabo Qualimeter testanlagen GmbH, ประเทศเยอรมนี)

2.15 เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊ส (oxygen permeation analyzer) (Model 8500, Illinois instruments, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.16 เครื่องฉายรังสีแกมมา (gamma irradiator) (Gamma cell model GC 220, Canada Co., Ltd., ประเทศแคนาดา)

วิธีการ

1. การดัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 โดยใช้สารเชื่อมประสานพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

การดัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและซีเอสเอ็ม 5 โดยใช้สารเชื่อมประสานพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เริ่มจากนำสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก มาทำการปรับปริมาตรให้มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ปริมาณ 10 กรัม ในสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ

ละ 50 โดยน้ำหนัก และทำการดัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์ โดยมีอัตราส่วนระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ต่อสารละลายเอทานอลที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เท่ากับ 1:0.3 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ ดังตารางที่ 2 จากนั้นนำสารผสมดังกล่าวมาอบด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 300 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Ozmihci *et al.* 2001)

ตารางที่ 2 การดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ต่อสารละลายเอทานอลที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เท่ากับ 1:0.3 (กรัม)

สูตร	อนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย (กรัม)	อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 (กรัม)	สารละลายเอทานอลที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (มิลลิลิตร)
1	20	-	6
2	60	-	18
3	100	-	30
4	-	20	6
5	-	60	18
6	-	100	30

2. การทดสอบสมบัติของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5

2.1 วิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน 0.02 องศา

2.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทำการศึกษาที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1}

3. การขึ้นรูปฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

การขึ้นรูปฟิล์มพอลิโพรพิลีน ทำได้โดยการนำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน และอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรมาทำการผ่นแปรปริมาณอนุภาคซีโอไลต์ที่ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 3 และขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติก (pellet) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่โดยใช้ความเร็วของสกรูเท่ากับ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดที่มีการดัดแปรและไม่มีการดัดแปรด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม โดยใช้ความเร็วของสกรูเท่ากับ 80 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยฟิล์มทุกตัวอย่างมีความหนาเท่ากับ 30 ± 2 ไมครอน

ตารางที่ 3 การผ่นแปรอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ในเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน)

ตัวอย่าง	พอลิโพรพิลีน	ซีโอไลต์วาย	ซีโอไลต์วายที่ผ่านการดัดแปร	ซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5	ซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร
P1	100	-	-	-	-
P2	100	1	-	-	-
P3	100	3	-	-	-
P4	100	5	-	-	-
P5	100	-	1	-	-
P6	100	-	3	-	-
P7	100	-	5	-	-
P8	100	-	-	1	-
P9	100	-	-	3	-
P10	100	-	-	5	-
P11	100	-	-	-	1

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ตัวอย่าง	พอลิโพรพิลีน	ซีโอไลต์วาย	ซีโอไลต์วาย ที่ผ่านการดัดแปร	ซีโอไลต์ ซีเอสเอ็ม 5	ซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร
P12	100	-	-	-	3
P13	100	-	-	-	5

หมายเหตุ phr (parts per hundred resin) คือ ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน

ฟิล์มที่เตรียมได้จากกระบวนการอัดรีดแบบเป่าจะใช้สัญลักษณ์แทนดังนี้

ฟิล์ม PP	แทนด้วยสัญลักษณ์ P1
ฟิล์ม PP/zeolite Y 1 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P2
ฟิล์ม PP/zeolite Y3 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P3
ฟิล์ม PP/zeolite Y 5 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P4
ฟิล์ม PP/PEG4000/zeolite Y 1 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P5
ฟิล์ม PP/PEG4000/zeolite Y 3phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P6
ฟิล์ม PP/PEG4000/zeolite Y 5 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P7
ฟิล์ม PP/zeolite ZSM-5 1 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P8
ฟิล์ม PP/zeolite ZSM-5 3 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P9
ฟิล์ม PP/zeolite ZSM-5 5 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P10
ฟิล์ม PP/PEG4000/zeolite ZSM-5 1 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P11
ฟิล์ม PP/PEG4000/zeolite ZSM-5 3 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P12
ฟิล์ม PP/PEG4000/zeolite ZSM-5 5 phr	แทนด้วยสัญลักษณ์ P13

4. การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

4.1 วิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

4.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความละเอียด 4 ต่อเซนติเมตร โดยทำการศึกษาที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1}

4.3 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

4.4 วิเคราะห์สมบัติทางกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติง แมคชีน โดยทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ร้อยละการยืดตัว (% elongation) และยังสัมมอดูลัส (Young's modulus) ของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ตามมาตรฐาน ASTM D882

4.5 วิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลเซอร์ โดยทำการทดสอบมอดูลัสสะสม (storage modulus) และ $\tan \delta$ (tan delta) ตามมาตรฐาน ASTM 4065

4.6 วิเคราะห์สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สตามมาตรฐาน ASTM D3985 และวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ โดยใช้วิธี Cup Method ตามมาตรฐาน ASTM E96

5. การทดสอบหาความสามารถในการย่อยสลายได้ของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมและมีการผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา

นำฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมและที่มีการผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มาผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 และทำการวิเคราะห์ผลของความสามารถในการย่อยสลายได้ดังนี้

ตารางที่ 4 การผันแปรปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมและมีการผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน)

ตัวอย่าง	พอลิโพรพิลีน	ซีโอไลต์วาย ที่ผ่านการตัดแปร	ซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปร	ปริมาณความเข้ม ของรังสี (kGy)
D1	100	-	-	-
D2	100	-	-	10
D3	100	-	-	50
D4	100	-	-	100
D5	100	3	-	-
D6	100	3	-	10
D7	100	3	-	50
D8	100	3	-	100
D9	100	-	3	-
D10	100	-	3	10
D11	100	-	3	50
D12	100	-	3	100

ฟิล์มที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาจะใช้สัญลักษณ์แทนดังนี้

ฟิล์ม PP	แทนด้วยสัญลักษณ์ D1
ฟิล์ม PP 10 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D2
ฟิล์ม PP 50 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D3
ฟิล์ม PP 100 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D4
ฟิล์ม PP/PEG4000/ Y	แทนด้วยสัญลักษณ์ D5
ฟิล์ม PP/PEG4000/ Y 10 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D6
ฟิล์ม PP/PEG4000/ Y 50 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D7
ฟิล์ม PP/PEG4000/ Y 100 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D8
ฟิล์ม PP/PEG4000/ZSM-5	แทนด้วยสัญลักษณ์ D9
ฟิล์ม PP/PEG4000/ZSM-5 10 kGy	แทนด้วยสัญลักษณ์ D10

ฟิล์ม PP/PEG4000/ZSM-5 50 kGy

แทนด้วยสัญลักษณ์ D11

ฟิล์ม PP/PEG4000/ZSM-5 100 kGy

แทนด้วยสัญลักษณ์ D12

5.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความละเอียด 4 ต่อเซนติเมตร โดยทำการศึกษาที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 500 cm^{-1}

5.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยเครื่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

5.3 วิเคราะห์สมบัติทางกลของฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชชีน โดยทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และยังสัมมอดูลัสตามมาตรฐาน ASTM D882

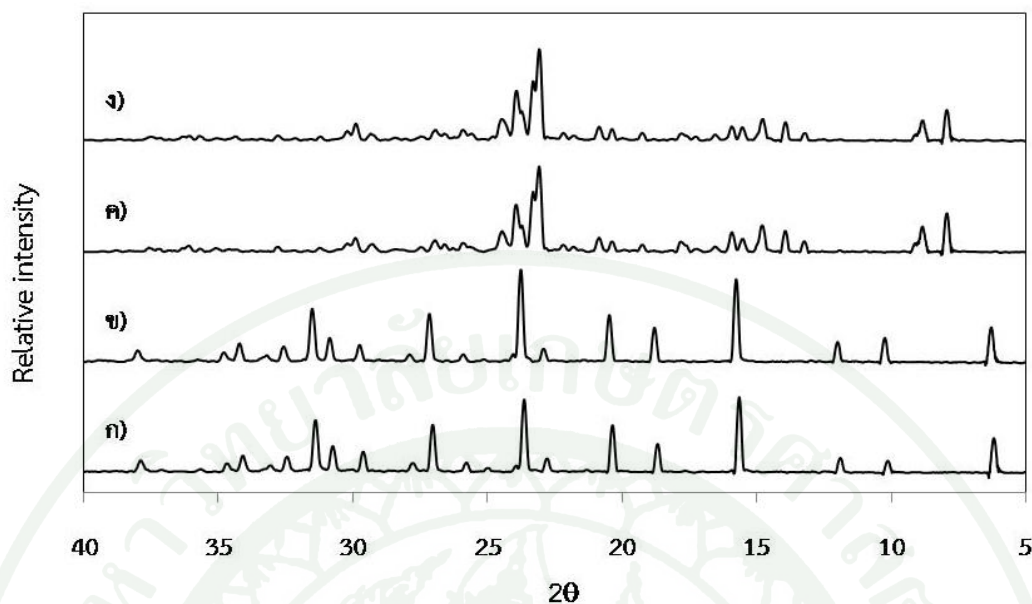
5.4 วิเคราะห์สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำของฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สตามมาตรฐาน ASTM D3985 และวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ โดยใช้วิธี Cup Method ตามมาตรฐาน ASTM E96

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติของอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1.1 ความเป็นผลึกของอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

การใช้งานของพอลิเมอร์ในปัจจุบัน อาจยังมีข้อจำกัดด้านสมบัติต่างๆ อยู่มาก จึงมีการพัฒนานำพอลิเมอร์มาผสมกับสารอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มสมบัติที่ดีและมีความคงทนต่อการใช้งานหรือช่วยให้กระบวนการผลิตให้เกิดได้ง่ายขึ้น โดยสารที่ผสมลงไปเรียกว่า สารเติมแต่ง โดยทั่วไปแล้วสารเติมแต่งควรมีสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความมีประสิทธิภาพต่อหน้าที่มีความเสถียรภายใต้สภาวะการขึ้นรูปและการใช้งาน ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดกลิ่นหรือรส มีราคาถูก และไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป (อรอุษา, 2546) สำหรับอนุภาคซีโอโลต์ ในปัจจุบันมีการนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์มีให้เลือกใช้หลายชนิดและมีสมบัติที่หลากหลาย ได้แก่ สมบัติการดูดซับ โดยอนุภาคซีโอโลต์ที่พบตามธรรมชาติจะมีสมบัติความมีขั้ว และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นยังมีสมบัติการคัดแยกโมเลกุลและความสามารถในการดูดซับ โดยอนุภาคซีโอโลต์ที่มีความมีขั้วสูง (หรือมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียมต่ำ) จะสามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วสูง ส่วนซีโอโลต์ที่มีขั้วต่ำจะดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วต่ำได้ดี สมบัติการดูดซับนี้จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการคัดสรรการดูดซับของซีโอโลต์ที่สภาวะการใช้งาน (ตะวัน, ม.ป.ป) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้อนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 มาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีความแตกต่างกันที่อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม โดยอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวามีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ ส่วนอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง โดยก่อนที่จะนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิโพรพิลีน ได้มีการวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึกของอนุภาคซีโอโลต์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ที่ 2θ เท่ากับ 5 ถึง 40 ที่อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 9



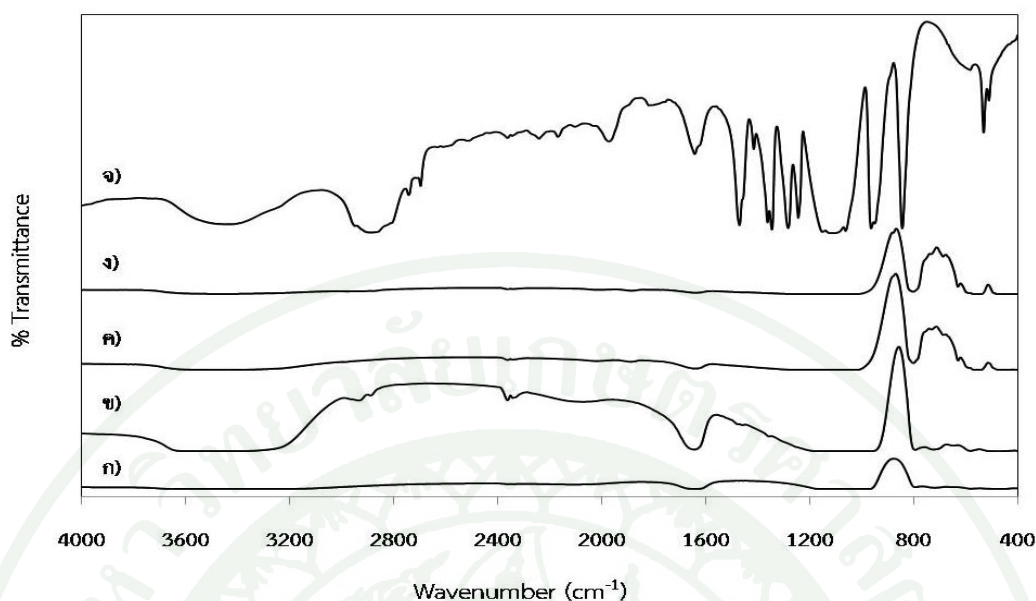
ภาพที่ 9 พิกัดตำแหน่งมุม 2 เซต้าของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ก) Zeolite Y ข) Zeolite Y/PEG 4000 ค) Zeolite ZSM-5 และ ง) Zeolite ZSM-5/PEG 4000

จากการทดสอบสมบัติความเป็นผลึก ดังภาพที่ 9 พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เกิดพิกัดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2 เซต้า (2θ) เท่ากับ 6.1° 10° 15.6° 18.6° 20.3° 23.6° 27.0° 31.3° และ 37.9° ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างแบบฟาวจาไซต์ (FAU) โดยประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมี คือโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (sodium aluminium silicate hydrate: $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_{4.5}\text{O}_{13} \cdot x\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีรูปทรงแบบคิวบิก (cubic, a เท่ากับ $24.7 \text{ \AA}$) (Htun *et al.*, 2012) ส่วนอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เกิดพิกัดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2 เซต้า เท่ากับ 7.9° 8.8° 14.7° 23.1° 23.9° 24.1° และ 29.8° ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างแบบเอ็มเอฟไอ (MFI) โดยประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมี คืออะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminium silicate: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 54\text{SiO}_2$) ซึ่งมีรูปทรงแบบออร์ทอรอมบิก (orthorhombic, a เท่ากับ $20.1 \text{ \AA}$) (Ren *et al.*, 2010) สำหรับการเปรียบเทียบความเป็นผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเมื่อผ่านการดัดแปรมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มพิกัดที่ตำแหน่ง 2 เซต้า เท่ากับ 10° 15.6° และ 20.3° ซึ่งเมื่อเทียบกับอนุภาคซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 พบว่าค่าความเข้มพิกัดที่ตำแหน่งดังกล่าวไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ และมี

ผลทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นของประจุ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ได้ง่ายและส่งผลต่อความเป็นผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย โดยโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์วายเป็นแบบฟาวจาไซต์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นมุมหกเหลี่ยม (hexagonal) และมีโครงสร้างของรูพรุนที่มีลักษณะพื้นที่ผิวหน้าตัดเล็กกว่าช่องว่างภายในโมเลกุล (Seo *et al.*, 2013) จึงมีผลทำให้อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกและมีความเป็นระเบียบ เนื่องมาจากพื้นที่ผิวของโครงสร้างมีลักษณะเป็นเหลี่ยมจึงง่ายต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกขึ้นมากกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่มีโครงสร้างเป็นแบบทรงกลม (Ren *et al.*, 2011)

1.2 หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

สารเชื่อมประสานถูกนำมาใช้งานในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างสารเติมแต่งและเมทริกซ์ของพอลิเมอร์โดยปรับปรุงความสามารถในการยึดติดและความเข้ากันได้ โดยทั่วไปแล้วสารเติมแต่งที่นำมาใช้งาน เช่น สารอนินทรีย์ เคลย์ หรือสารประกอบซิลิเกต จะมีความเข้ากันได้น้อยกับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งสารเติมแต่งนี้จะเกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อน (aggregation) และเป็นอุปสรรคต่อการปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมพอสิต จึงมีการดัดแปรพื้นผิวของเติมแต่งเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาและความเข้ากันได้ของสารเติมแต่งและเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ดังนั้นสารเติมแต่งที่กระจายตัวได้ดีและเป็นเนื้อเดียวกันกับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีในวัสดุคอมพอสิต (Biswas *et al.*, 2004) สำหรับสารเติมแต่งจำพวกอนุภาคซีโอไลต์ พบว่าอนุภาคซีโอไลต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีสมบัติความมีขั้วซึ่งเข้ากันได้ยากกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงมีการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคซีโอไลต์ด้วยสารดัดแปร จากงานวิจัยของ Ozmihci *et al.* (2001) ได้ใช้สารดัดแปร 3 ชนิด คือ สเตียริกแอซิด แคลเซียมสเตียเรต และพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มาดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์ที่ผสมในพอลิโพรพิลีน พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มีขนาดของกลุ่มก้อนบนพอลิโพรพิลีนลดลง เนื่องจากออกซิเจนอะตอมของพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุภาคซีโอไลต์ และส่งผลให้อนุภาคซีโอไลต์เกิดการกระจายตัวดีบนเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มาดัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ก่อนที่จะนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิโพรพิลีนที่จะเตรียมในขั้นตอนต่อไป โดยได้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความละเอียด 4 ต่อเซนติเมตร โดยทำการศึกษาในช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ดังภาพที่ 10



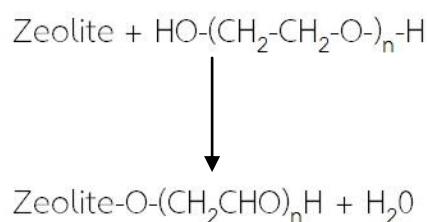
ภาพที่ 10 FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ก) Zeolite Y ข) Zeolite Y/PEG 4000 ค) Zeolite ZSM-5 ง) Zeolite ZSM-5/PEG 4000 และ จ) PEG 4000

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร พบตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่งดังนี้ ตำแหน่งเลขคลื่น 3700 ถึง 3600 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ซิลานอล ซึ่งพบในโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกทั้งซีโอไลต์ชนิดวายและซีเอสเอ็ม 5 (Li *et al.*, 2005) ตำแหน่งเลขคลื่น 2930 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ O-CH_2 ซึ่งเกิดจากอะตอมของออกซิเจนในพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำเข้าปฏิกิริยากับอนุภาคซีโอไลต์ ตำแหน่งเลขคลื่น 1620 cm^{-1} แสดงการยืดหดและการงอของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชันของความชื้น (Ozmihci *et al.*, 2001) ตำแหน่งเลขคลื่น 1250 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างภายนอกในอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย ตำแหน่งเลขคลื่น 775 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบสมมาตรของโครงสร้างเตตระฮีดรอลภายในอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย (Yin *et al.*, 2012) และตำแหน่งเลขคลื่น 550 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 (Zhang *et al.*, 2013) ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตำแหน่งเลขคลื่นของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะตัว
หมู่ซิลานอลในโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ (Si-OH terminal silanol groups)	3700 ถึง 3600	ซีโอไลต์
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของหมู่ O-CH_2 (OCH_2 asymmetric stretching)	2930	ซีโอไลต์ดัดแปร
การยืดหดและการงอของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching and bending)	1620	ความชื้น
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้าง ภายนอกในอนุภาคซีโอไลต์ (T-O external asymmetrical stretching)	1250	ซีโอไลต์ชนิดววาย
การยืดหดแบบสมมาตรของโครงสร้าง อีตอลในอนุภาคซีโอไลต์ (T-O symmetric stretching)	775	ซีโอไลต์ชนิดววาย
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้าง อนุภาคซีโอไลต์ (T-O asymmetric stretching)	550	ซีโอไลต์ชนิด ซีเอสเอ็ม 5

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นสำหรับการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย มีตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2930 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงการดัดแปรพื้นผิวชัดเจนกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นของประจุสูงกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ได้ง่ายกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 โดยมีกลไกการดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคซีโอไลต์ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ดังภาพที่ 11 จากผลดังกล่าวนี้ทำให้อนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายจากที่มีสมบัติความมีขั้วและความชอบน้ำ (hydrophilic) กลายเป็นมีสมบัติความมีขั้วลดลงและไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคซีโอไลต์สามารถกระจายตัวและมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของพอลิพรพิลีนมากขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยให้สมบัติของวัสดุคอมพอสิตมีสมบัติที่ดีมากขึ้น



ภาพที่ 11 กลไกการดัดแปรพื้นผิวอนุภาคซีโอไลต์ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

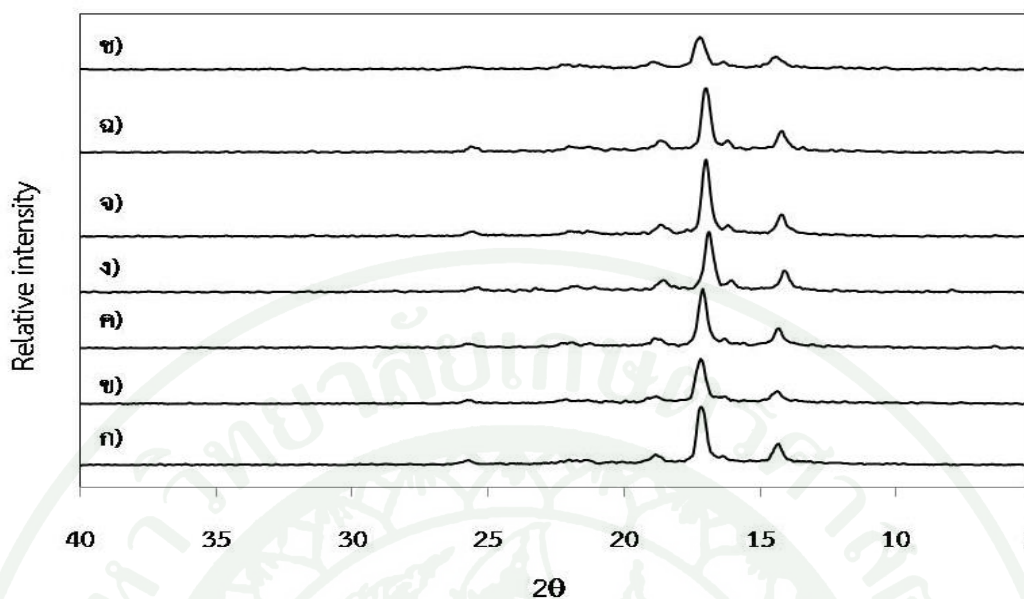
ที่มา: Ozmihci *et al.* (2001)

2. สมบัติของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

สำหรับการเตรียมฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยมีปริมาณการผันแปรที่ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการคอมปาวด์เม็ดพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคซีโอไลต์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบประมาณ 65 รอบต่อนาที จากนั้นทำการตัดเม็ดคอมปาวด์และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบประมาณ 80 รอบต่อนาที ฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปมีความหนาเฉลี่ย 30 ± 2 ไมครอน โดยฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ที่เตรียมได้นั้นจะถูกทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ สมบัติความเป็นผลึก สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊ส ออกซิเจนและไอน้ำ

2.1 ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ที่ 2θ เท่ากับ 5 ถึง 40 ที่อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 12

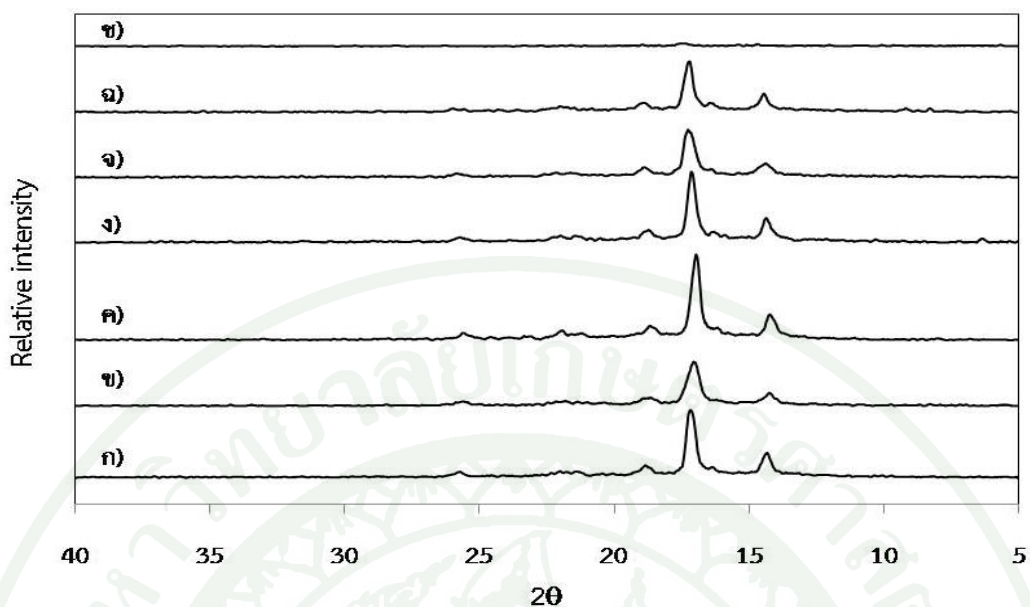


ภาพที่ 12 พิกัดตำแหน่งมุม 2 เซต้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ก) P1 ข) P2 ค) P3 ง) P4 จ) P5 ฉ) P6 และ ช) P7

พิกัดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนเกิดพิกัดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2 เซต้า (2θ) เท่ากับ 14.1° 17.1° 18.4° และ 25.7° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบแอลฟาของพอลิโพรพิลีน และนอกจากนั้นยังพบพิกัดเล็กๆ ที่ตำแหน่ง 2 เซต้า เท่ากับ 16.0° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบเบต้าของพอลิโพรพิลีน จากพิกัดดังกล่าวนี้บ่งบอกได้ว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยรูปผลึกแบบแอลฟามากกว่าแบบเบต้า (Lv *et al.*, 2010) และจากผลของการผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรมีผลต่อค่าความเข้มของพิกัด โดยพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความเข้มของพิกัดที่ตำแหน่ง 2 เซต้า เท่ากับ 18.4° มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้น้อย ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย มีสมบัติความมีขั้วและเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจึงเกิดการรวมกลุ่มกันได้ง่าย ส่วนเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนมีสมบัติความไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงมีผลทำให้อนุภาคซีโอไลต์กระจายตัวได้ไม่ดี และส่งผลต่อการขัดขวางการจัดเรียงเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน (Biswas *et al.*, 2003) สำหรับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายที่ผ่านการดัดแปร พบว่าค่าความเข้มของพิกัดที่ตำแหน่ง 2 เซต้า เท่ากับ 18.4° มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ

ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นไม่ผ่านการดัดแปรเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และมีสมบัติความมีขั้วลดลง ส่งผลทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการผันแปร อนุภาคซีโอไลต์พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2 เซต่า เท่ากับ 18.4° น้อยที่สุด เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีผลต่อการขัดขวางการเกิดผลึกแบบแอลฟาของพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2 เซต่า เท่ากับ 16.0° พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นไม่ผ่านการดัดแปรทำให้ค่าความเข้มของพีคนี้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดผลึกแบบเบต้าของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก โดยอนุภาคของซีโอไลต์ชนิดวายเป็นมีโครงสร้างแบบฟาวจาไซต์ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นมุมหกเหลี่ยม (Seo *et al.*, 2013) ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและมีผลต่อการเกิดผลึกแบบเบต้าในพอลิโพรพิลีน (Jiang *et al.*, 2012; Leng *et al.*, 2013)

ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ดังภาพที่ 13 พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2 เซต่า เท่ากับ 18.4° เพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีสมบัติความมีขั้วต่ำกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นจึงมีผลต่อการเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อมีการดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 พบว่าค่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2 เซต่า เท่ากับ 18.4° ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และเกิดพันธะ O-CH_2 ซึ่งมีความชอบน้ำหรือมีสมบัติความมีขั้วเพิ่มขึ้น (Ozmihci *et al.*, 2001) และนอกจากนั้นอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีความหนาแน่นของประจุต่ำจึงเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้มากกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและมีผลต่อการขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน



ภาพที่ 13 พิกแสดงตำแหน่งมุม 2 เซตของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ก) P1 ข) P8 ค) P9 ง) P10 จ) P11 ฉ) P12 และ ข) P13

ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร ดังตารางที่ 6 มีค่าเท่ากับ 61.24 63.83 62.00 61.71 66.22 60.51 59.60 65.56 54.96 63.70 58.44 57.27 และหาค่าไม่ได้ ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรมีแนวโน้มของค่าความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการผันแปรพบว่ามีค่าความเป็นผลึกลดลงตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายมีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมทำให้มีความเป็นระเบียบและเกิดผลึกได้ง่าย และอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดี ลดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในฟิล์มพอลิโพรพิลีน สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรมีแนวโน้มของค่าความเป็นผลึกลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีโครงสร้างผลึกแบบทรงกลมและมีความหนาแน่นของประจุต่ำจึงมีพฤติกรรมแบบเกาะกลุ่มกันเอง จากพฤติกรรมนี้ทำให้ผลึกของซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีการเรียงตัวทุกทิศทาง มีความเป็นระเบียบต่ำและมีขนาดใหญ่ จึงส่งผลต่อการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในฟิล์มพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 6 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

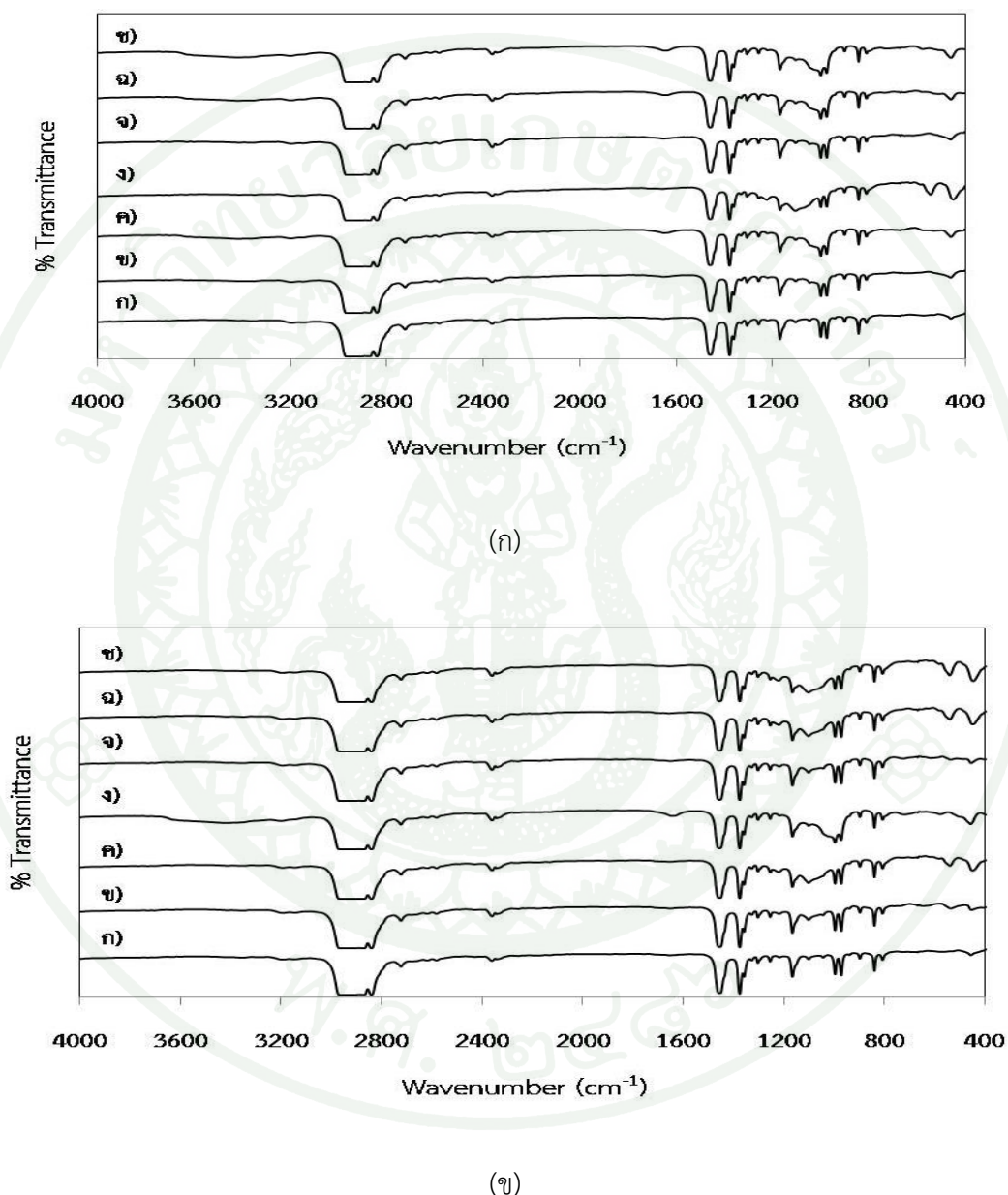
ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก		ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก	
	ความเป็นผลึก	ความเป็นอสัณฐาน		ความเป็นผลึก	ความเป็นอสัณฐาน
P1	61.24	38.76	P1	61.24	38.76
P2	63.83	36.17	P8	65.56	34.44
P3	62.00	38.00	P9	54.96	45.04
P4	61.71	38.29	P10	63.70	36.30
P5	66.22	33.78	P11	58.44	41.56
P6	60.51	39.49	P12	57.27	42.73
P7	59.60	40.40	P13	NA	NA

หมายเหตุ NA คือ ไม่สามารถคำนวณค่าความเป็นผลึก

2.2 หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร ดังภาพที่ 14 (ก) และ 14 (ข) พบเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่งดังนี้ ตำแหน่งเลขคลื่น 3700 ถึง 3600 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ซิลานอล ซึ่งพบในโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกทั้งซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 (Li *et al.*, 2005) ตำแหน่งเลขคลื่น 2930 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ O-CH_2 ซึ่งเกิดจากอะตอมของออกซิเจนในพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคซีโอไลต์ (Ozmihci *et al.*, 2001) ตำแหน่งเลขคลื่น 2920 และ 2850 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะไฮดรอกซิลในพอลิโพรพิลีน (Dikobe and Luyt, 2009) ตำแหน่งเลขคลื่น 1620 cm^{-1} แสดงการยืดหดและการงอของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชันของความชื้น ตำแหน่งเลขคลื่น 1460 cm^{-1} แสดงการสั่นงอแบบสมมาตรของหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 1376 cm^{-1} แสดงการสั่นงอแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 1170 และ 1153 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบงอของพันธะไฮดรอกซิลในพอลิโพรพิลีน (Domagala, 2012) ตำแหน่งเลขคลื่น 775 cm^{-1} แสดงการยืดหด

แบบสมมาตรของโครงสร้างเตตระอีตอลภายในอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย (Yin *et al.*, 2012) และตำแหน่งเลขคลื่น 550 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 (Zhang *et al.*, 2013)



ภาพที่ 14 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 (ก) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย: ก) P1 ข) P2 ค) P3 ง) P4 จ) P5 ฉ) P6 และ ช) P7 (ข) อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5: ก) P1 ข) P8 ค) P9 ง) P10 จ) P11 ฉ) P12 และ ช) P13

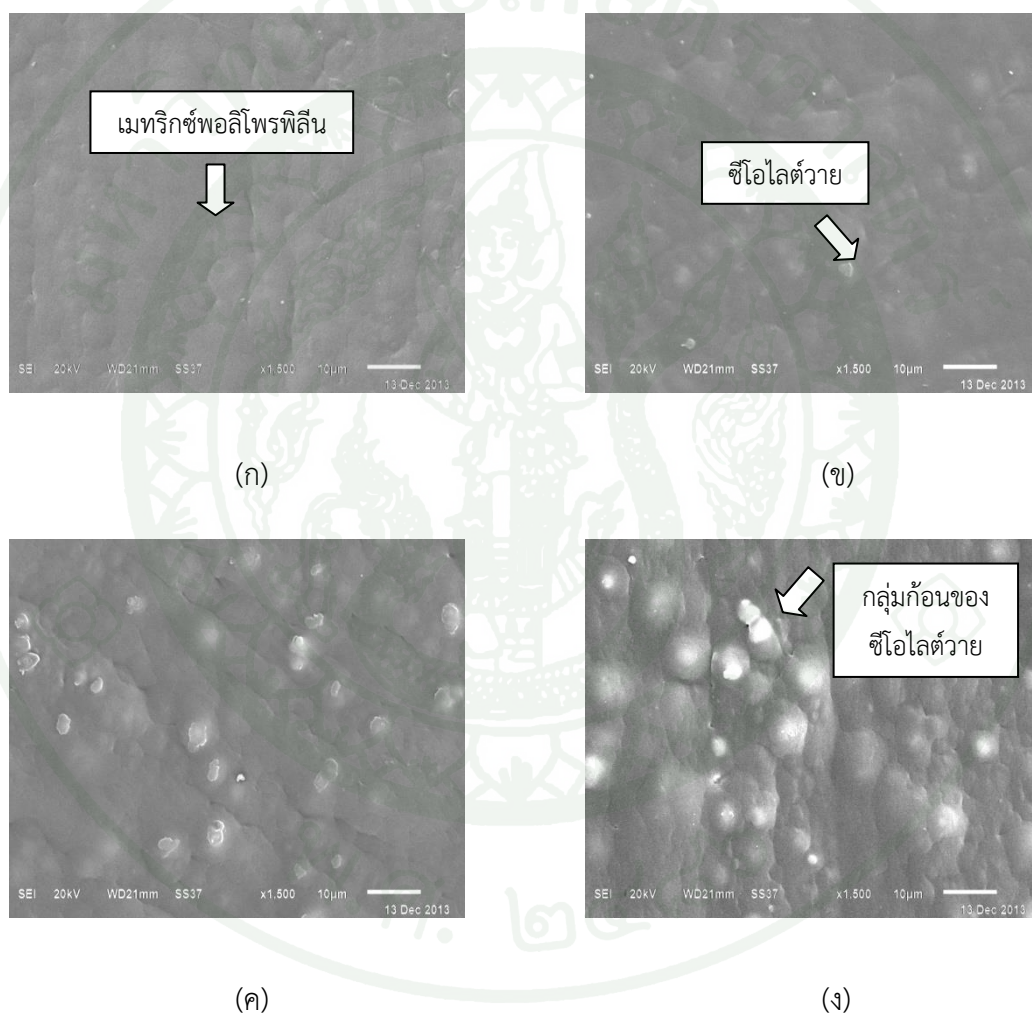
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย และชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร มีผลทำให้เกิดตำแหน่งเลขคลื่น 3700 ถึง 3600 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีหมู่ซิลานอลของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายในฟิล์มพอลิโพรพิลีน และเห็นชัดเจนเมื่อมีการดัดแปรอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย นอกจากนั้นยังพบตำแหน่งเลขคลื่น 1620 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกได้ว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายมีสมบัติความมีขั้วจึงมีผลต่อการดูดซับความชื้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่เกิดตำแหน่งเลขคลื่นนี้ ส่วนตำแหน่งเลขคลื่น 1170 และ 1153 cm^{-1} ในพอลิโพรพิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนและมีการแทรกตัวในเนื้อเมทริกซ์ ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร แสดงให้เห็นว่าพันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีนถูกรบกวน และยังพบว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าฟิล์มชนิดอื่น เนื่องอนุภาคซีโอไลต์เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1620 cm^{-1} พบว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีสมบัติความมีขั้วต่ำกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย จึงดูดซับความชื้นน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการผันแปรอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 พบว่าที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1620 cm^{-1} เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีพฤติกรรมการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนทำให้เกิดบริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน จึงมีผลทำให้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ส่วนตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1170 และ 1153 cm^{-1} เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย โดยตำแหน่งเลขคลื่นสรุปไว้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่มีการดัดแปรและไม่มีการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

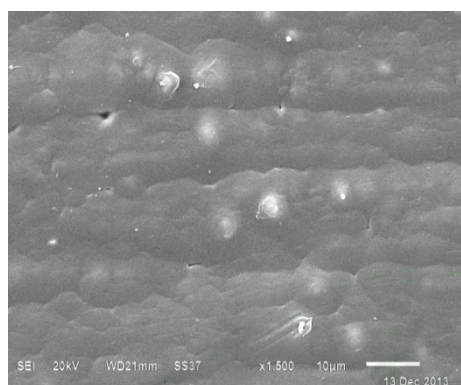
หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะตัว
หมู่ซิลานอลในโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ (Si-OH terminal silanol groups)	3700 ถึง 3600	ซีโอไลต์
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ O-CH ₂ (OCH ₂ asymmetric stretching)	2930	ซีโอไลต์ดัดแปร
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H (C-H asymmetric stretching)	2920 2850	พอลิโพรพิลีน
การยืดหดและการงอของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching and bending)	1620	ความชื้น
การสั่นงอแบบสมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration asymmetrical)	1460	พอลิโพรพิลีน
การสั่นงอแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration symmetrical)	1376	พอลิโพรพิลีน
การสั่นแบบงอของพันธะ C-H (C-H deformation vibration)	1170 1153	พอลิโพรพิลีน
การยืดหดแบบสมมาตรของโครงสร้างเตตระ อีดอลในอนุภาคซีโอไลต์ (T-O symmetric stretching)	775	ซีโอไลต์ชนิดวายเป็น
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้าง อนุภาคซีโอไลต์ (T-O asymmetric stretching)	550	ซีโอไลต์ชนิด ซีเอสเอ็ม 5

2.3 สมบัติทางกายของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

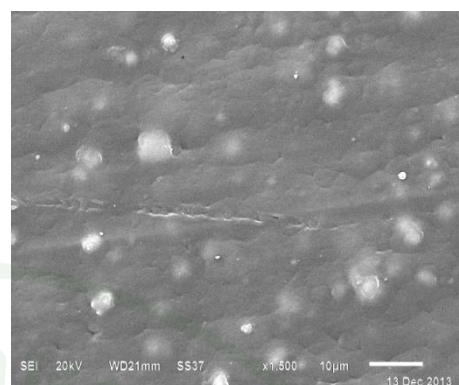
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500 เท่า ทั้งตามแนวพื้นผิวสัมผัสของฟิล์ม (surface section) ดังภาพที่ 15 และตามแนวตัดขวางของฟิล์ม (cross section) ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามแนวพื้นผิวสัมผัสของฟิล์ม (ก) P1 (ข) P2 (ค) P3 (ง) P4 (จ) P5 (ฉ) P6 (ช) P7 (ซ) P8 (ฌ) P9 (ญ) P10 (ฎ) P11 (ฏ) P12 และ (ฐ) P13



(จ)



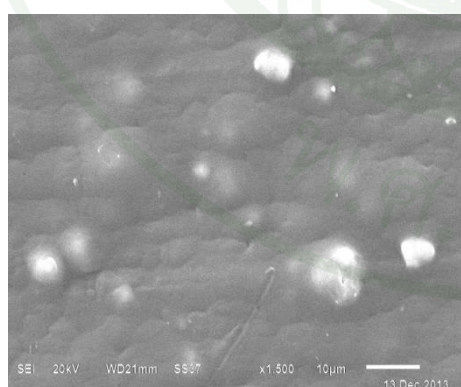
(ฉ)



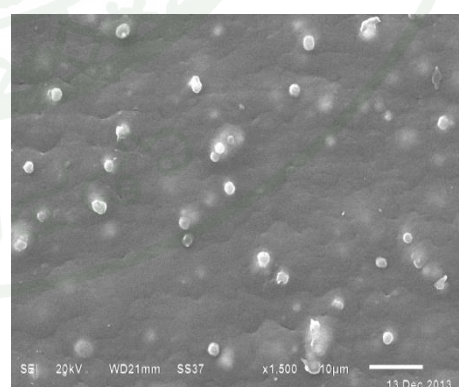
(ช)



(ซ)

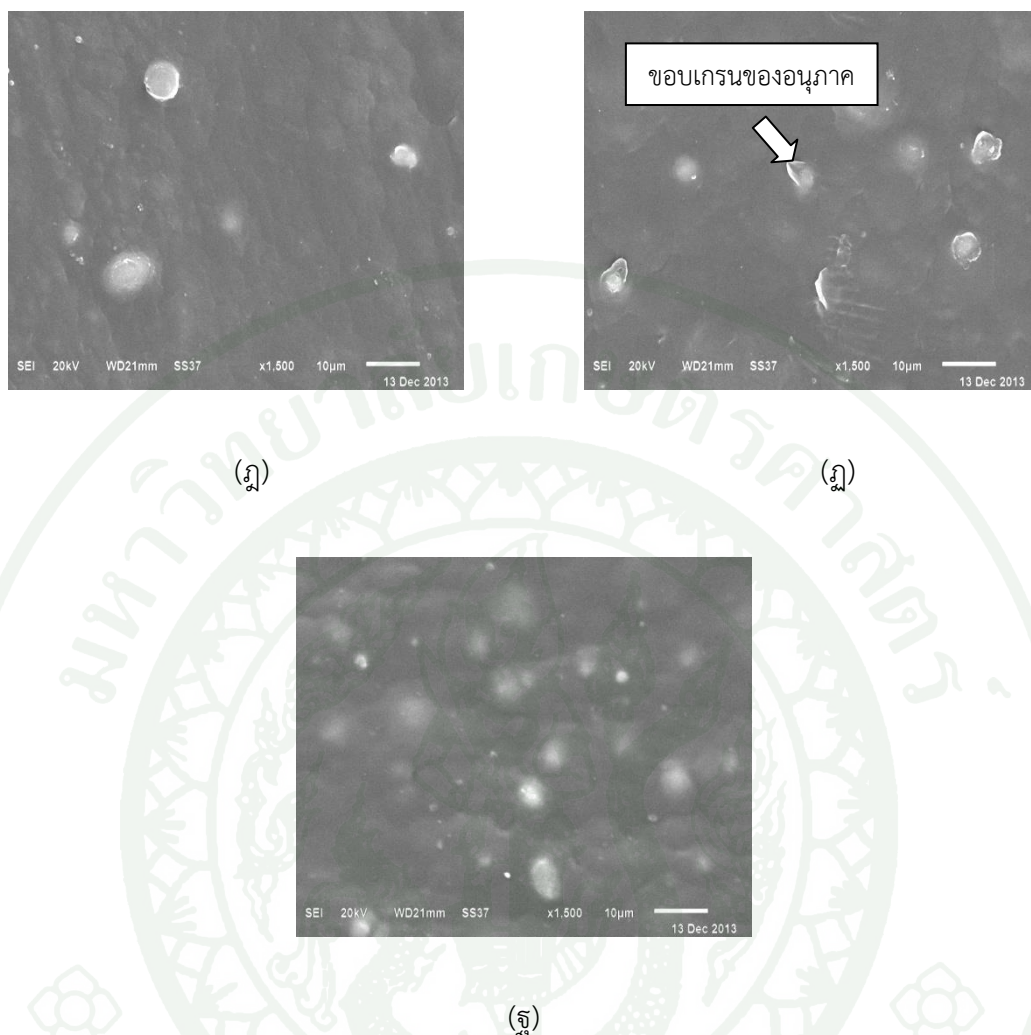


(ณ)



(ญ)

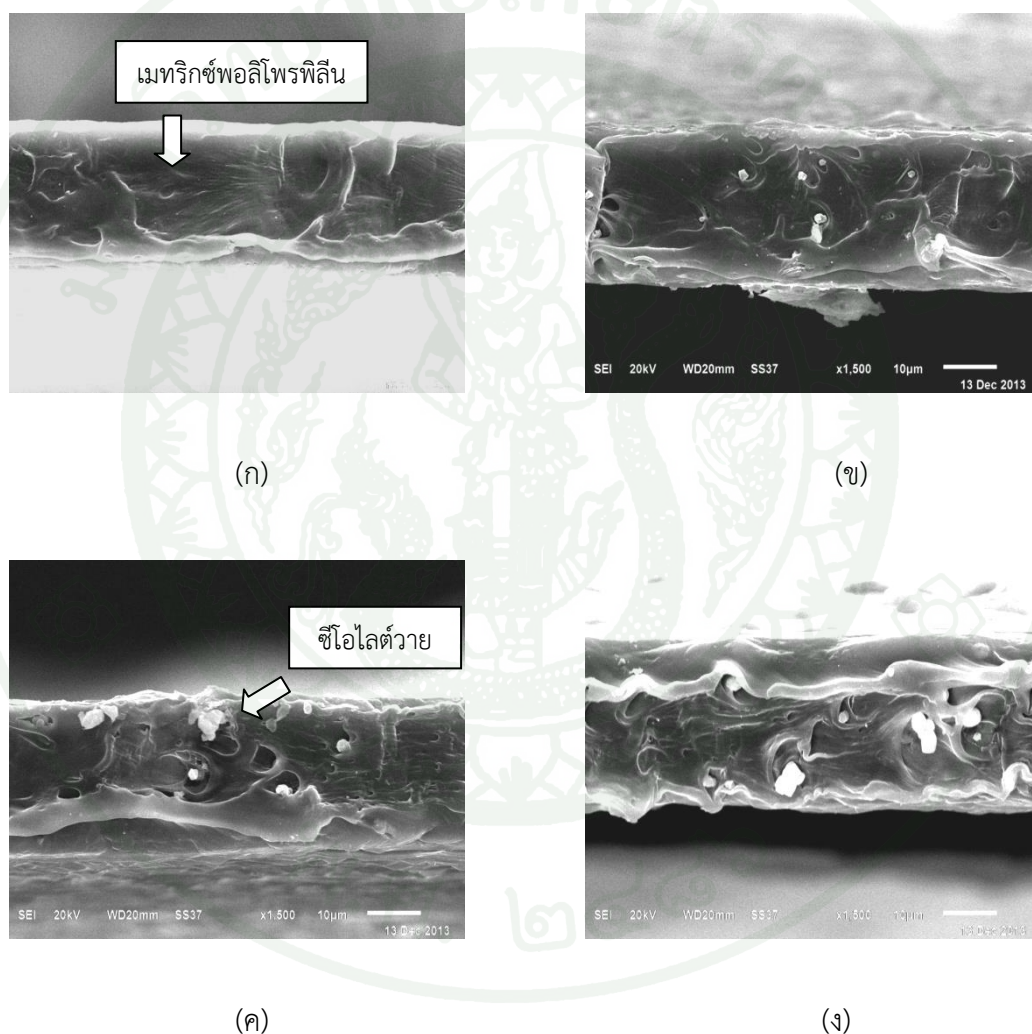
ภาพที่ 15 (ต่อ)



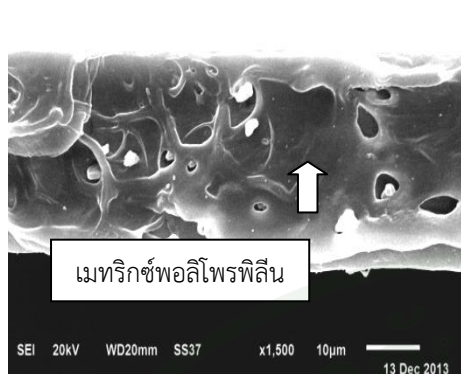
ภาพที่ 15 (ต่อ)

จากภาพที่ 15 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร มีการกระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับพอลิพรพิลีนได้ดี โดยจากภาพในแนวนอนผิวสัมผัสพบการฝังตัวของอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดในเนื้อเมทริกซ์ ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคซีโอไลต์เกิดเป็นหมู่ซิลานอล ส่วนหมู่ไวโนลของพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำอันตรกิริยากับพอลิพรพิลีนโดยเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์จึงทำให้อนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรเกิดการกระจายได้ดี (Ozmihci *et al.*, 2001) สำหรับปริมาณการผันแปรของอนุภาคซีโอไลต์มีผลต่อการกระจายตัว โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการผันแปรอนุภาคซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซีโอไลต์โดยทำให้อนุภาคมีขนาดของกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้นและเห็นขอบเกรนที่ชัดเจน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ที่ปริมาณการผันแปรที่สูงส่งผลให้อนุภาคเกิด

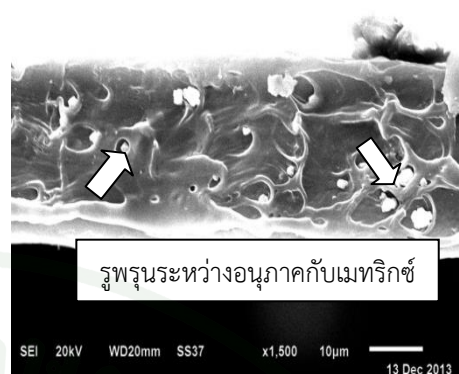
การเหนียวและมีความเหนียวเหนียวกันเองมากกว่าการกระจายตัวของอนุภาคซีไอโพลีเมอร์ของ พอลิโพรพิลีน และเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคซีไอโพลีเมอร์ทั้งสองชนิด พบว่าอนุภาคซีไอโพลีเมอร์ชนิดซีไอโพลีเมอร์ 5 เนื่องจาก อนุภาคซีไอโพลีเมอร์ชนิดซีไอโพลีเมอร์ 5 มีความเหนียวเหนียวและแสดงความหนาแน่นประจุ ส่งผลให้อนุภาคซีไอโพลีเมอร์ 5 เหมือนกันเกิดการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน ซึ่งแตกต่างกับอนุภาคซีไอโพลีเมอร์ 5 ที่มีความหนาแน่นของประจุต่ำ จึงมีพฤติกรรมรวมตัวกันเองเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่



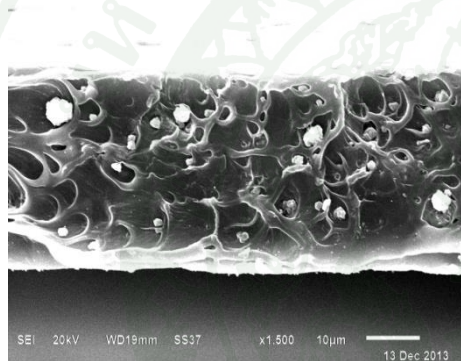
ภาพที่ 16 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยผสมอนุภาคซีไอโพลีเมอร์ชนิดซีไอโพลีเมอร์ 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรรูปและไม่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามแนวตัดขวางของฟิล์ม (ก) P1 (ข) P2 (ค) P3 (ง) P4 (จ) P5 (ฉ) P6 (ช) P7 (ซ) P8 (ณ) P9 (ญ) P10 (ฎ) P11 (ฏ) P12 และ (ฐ) P13



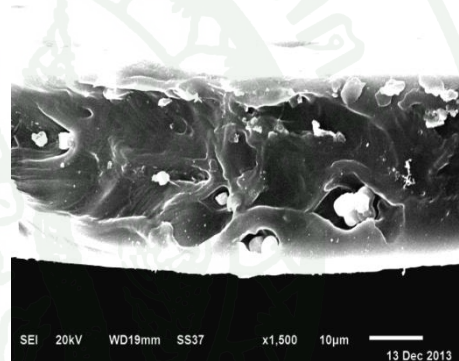
(จ)



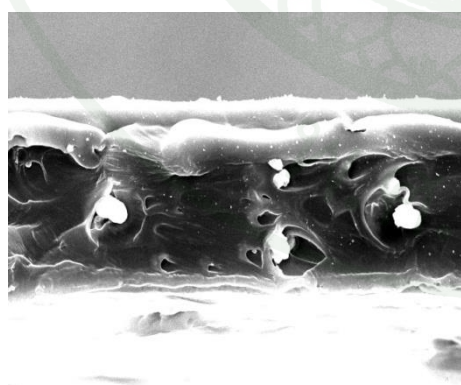
(ข)



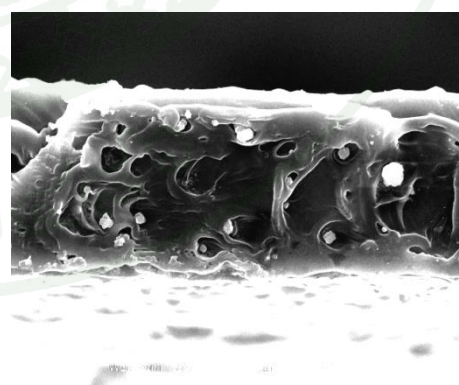
(ง)



(ค)

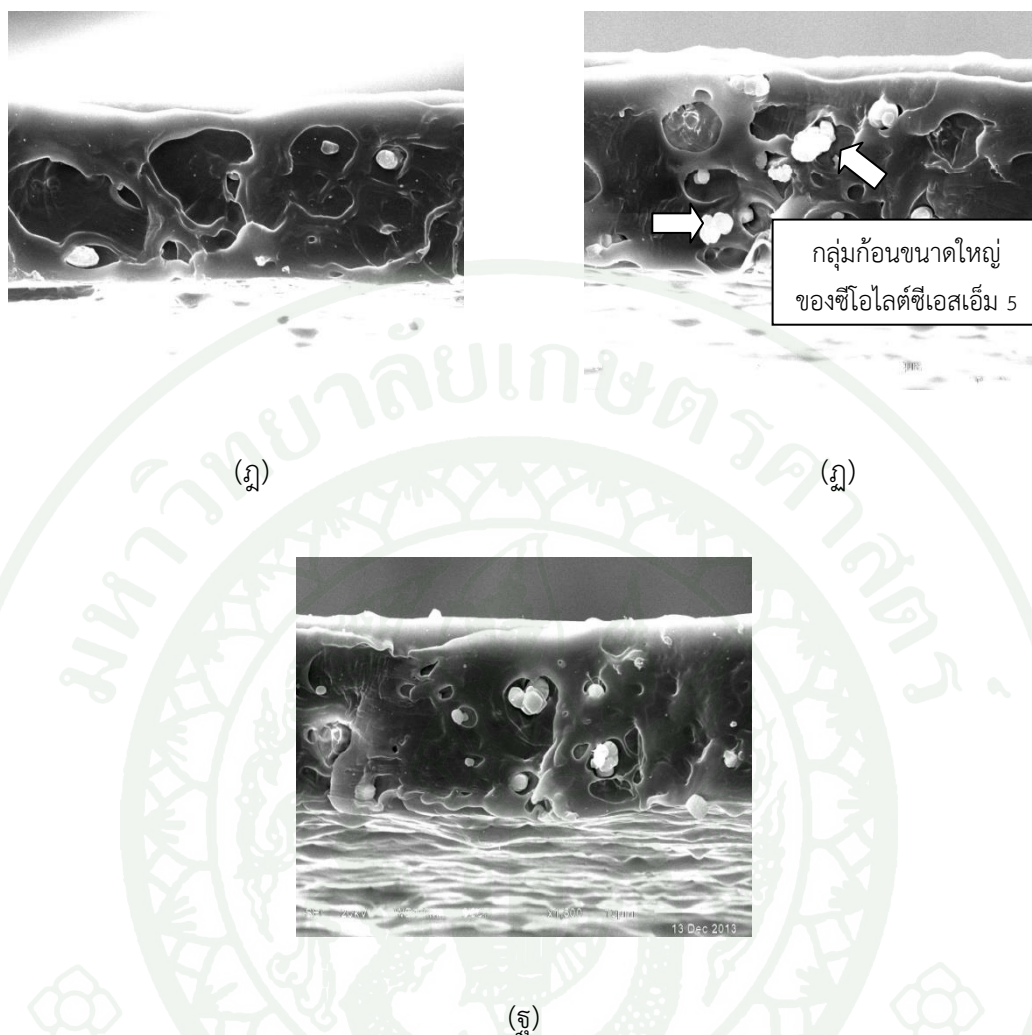


(ณ)



(อ)

ภาพที่ 16 (ต่อ)



ภาพที่ 16 (ต่อ)

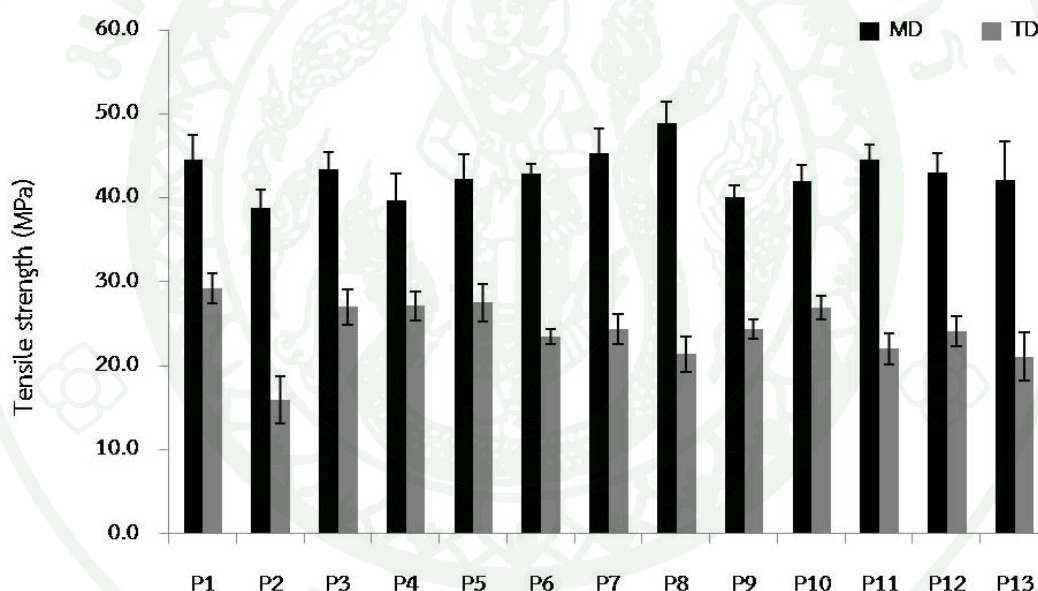
จากภาพที่ 16 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคซีโอไลต์ทั้งชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ในแนวตัดขวางฟิล์ม พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวและเกิดการแทรกตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน โดยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่มีการดัดแปรเกิดการกระจายที่ดีและมีขนาดของกลุ่มก้อนที่เล็กกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายมีพื้นที่ผิวหน้าตัดของรูพรุนน้อยกว่าช่องว่างภายในโมเลกุลและความหนาแน่นของประจุสูง นอกจากนั้นยังพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (Yin *et al.*, 2012; Seo *et al.*, 2013) จึงเกิดการกระจายได้ดีและมีความเป็นระเบียบในเนื้อเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน ส่วนอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีพื้นที่ผิวหน้าตัดของรูพรุนเท่ากับช่องว่างภายในโมเลกุลและความหนาแน่นของประจุต่ำ ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันทุกทิศทางของอนุภาค ซึ่งเกิดเป็นผลึกทรงกลมและมีขนาดใหญ่

ตามปริมาณการแผ่นแปรอนุภาคซีโอไลต์ (Xiao *et al.*, 2013) และจากการเกิดเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนี้อาจส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนขึ้นอย่างชัดเจนและนอกจากนั้นยังพบว่า การเกิดกลุ่มก้อนขนาดใหญ่นี้มีผลทำให้อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เกิดการแทรกตัวขึ้นมาบนพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งมีผลโดยตรงกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีน

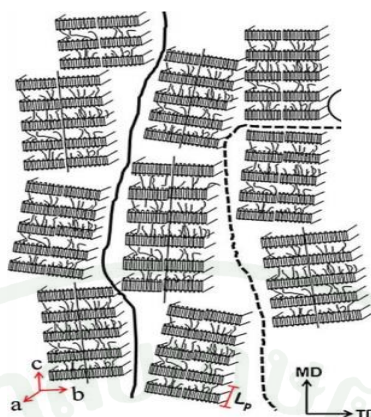
2.4 สมบัติทางกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติง ตามมาตรฐาน ASTM D882 ได้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ร้อยละของการยืดตัว และยังสัมมอดูลัส โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรในแนวตามเครื่อง (machine direction: MD) มีค่าเท่ากับ 44.6 38.8 43.4 39.8 42.2 42.8 45.4 48.9 40.0 42.0 44.5 43.0 และ 42.1 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ และในแนวขวางเครื่อง (transvers direction: TD) มีค่าเท่ากับ 29.3 16.0 27.0 27.2 27.5 23.5 24.4 21.4 24.4 26.9 22.0 24.1 และ 21.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 17 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรในแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่องมีแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิด มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนต่ำซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง (Lv *et al.*, 2010) สำหรับอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่มีการดัดแปรพบว่ามีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่มีการดัดแปร เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ที่ถูกดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดี ลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคและเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ดี โดยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคซีโอไลต์เกิดเป็นหมู่ซิลานอลส่วนหมู่ไวเนิลของพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 จะเข้าทำอันตรกิริยากับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนโดยเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ทำให้อนุภาคซีโอไลต์เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกันจึงเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้น้อย ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาค (Pehlivan *et al.*, 2005) ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงในแนวตามเครื่องของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย

และชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่มีการดัดแปรและไม่มีการดัดแปรมีค่ามากกว่าแนวขวางเครื่อง เนื่องจากในกระบวนการเป่าฟิล์มจะเกิดการเรียงตัวในสองทิศทาง คือแนวตามเครื่องซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลตามแรงดึงจากลูกกลิ้งและแนวขวางเครื่องซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลตามความแรงของลมที่เป่า ดังนั้นในกระบวนการเป่าฟิล์มจะมีแรงดึงจากลูกกลิ้งมากกว่าความแรงของลมที่เป่า ดังนั้นในกระบวนการเป่าฟิล์มจะมีแรงดึงจากลูกกลิ้งมากกว่าความแรงของลมที่เป่า ซึ่งมีผลต่อการจัดเรียงของโมเลกุล โดยเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์จะถูกความแรงของลมที่เป่า ทำให้เกิดการขยายออกทางด้านข้างและเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวขวางเครื่อง จากนั้นจะถูกแรงดึงจากลูกกลิ้งทำให้โครงสร้างโมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวซ้อนกันแนวตามเครื่อง (Tabatabaei *et al.*, 2009) มีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงในแนวตามเครื่องมีค่ามากกว่าแนวขวางเครื่องเนื่องจากต้องใช้แรงในการทำลายโครงสร้างโมเลกุลที่เรียงซ้อนกันแนวตามเครื่อง ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

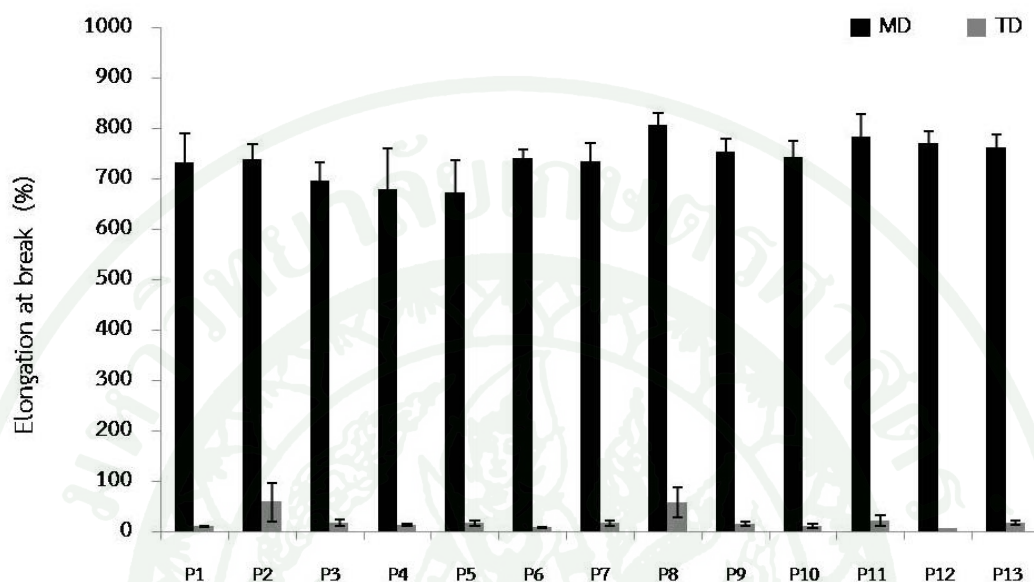


ภาพที่ 18 การจัดเรียงของสายโซ่ในแนวตามเครื่อง (MD) และแนวขวางเครื่อง (TD)

ที่มา: Tabatabaei *et al.* (2009)

ร้อยละการยึดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็น 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ในแนวตามเครื่องมีค่าเท่ากับร้อยละ (%) 734.0 740.0 696.8 679.7 672.8 742.5 735.1 801.1 754.0 745.0 784.6 771.0 และ 764.1 ตามลำดับ และในแนวขวางเครื่องมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.3 58.8 18.0 13.5 16.2 8.4 16.3 57.6 15.8 11.2 21.9 7.2 และ 17.8 ตามลำดับ ดังภาพที่ 19 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดในแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่องมีแนวโน้มของร้อยละการยึดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากความสามารถในการยึดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดเกิดจากช่องว่าง (air holes) ที่บริเวณระหว่างอนุภาคซีโอไลต์และเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน (Biswas *et al.*, 2004) จึงทำให้บริเวณนี้เกิดการยึดตัวก่อนที่จะฉีกขาดได้ซึ่งผลทำให้ค่าร้อยละการยึดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ สำหรับร้อยละการยึดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิด พบว่าฟิล์มที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวามีร้อยละการยึดตัวน้อยกว่าฟิล์มที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากบริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนมีช่องว่างที่ใหญ่ เนื่องมาจากโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีโครงสร้างของรูพรุนแบบช่อง ซึ่งมีพื้นที่ผิวหน้าตัดและช่องว่างภายในโมเลกุลเท่ากันทุกทิศทางจึงเหนี่ยวนำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาครอบทิศทาง ส่งผลให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวามีโครงสร้างของรูพรุนแบบกรง ซึ่งมีพื้นที่ผิวหน้าตัดเล็กกว่าช่องว่างภายในโมเลกุล ส่วนค่าร้อยละการยึดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดทั้งที่มีการดัดแปรและไม่มีการดัดแปรในแนวตามเครื่องมีค่ามากกว่าแนวขวางเครื่อง เนื่องจากในแนวตาม

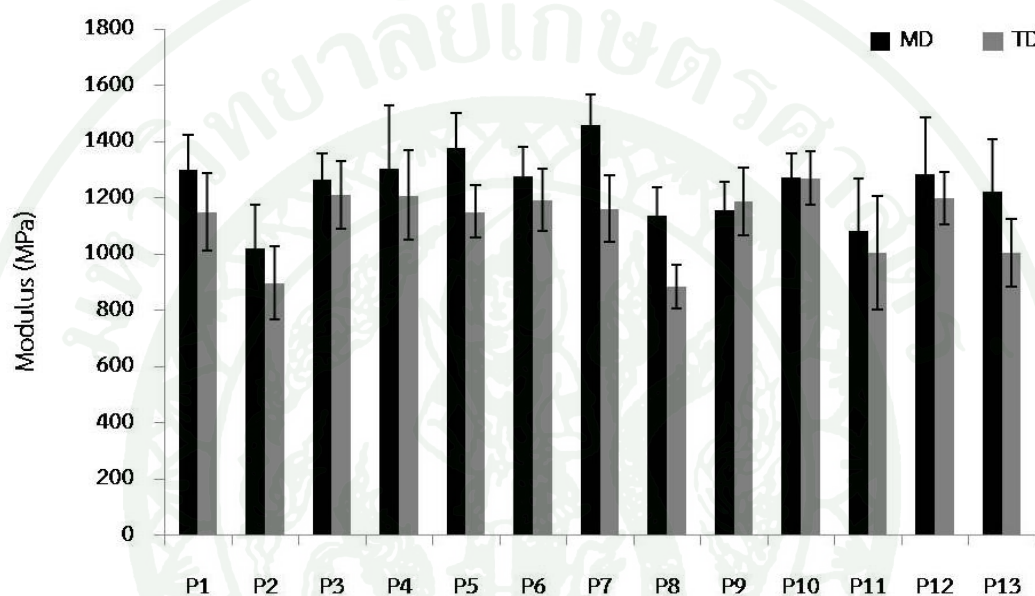
เครื่องมือการเรียงตัวของโมเลกุลที่ซ้อนทับกันจึงเกิดความแข็งแรงกว่าแนวขวางเครื่อง ซึ่งมีผลทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการยืดตัวก่อนการฉีกขาดได้ดีเช่นกัน



ภาพที่ 19 ร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

และสำหรับยังสัมมูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ในแนวตามเครื่องมีค่าเท่ากับ 1303.4 1021.1 1265.7 1306.0 1381.5 1280.4 1463.1 1140.1 1157.3 1273.3 1084.0 1287.7 และ 1224.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และในแนวขวางเครื่องมีค่าเท่ากับ 1151.4 899.5 1211.1 1210.3 1152.0 1194.3 1164.1 885.0 1188.9 1271.7 1007.0 1224.2 และ 1005.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 20 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นในแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่องมีแนวโน้มของยังสัมมูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ และฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ในแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่องมีแนวโน้มของยังสัมมูลัสลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งมีความแข็งแรงของโครงสร้างสูงและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์น้อยกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 จึงทำให้มียังสัมมูลัสสูง ส่วนอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เป็นสารอนินทรีย์เช่นเดียวกันกับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็น แต่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์มากกว่าอนุภาค

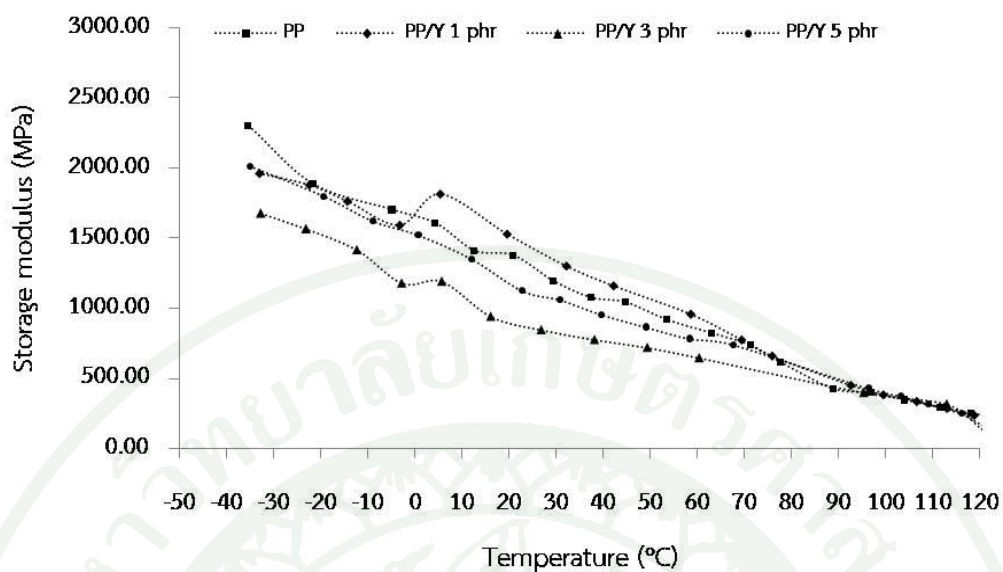
ซีโอไลต์ชนิดวาย จึงส่งผลให้ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับร้อยละการยึดตัวที่เพิ่มขึ้น สำหรับยังสัมมอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดทั้งที่มีการดัดแปรและไม่มี การดัดแปรในแนวตามเครื่องมีค่ามากกว่าแนวขวางเครื่อง เนื่องจากในแนวตามเครื่องมีการเรียงตัว ของโมเลกุลที่ซ้อนทับกันจึงเกิดความแข็งแรงกว่าแนวขวางเครื่อง จึงมีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสในแนวตาม เครื่องมีค่ามากกว่าแนวขวางเครื่องด้วยเช่นกัน (Lv *et al.*, 2008)



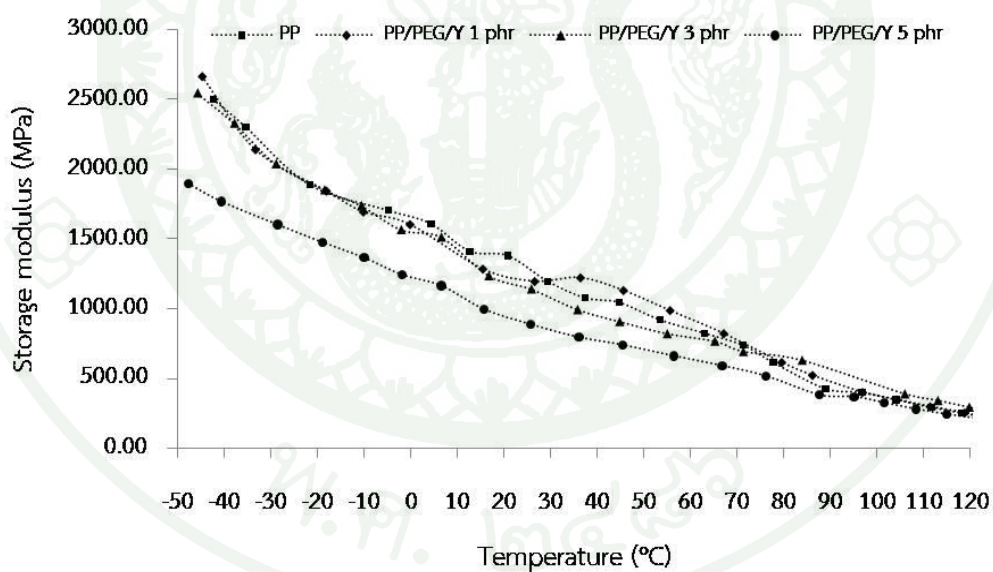
ภาพที่ 20 ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้ง ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

2.5 สมบัติทางกลเชิงความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย และชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยด้วยเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลเซอร์ ตามมาตรฐาน ASTM 4065 ที่ช่วง อุณหภูมิ -50 ถึง 120 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ได้ ทดสอบค่ามอดูลัสสะสม และ $\tan \delta$ ดังภาพที่ 21 และ 22

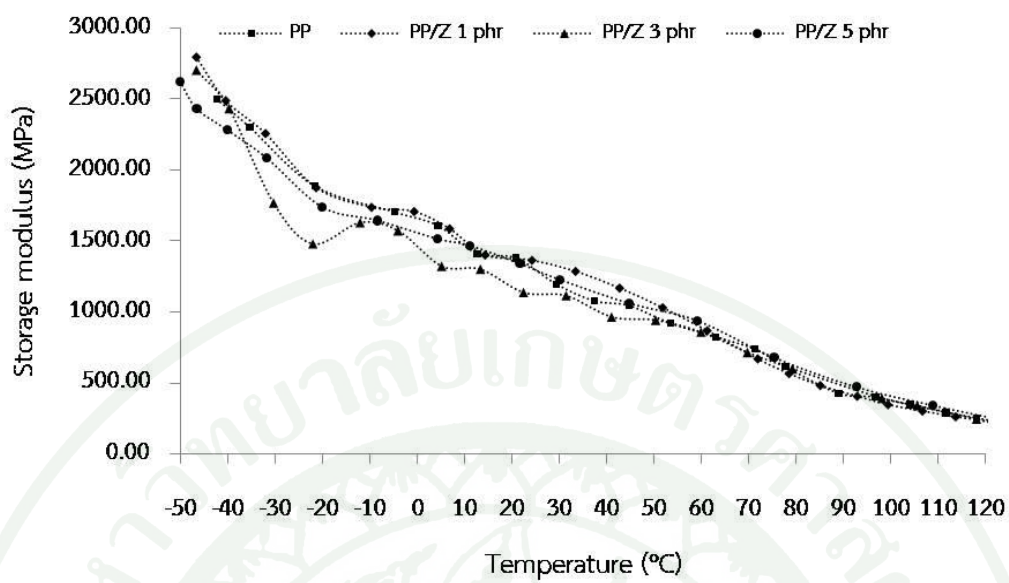


(ก)

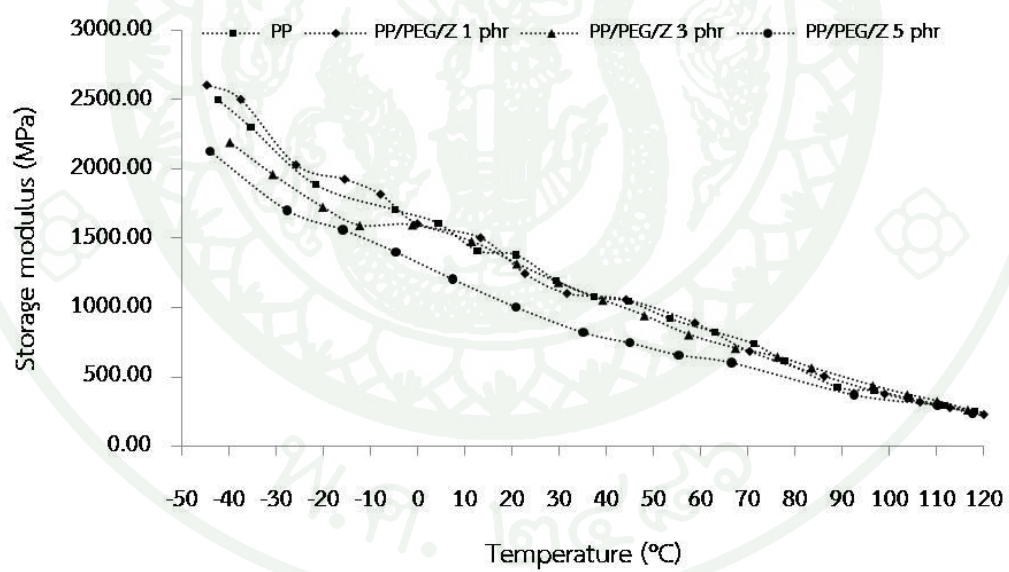


(ข)

ภาพที่ 21 ค่ามอดุลัสสะสม (ก) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ข) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปร (ค) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปร และ (ง) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร



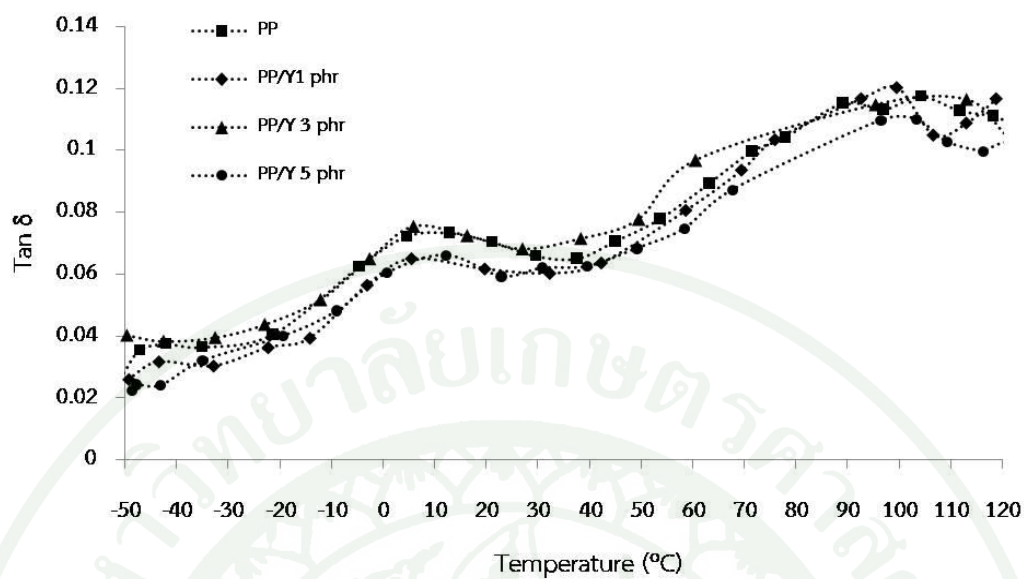
(ค)



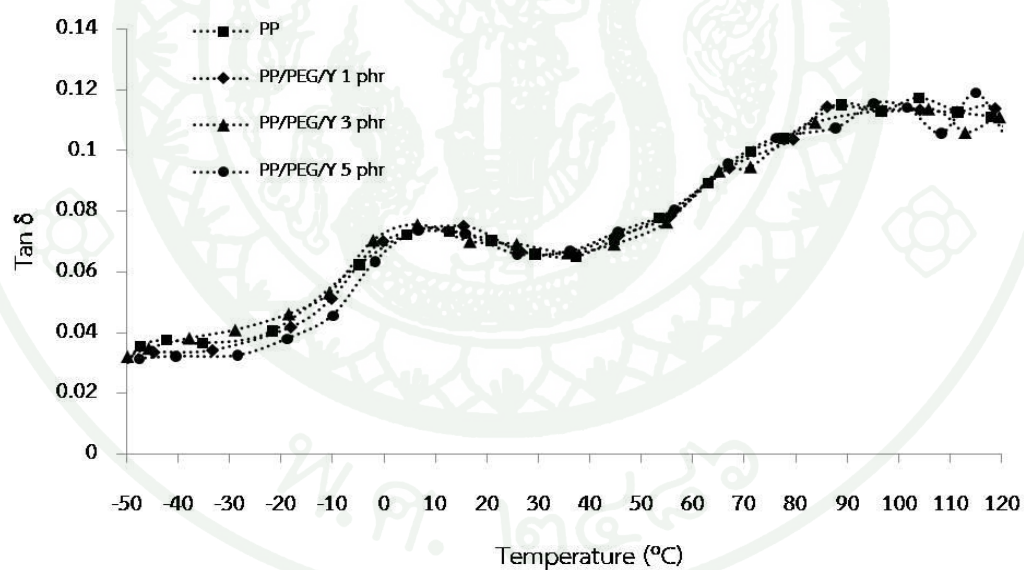
(ง)

ภาพที่ 21 (ต่อ)

จากภาพที่ 21 (ก) แสดงค่ามอดูลัสสะสมของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นสารอนินทรีย์และมีโครงสร้างเป็นผลึก 3 มิติและมีขนาดอนุภาคระดับไมครอน จึงมีผลต่อความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีน (Luyt *et al.*, 2009) นอกจากนั้นปริมาณการผันแปรของอนุภาคซีโอไลต์ที่ปริมาณต่ำ ส่งผลต่อกระจายตัวที่ไม่ทั่วถึงทำให้เกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้น้อย แต่ที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่ามอดูลัสสะสมลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นและเกิดอันตรกิริยาได้ดีขึ้น นอกจากนั้นอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีขนาดและปริมาณของรูพรุนระหว่างอนุภาคที่สม่ำเสมอว่าที่ปริมาณการผันแปรอื่นๆ จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนลดลง ส่วนที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณอนุภาคซีโอไลต์ที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน เนื่องจากอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เมื่อมีปริมาณการผันแปรมากขึ้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมเกาะกลุ่มกันเองและมีผลทำให้การกระจายตัวลดลง ทำให้โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนมีแข็งแรงเพิ่มขึ้น สำหรับค่ามอดูลัสสะสมของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปร ดังภาพที่ 21 (ข) พบว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสสะสมลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปรมีการกระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น นอกจากนั้นยังมีขนาดและปริมาณของช่องว่างที่สม่ำเสมอ จึงผลให้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงลดลงและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 21 (ค) และ (ง) มีแนวโน้มของค่ามอดูลัสสะสมไปในทิศทางเดียวกันกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร และจากผลของอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมลดลง เนื่องจากพลังงานความร้อนมีผลต่อการคลายตัวของพันธะในพอลิโพรพิลีน จึงส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงลดลงและมีความนิ่มมากขึ้น

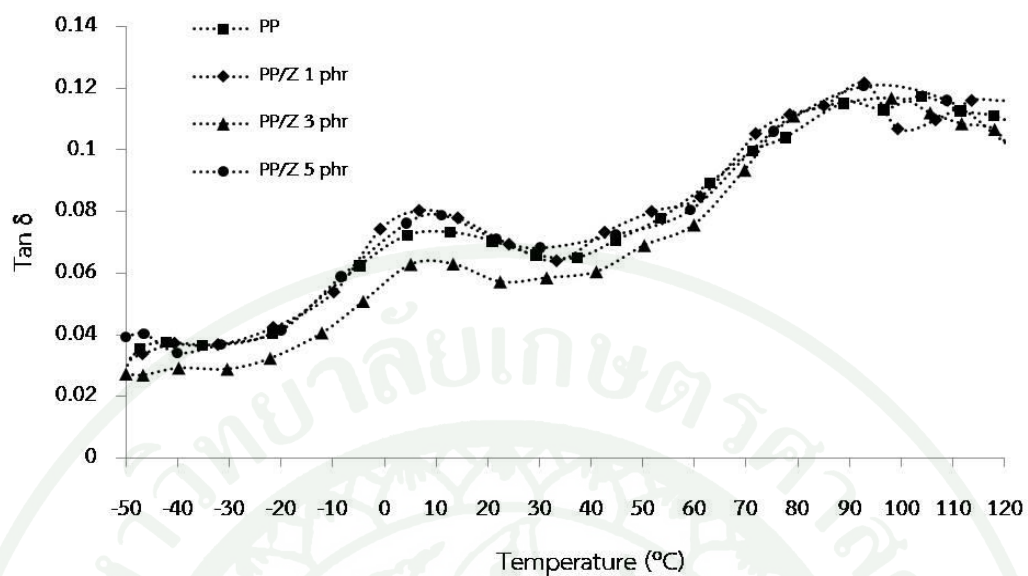


(ก)

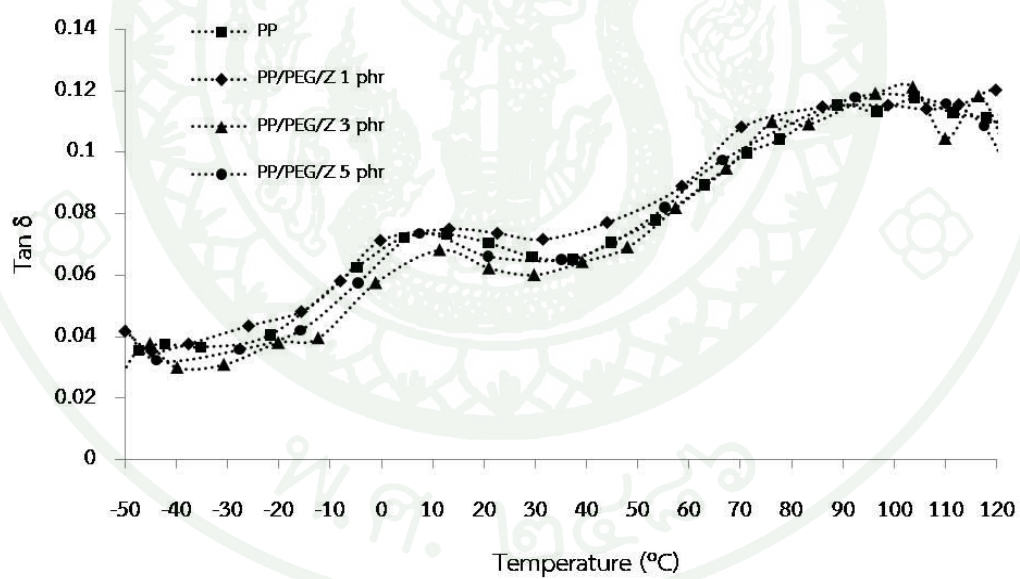


(ข)

ภาพที่ 22 ค่า $\tan \delta$ (ก) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นไม่ผ่านการดัดแปร (ข) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นผ่านการดัดแปร (ค) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปร และ (ง) फिल्मพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร



(ค)



(ง)

ภาพที่ 22 (ต่อ)

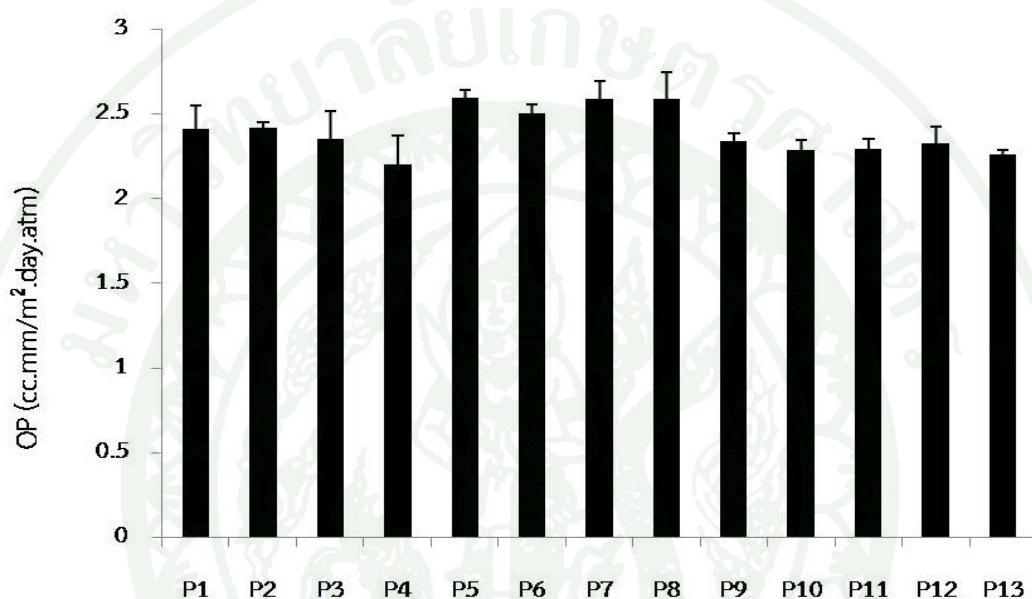
สำหรับค่า $\tan \delta$ ของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ปรากฏตำแหน่งของพีคที่ชัดเจน 2 พีค โดยตำแหน่งแรกปรากฏพีคที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) ของผลึกแบบเบต้าในพอลิโพรพิลีน และตำแหน่งที่สองปรากฏพีคที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผลึกแบบแอลฟาในพอลิโพรพิลีน (López-Manchado and Arroyo, 2000) สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผลึกแบบเบต้าและแบบแอลฟาประมาณ 8 และ 99 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 (ก) และเมื่อเปรียบเทียบค่า $\tan \delta$ กับปริมาณการผันแปรอนุภาคซีโอไลต์ พบว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ แต่ที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่า $\tan \delta$ ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อนุภาคซีโอไลต์มีการกระจายตัวได้ดีกว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นอนุภาคขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เมื่อมีการกระจายตัวที่ดีจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้ดีเช่นกันจึงส่งผลทำให้โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนเกิดการคลายตัวของพันธะและมีความยืดหยุ่นขึ้น นอกจากนั้นอนุภาคซีโอไลต์ยังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนจึงมีผลทำให้โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนการคลายตัวได้ง่าย เช่นเดียวกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร แต่เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วระหว่างฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปรมีความอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของทั้งผลึกแบบเบต้าและแบบแอลฟาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีอุณหภูมิประมาณ 10 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 (ข) เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้ดีและการดัดแปรอนุภาคส่งผลให้อนุภาคซีโอไลต์เกิดผลึกที่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ดังนั้นฟิล์มพอลิโพรพิลีนจึงมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการคลายตัวของพันธะเพื่อเปลี่ยนสถานะจากมีสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผลึกแบบเบต้าและแบบแอลฟาประมาณ 8 และ 99 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 (ค) และเมื่อเปรียบเทียบค่า $\tan \delta$ กับปริมาณการผันแปรอนุภาคซีโอไลต์ พบว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่า $\tan \delta$ ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีพฤติกรรมเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิด

ววย แต่มีการกระจายตัวดีกว่าที่ปริมาณการผันแปรอื่นๆ จึงส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีความเป็นระเบียบและเกิดการคลายตัวได้มากขึ้น ซึ่งที่ปริมาณการผันแปรที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก อนุภาคซีโอโลต์ซีเอสเอ็ม 5 มีการกระจายตัวไม่ดีและมีการจับกลุ่มกันเป็นก้อน และการจับกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่ส่งผลให้มีขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่กว้างและทำให้ความเป็นระเบียบในโครงสร้างลดลงจึงทำให้โครงสร้างเกิดการคลายตัวได้มากกว่าที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่วนฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผลึกแบบเบต้าและแบบแอลฟาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยที่ผ่านการดัดแปร โดยมีอุณหภูมิประมาณ 10 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 (ง) เนื่องจากการดัดแปรอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ส่งผลให้อนุภาคมีความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้นและเกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น ทำให้เกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ได้ดีขึ้นและมีความเป็นระเบียบของโครงสร้างมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น

2.6 สมบัติการต้านทานการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

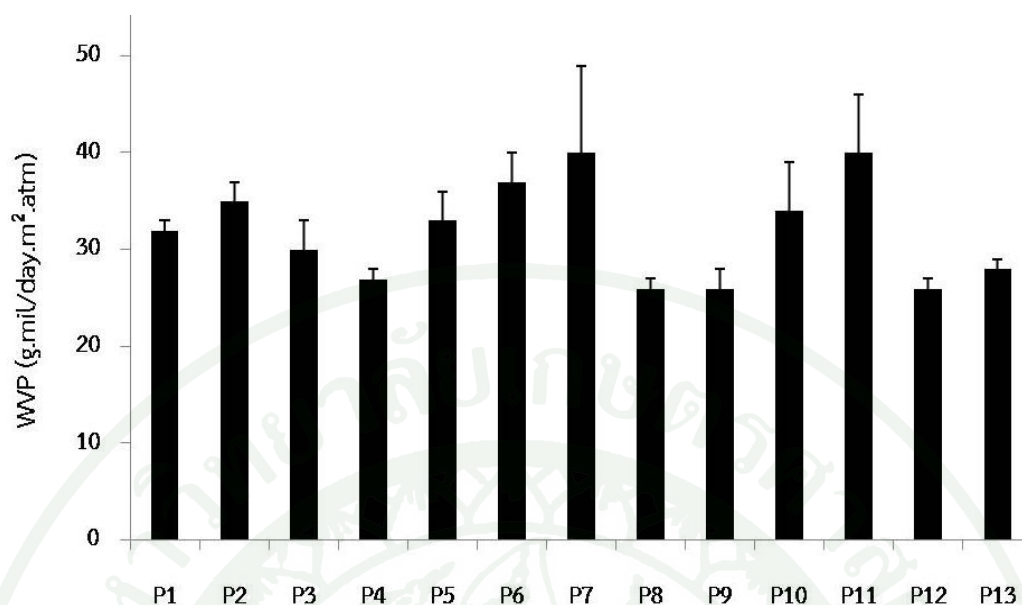
จากการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยเครื่องวัดการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ดังภาพที่ 23 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนในฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร มีค่าเท่ากับ 211.6 212.0 206.5 193.0 227.6 219.3 226.8 226.9 205.4 200.7 201.3 204.1 และ 198.4 cc.mm/m².day.atm ตามลำดับ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนมากกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนชนิดอื่น เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยมีโครงสร้างแบบฟาวจาไซต์ ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนแบบกรงหรือมีพื้นที่ผิวหน้าตาดันน้อยกว่าช่องว่างภายในโมเลกุล จึงมีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บแก๊สไว้ภายในช่องว่างของโมเลกุล (Kim and Ahn, 2011) นอกจากนั้นอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยที่ผ่านการดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดี มีขนาดและปริมาณของช่องว่างระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนที่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของโครงสร้างอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววยที่มีลักษณะเป็นมุกหกลเหลี่ยม (Seo *et al.*, 2013) จึงทำให้เกิดผลึกและรูพรุนที่สม่ำเสมอและเป็นระเบียบ ส่วนอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีโครงสร้างแบบ

เอ็มเอฟไอ ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนแบบช่องหรือมีพื้นที่ผิวหน้าตัดเท่ากับช่องว่างภายในโมเลกุล จึงมีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บแก๊สได้น้อย เนื่องจากโครงสร้างแบบช่องมีพื้นที่ผิวหน้าตัดกว้าง จึงทำให้อัตราการซึมผ่านแก๊สกับอัตราการคายแก๊สมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเหมือนกับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวาย (Yi *et al.*, 2011)



ภาพที่ 23 สภาพให้ซึมผ่านแก๊สได้ของแก๊สออกซิเจนในฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

จากการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาค ซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิ เอทิลีนไกลคอล 4000 ด้วยการวัดการซึมผ่านไอน้ำแบบใช้คัพ (cup method) แสดงสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำในฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำในฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 มีค่าเท่ากับ 31.7 34.7 29.6 27.5 32.6 37.7 40.0 26.5 26.1 33.9 39.8 26.2 และ 27.7 g.mil/day.m².atm ตามลำดับ พบว่าฟิล์มพอลิพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีแนวโน้มของสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน มีสมบัติความมีขี้ และมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลกับเมทริกซ์ จึงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร พบว่ามีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่มีการดัดแปรเนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรมีการกระจายที่พื้นผิวและแทรกตัวในเนื้อของเมทริกซ์ได้ดีกว่า และการเกิดกระจายตัวที่ดีขึ้นนี้ทำให้อนุภาคซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับไอน้ำมากขึ้น นอกจากนั้นยังส่งผลให้เกิดบริเวณที่เป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น (Pehlivan *et al.*, 2003) ดังนั้นจึงมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำที่สูงขึ้น สำหรับปริมาณการเติมอนุภาคซีโอไลต์พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ไม่ผ่านการดัดแปรเมื่อมีการเติมที่ปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลงเนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์เกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับไอน้ำลดลงและบริเวณช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลง ในทางกลับกันอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรเมื่อมีการเติมที่ปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดีและลดการเกิดกลุ่มก้อนกัน จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับไอน้ำสูงขึ้น ทำให้มีผลของ

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้อนุภาคซีโอโลต์สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีแนวโน้มของสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลง เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 แสดงความมีขั้วต่ำและมีพฤติกรรมเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววาย เนื่องจากอนุภาคซีโอโลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีความหนาแน่นของประจุต่ำกว่าอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววาย จึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุได้น้อย ส่งผลให้การกระจายตัวลดลงและมีการเกาะกลุ่มกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการขัดขวางและเพิ่มระยะทางในการซึมผ่านของไอน้ำ (Georgiev *et al.*, 2009)

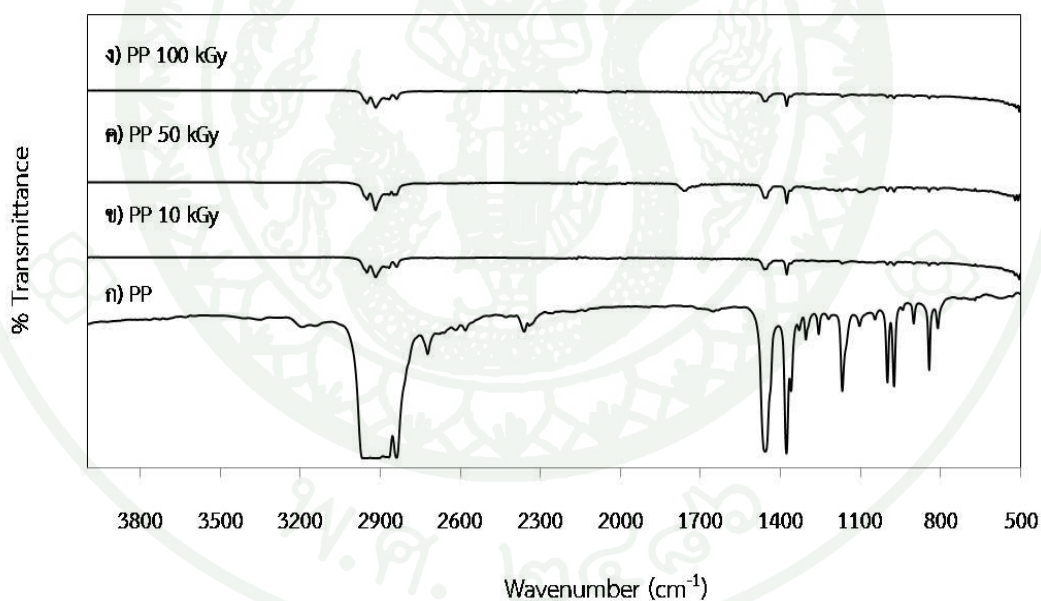
3. ความสามารถในการย่อยสลายได้ของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา

การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบัน ต้องคำนึงถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มส่วนใหญ่ทำมาจากพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายยากหรือใช้เวลานานในการย่อยสลาย และหนึ่งในวิธีที่ช่วยเร่งการย่อยสลายของพอลิเมอร์ คือการฉายรังสีที่มีพลังงานสูงโดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา ซึ่งมีผลทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการแตกขาดและทำให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้เร็วขึ้น (Zhao *et al.*, 1996; Dawood and Miura, 2001) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มแอคติฟพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยการนำฟิล์มมาผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ ตามลำดับ จากนั้นศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ เพื่อชี้เน้นถึงความสามารถในการย่อยสลายได้ของฟิล์มแอคติฟพอลิโพรพิลีน

3.1 หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา

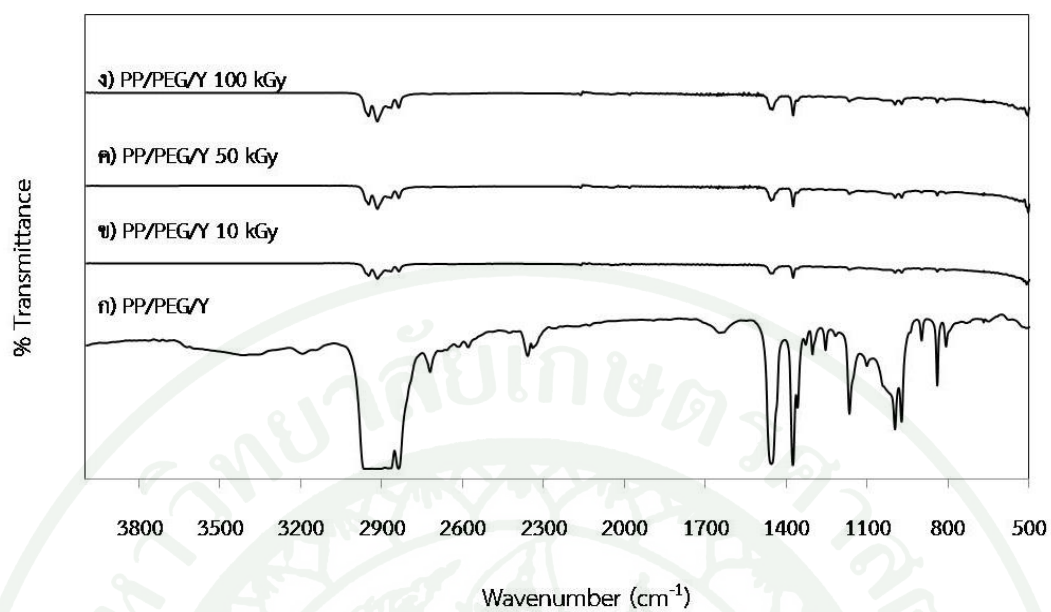
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสี ซึ่งวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความละเอียด 4 ต่อเซนติเมตร โดยทำการศึกษาที่ช่วงคลื่น 4000 ถึง 500 cm^{-1} ดังภาพที่ 25 พบตำแหน่งเลขคลื่น

และหมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่งดังนี้ ตำแหน่งเลขคลื่น 3700 ถึง 3600 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ซิลานอล ซึ่งพบในโครงสร้างของพื้นผิวภายนอกทั้งซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 (Li *et al.*, 2005) ตำแหน่งเลขคลื่น 2930 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ O-CH_2 ซึ่งเกิดจากอะตอมของออกซิเจนในพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 เข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคซีโอไลต์ (Ozmihci *et al.*, 2001) ตำแหน่งเลขคลื่น 2920 และ 2850 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะไฮโดรเจนในพอลิโพรพิลีน (Dikobe and Luyt, 2009) ตำแหน่งเลขคลื่น 1460 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบสมมาตรของหมู่เมทิล ในพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 1376 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 1170 และ 1153 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบงอของพันธะไฮโดรเจนในพอลิโพรพิลีน (Domagala, 2012) ตำแหน่งเลขคลื่น 775 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบสมมาตรของโครงสร้างเตตระอีโดลภายในอนุภาคชนิดซีโอไลต์วาย (Yin *et al.*, 2012) และตำแหน่งเลขคลื่น 550 cm^{-1} แสดงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 (Zhang *et al.*, 2013)

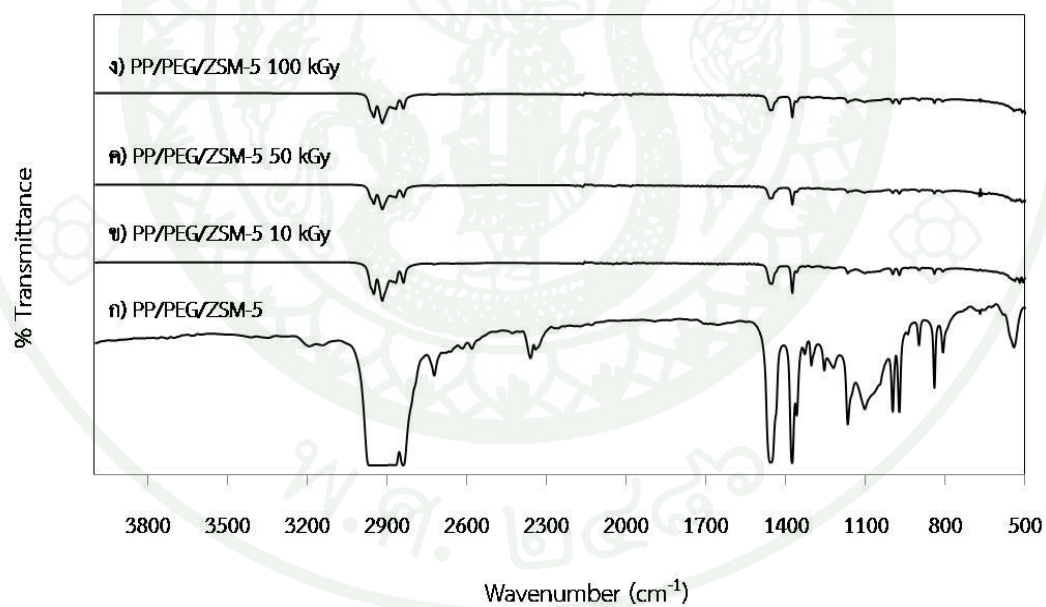


(ก)

ภาพที่ 25 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ (ก) ฟิล์มพอลิโพรพิลีน (ข) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปร และ (ค) ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร



(ข)



(ค)

ภาพที่ 25 (ต่อ)

จากภาพที่ 25 (ก) แสดงหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมอนุภาคซีโอไลต์ พบว่าเมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้ม 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ ตามลำดับ พบตำแหน่ง เลขคลื่นที่มีการลดลงของความสูงในตำแหน่งเลขคลื่น 2920 และ 2850 cm^{-1} บ่งบอกถึงพันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 1460 และ 1376 cm^{-1} บ่งบอกถึงการยืดหดของหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีน และตำแหน่งเลขคลื่น 1170 และ 1153 cm^{-1} บ่งบอกถึงการสั่นแบบงอของพันธะไฮโดรเจนในพอลิโพรพิลีนซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 8 จากตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีนเกิดการแตกตัวหรือถูกทำลายลง และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มในการฉายรังสีจะส่งผลต่อการแตกตัวของพันธะมากยิ่งขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น และมีอำนาจทะลุทะลวงสูง (กฤษภา และ ชญาภา, 2550) จากภาพที่ 25 (ข) และ 25 (ค) แสดงหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร พบตำแหน่งเลขคลื่นที่มีการลดลงของความสูงในตำแหน่งเลขคลื่น 3700 ถึง 3600 cm^{-1} บ่งบอกถึงหมู่ซิลานอลในโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ตำแหน่งเลขคลื่น 2920 และ 2850 cm^{-1} บ่งบอกถึงพันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 1460 และ 1376 cm^{-1} บ่งบอกถึงการยืดหดของหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีน ตำแหน่งเลขคลื่น 775 cm^{-1} บ่งบอกถึงโครงสร้างเตตระฮีดรอลภายในอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และตำแหน่งเลขคลื่น 550 cm^{-1} บ่งบอกถึงโครงสร้างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 9 และ 10 จากตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวนอกจากจะพบว่าพันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีนเกิดการแตกตัวแล้วยังพบว่าโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ทั้งชนิดซีเอสเอ็ม 5 เกิดการแตกตัวหรือถูกทำลายด้วยเช่นกัน เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานในการเกิดพันธะของพอลิเมอร์และวัสดุคอมพอสิต ดังนั้นการฉายรังสีจึงมีผลต่อการสลายตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5

ตารางที่ 8 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะตัว
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H (C-H asymmetric stretching)	2920, 2850	พอลิโพรพิลีน
การสั่นแบบสมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration asymmetrical)	1460	พอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 8 (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm ⁻¹)	ลักษณะเฉพาะตัว
การสั่นงอแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration symmetrical)	1376	พอลิโพรพิลีน
การสั่นแบบงอของพันธะ C-H (C-H deformation vibration)	1170 1153	พอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 9 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

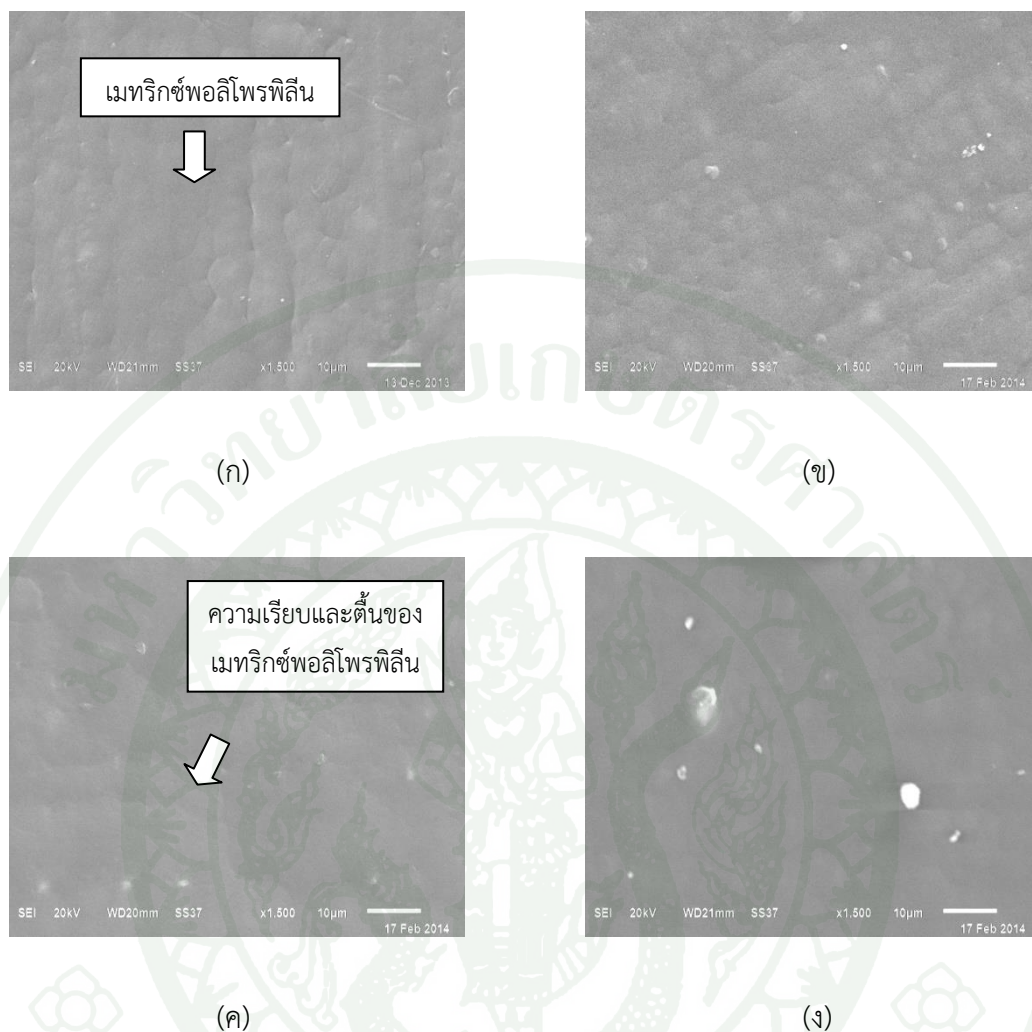
หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm ⁻¹)	ลักษณะเฉพาะตัว
หมู่ซิลานอยในโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ (Si-OH terminal silanol groups)	3700 ถึง 3600	ซีโอไลต์
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ O-CH ₂ (OCH ₂ asymmetric stretching)	2930	ซีโอไลต์ดัดแปร
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H (C-H asymmetric stretching)	2920, 2850	พอลิโพรพิลีน
การยืดหดและการงอของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching and bending)	1620	ความชื้น
การสั่นงอแบบสมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration asymmetrical)	1460	พอลิโพรพิลีน
การสั่นงอแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration symmetrical)	1376	พอลิโพรพิลีน
การยืดหดแบบสมมาตรของโครงสร้างเตตระ อีตอลในอนุภาคซีโอไลต์ (T-O symmetric stretching)	775	ซีโอไลต์ชนิดวายเป็น

ตารางที่ 10 ตำแหน่งเลขคลื่นของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

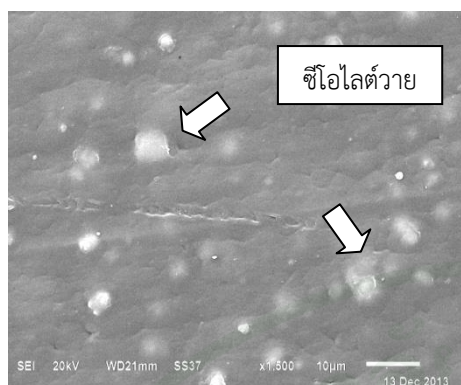
หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะตัว
หมู่ซิลานอยในโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ (Si-OH terminal silanol groups)	3700 ถึง 3600	ซีโอไลต์
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ O-CH ₂ (OCH ₂ asymmetric stretching)	2930	ซีโอไลต์ดัดแปร
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-H (C-H asymmetric stretching)	2920, 2850	พอลิโพรพิลีน
การสั่นงอแบบสมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration asymmetrical)	1460	พอลิโพรพิลีน
การสั่นงอแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล (CH ₃ deformation vibration symmetrical)	1376	พอลิโพรพิลีน
การยืดหดแบบไม่สมมาตรของโครงสร้าง อนุภาคซีโอไลต์ (T-O asymmetric stretching)	550	ซีโอไลต์ชนิด ซีเอสเอ็ม 5

3.2 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา

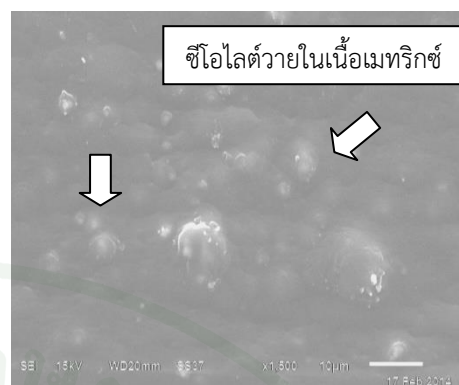
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสี ซึ่งวิเคราะห์สมบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ตามแนวพื้นผิวสัมผัสของฟิล์ม ดังภาพที่ 26



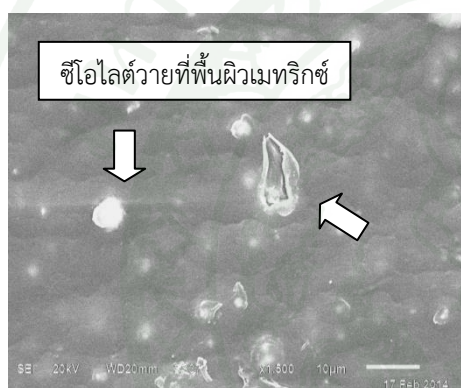
ภาพที่ 26 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพร์ฟิล์มผสมอนุภาคซีไอโลต์ชนิดวายเป็น 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ (ก) D1 (ข) D2 (ค) D3 (ง) D4 (จ) D5 (ฉ) D6 (ช) D7 (ซ) D8 (ฌ) D9 (ญ) D10 (ฎ) D11 และ (ฏ) D12



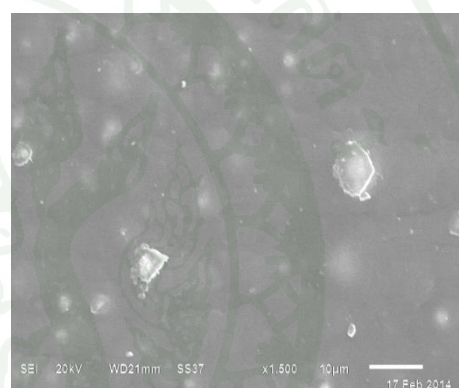
(จ)



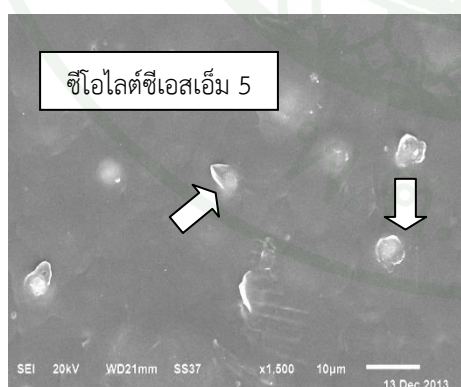
(ฉ)



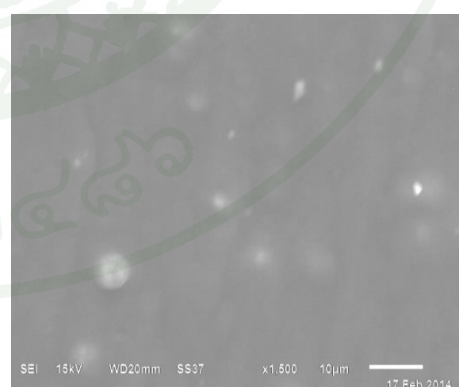
(ช)



(ซ)

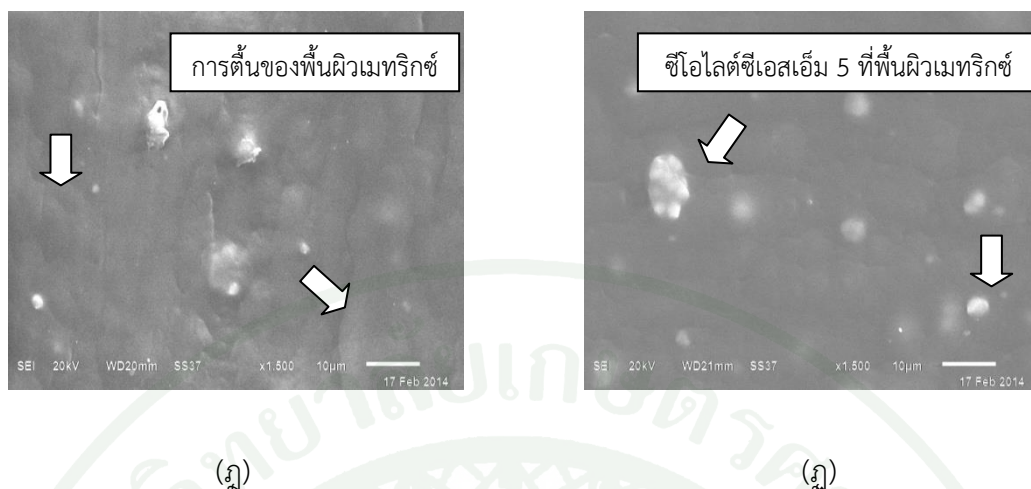


(ณ)



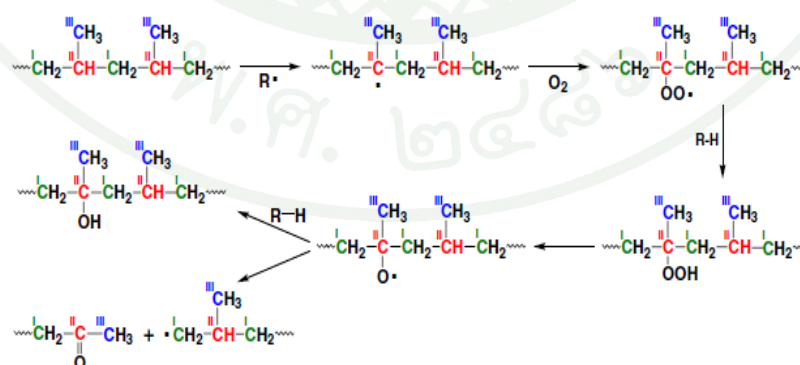
(ญ)

ภาพที่ 26 (ต่อ)



ภาพที่ 26 (ต่อ)

จากภาพที่ 26 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีไอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ปริมาณความเข้ม 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีมีผลต่อการเสียเนื้อของฟิล์ม พอลิโพรพิลีนซึ่งสังเกตได้จากผิวหน้าของเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนที่เรียบและไม่เกิดร่องรอย เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีพลังงานสูงและเมื่อฉายลงบนฟิล์มพอลิโพรพิลีนจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดฟรีเรดิเคิล (free radical) ซึ่งฟรีเรดิเคิลที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนในพอลิโพรพิลีน และเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Bernstein *et al.*, 2007) ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 กลไกการแตกตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการฉายรังสี

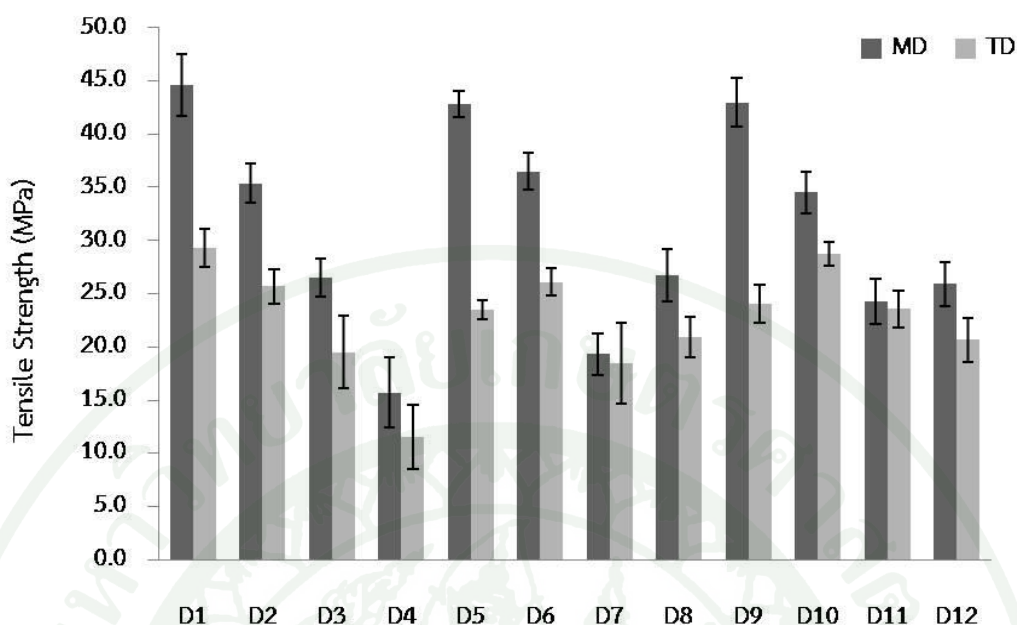
ที่มา: Bernstein *et al.* (2007)

สำหรับภาพที่ 26 (ค) และ 26 (ง) ของฟิล์มพอลิโพรพิลีนปรากฏภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นลักษณะเม็ดขาวขุ่น ซึ่งเกิดจากข้อผิดพลาดในกระบวนการเคลือบทองจึงเห็นเป็นจุดดำหนึ่ขึ้น จากการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นการตัดแปร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีตามลำดับ ผิวหน้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีความเรียบมากขึ้นและเห็นอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชัดเจน เนื่องจากพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนถูกทำลายจากรังสีแกมมาส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนและอนุภาคซีโอไลต์ลดลง และเกิดการเคลื่อนตัวออกมาสู่ผิวหน้าของอนุภาคซีโอไลต์บนพอลิโพรพิลีน นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาส่งผลให้อนุภาคของซีโอไลต์ชนิดวายเป็นการแตกตัวและมีขนาดลดลง เช่นเดียวกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาตามลำดับ ส่งผลให้ผิวหน้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนถูกทำลายและเห็นอนุภาคซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ชัดเจนมากขึ้น โดยสังเกตจากขอบเกรนของอนุภาคซีโอไลต์ แต่เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 100 กิโลเกรย์พบว่าขนาดและขอบเกรนของอนุภาคซีโอไลต์ลดลง เนื่องจากโครงสร้างผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ถูกทำลายเช่นเดียวกับฟิล์มพอลิโพรพิลีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiu (2009) ที่ศึกษาผลของอนุภาคซีโอไลต์ต่อสมบัติการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 325 และ 500 องศาเซลเซียส โดยได้เลือกใช้ในอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็น อนุภาคซีโอไลต์ชนิดซิลิกาอะลูมินา และอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ซึ่งพบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวามีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวในพอลิโพรพิลีน มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีจำนวนคาร์บอนที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น

3.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรและผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา โดยทดสอบด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D882 ได้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ร้อยละของการยืดตัว และยังสมอดูลัส โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการตัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา ในแนวตามเครื่องมีค่าเท่ากับ 44.6 35.4 26.5 15.7 42.8 36.5 19.4 26.7 43.0 34.5 24.3 และ 25.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และในแนวขวางเครื่องมีค่าเท่ากับ 29.3 25.7 19.5 11.6 23.5 26.1 18.5 20.9 24.1 28.8 23.6 และ 20.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 28 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาตามลำดับ

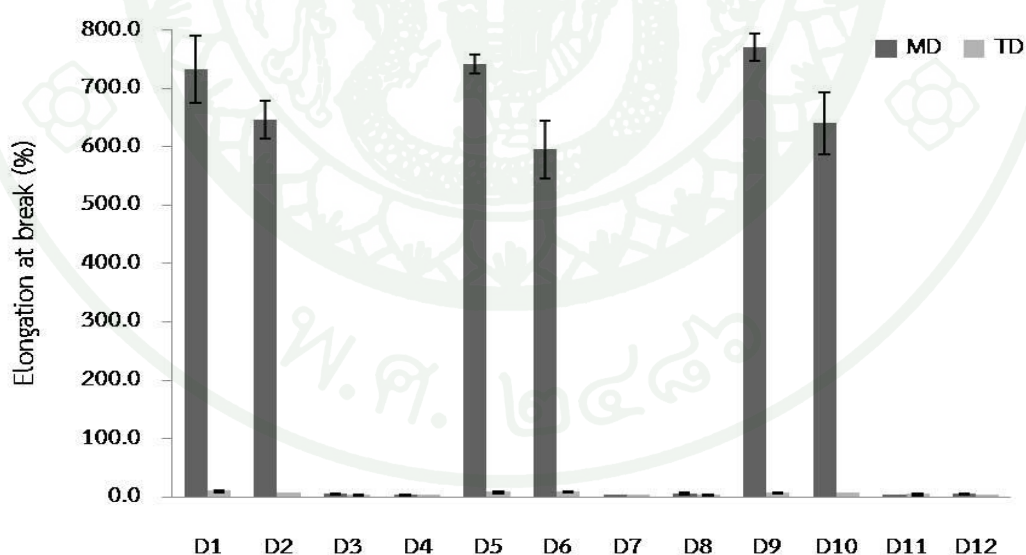
ส่งผลให้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีค่าความสามารถต่อแรงดึงลดลงตามลำดับ ทั้งในแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่อง เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีพลังงานสูงและสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดฟรีเรดิเคิลในฟิล์มพอลิโพรพิลีน จากนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นพันธะหลักของพอลิโพรพิลีน โดยจะเกิดอย่างต่อเนื่องและเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีแกมมายิ่งส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของฟรีเรดิเคิลขึ้นและมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของฟิล์มพอลิโพรพิลีน สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการตัดแปรเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีแกมมา พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีน เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งมีตำแหน่งกัมมันต์ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูง ซึ่งช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์หรือพลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของพอลิเมอร์ (Zhao *et al.*, 1996) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวามีประสิทธิภาพต่อการสลายตัวมากกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวามีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และมีการกระจายตัวดีกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนมากกว่าและส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (Dawood *et al.*, 2002) แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ปริมาณความเข้มของรังสี 100 กิโลเกรย์ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มของรังสีที่ 50 กิโลเกรย์ เนื่องจากปริมาณความเข้มของรังสีที่ปริมาณสูงอาจส่งผลต่อการเกิดพฤติกรรมแบบเชื่อมขวางของสายโซ่ (crosslinking) หรือเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ในฟิล์มพอลิโพรพิลีน โดยพลังงานจากรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของพันธะจนทำให้พันธะที่แตกตัวออกกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ และมีผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tidjani and Wilkie, 2006) ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

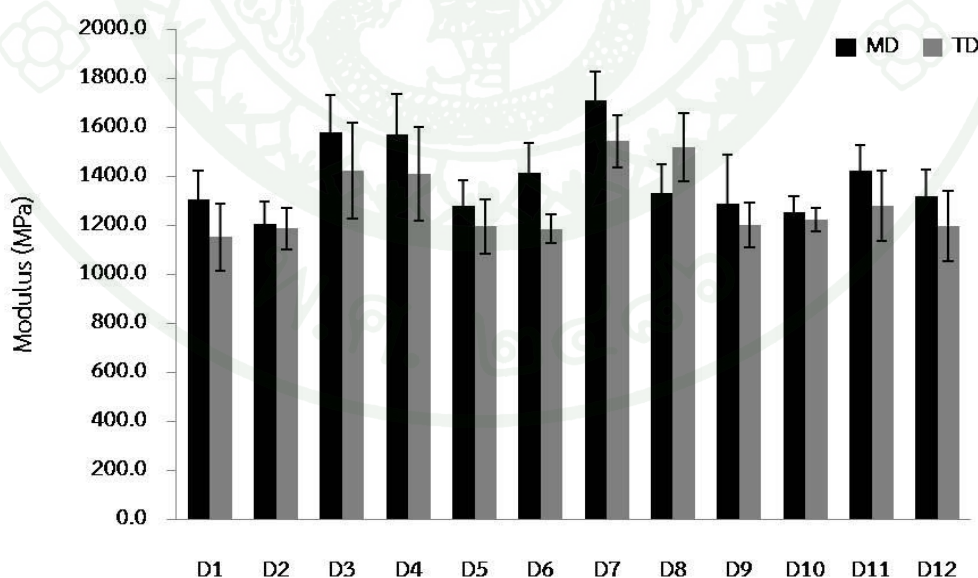
ร้อยละการยึดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการตัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา ในแนวตามเครื่องมีค่าเท่ากับร้อยละ 734.0 646.8 5.1 3.5 742.5 595.8 3.2 6.2 771.0 640.9 4.4 และ 5.0 ตามลำดับ และในแนวขวางเครื่องมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.3 7.7 3.6 3.1 8.4 8.2 3.2 3.8 7.2 6.4 4.7 และ 4.0 ตามลำดับ ดังภาพที่ 29 พบว่าค่าร้อยละการยึดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการตัดแปรมีค่าลดลง เมื่อปริมาณความเข้มของรังสีเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์ที่ปริมาณความเข้มของรังสี 10 กิโลเกรย์มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มของรังสีที่ 50 และ 100 กิโลเกรย์ เนื่องจากปริมาณความเข้มของรังสีที่ 10 กิโลเกรย์ ยังมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เป็นพันธะหลักของพอลิโพรพิลีน แต่มีผลทำให้พันธะในพอลิโพรพิลีนเกิดการเคลื่อนที่ ส่วนที่ปริมาณความเข้มของรังสี 50 และ 100 กิโลเกรย์ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีร้อยละการยึดตัวที่ลดลงอย่างชัดเจนคิดเป็นร้อยละ 99.3 และ 99.5 ตามลำดับ เนื่องจากที่ปริมาณความเข้มนี้มีพลังงานมากพอที่จะทำลายพันธะไฮโดรเจนของพอลิโพรพิลีนและมีผลทำให้ฟิล์มเกิดการฉีกขาดได้ง่าย สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการตัดแปรพบว่าที่ปริมาณความเข้มของรังสี 10 กิโลเกรย์ มีผลทำให้ร้อยละการยึดตัวของฟิล์มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มของรังสีที่ 50 และ 100 กิโลเกรย์ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็น

ชนิดซีเอสเอ็ม 5 พบว่าอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดวายเป็นร้อยละการยืดตัวน้อยกว่าอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดวายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวดีกว่าอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลงและเกิดการยืดตัวได้น้อยเนื่องจากฟิล์มมีความเปราะ ส่วนที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 50 และ 100 กิโลเกรย์ พบว่ามีร้อยละการยืดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดวายเป็นร้อยละการยืดตัวลดลงร้อยละ 99.6 และ 99.2 ตามลำดับ ส่วนฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีร้อยละการยืดตัวลดลงร้อยละ 99.4 และ 99.3 ตามลำดับ และมีค่าลดลงน้อยกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีไอโกลด์ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคซีไอโกลด์ทั้งชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวที่ดีแต่อนุภาคซีไอโกลด์ชนิดวายเป็นมีประสิทธิภาพมากกว่าอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากมีการกระจายตัวได้ดีบนเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนทำให้เกิดตำแหน่งกัมมันต์ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง แต่ที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 100 กิโลเกรย์ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีไอโกลด์ทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการดัดแปรมีร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของรังสีที่ 50 กิโลเกรย์ เนื่องจากพลังงานจากรังสีแกมมามีผลต่อการสั่นสะเทือนของพันธะและการเกิดผลึกใหม่ของฟิล์มพอลิโพรพิลีน แต่การเกิดผลึกใหม่นี้ยังไม่แข็งแรงพอจึงมีค่าร้อยละการยืดตัวที่ต่ำอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผ่านการฉายรังสีแกมมา



ภาพที่ 29 ร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีไอโกลด์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรมด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการดัดแปร และผ่าน การฉายรังสีแกมมา ในแนวตามเครื่องมีค่าเท่ากับ 1303.4 1202.7 1579.1 1570.5 1280.4 1413.5 1709.0 1330.3 1287.7 1253.0 1421.9 และ 1317.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และใน แนวขวางเครื่องมีค่าเท่ากับ 1151.4 1185.2 1422.8 1410.0 1194.3 1184.7 1542.8 1518.14 1201.1 1222.2 1278.7 และ 1196.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 พบว่าที่ปริมาณความ เข้มของรังสี 10 และ 50 กิโลเกรย์ ฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดมียังสัมมอดูลัส เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนถูกทำลายจากการฉายรังสีแกมมามีผลทำให้อนุภาค ซีโอไลต์เกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนน้อยลงและสามารถเคลื่อนตัวออกจากเมทริกซ์ ของพอลิโพรพิลีนได้ง่าย และนอกจากนั้นโครงสร้างผลึกของอนุภาคซีโอไลต์เป็นโครงสร้างร่างตาข่าย แบบสามมิติ จึงมีความแข็งแรงกว่าผลึกของพอลิโพรพิลีน ดังนั้นเมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาผลึกของ อนุภาคซีโอไลต์จึงถูกทำลายน้อยกว่าผลึกของพอลิโพรพิลีนเป็นผลทำให้ยังสัมมอดูลัสหรือค่าความแข็ง มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์สัมผัสกับแรงที่มากกว่าเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน แต่ ที่ปริมาณความเข้มของรังสี 100 กิโลเกรย์ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ ผ่านการดัดแปรมียังสัมมอดูลัสลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มของรังสีที่ 50 กิโลเกรย์ เนื่องจาก ปริมาณความเข้มของรังสีที่ 100 กิโลเกรย์ มีพลังงานที่สูงจนส่งผลทำให้โครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ เริ่มถูกทำลายและมีขนาดของอนุภาคเล็กลง ส่งผลให้ยังสัมมอดูลัสลดลงเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 30 ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

3.4 สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา

จากการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ดังตารางที่ 11 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของรังสี เนื่องจากการแตกตัวของพันธะในพอลิโพรพิลีนทำให้เกิดช่องว่างระหว่างพันธะขึ้นเป็นผลทำให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่านได้ง่ายขึ้น สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่ผ่านการดัดแปร พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 10 กิโลเกรย์ มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลง เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำยังมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการแตกตัวของพันธะในพอลิโพรพิลีนแต่มีผลทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงใหม่ โดยอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่กระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เป็นสารก่อก่อกักจึงมีผลทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของรังสี 50 กิโลเกรย์ พบว่ามีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนเมื่อรับพลังงานสูงจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดฟรีเรดิเคิลและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยิ่งกว่านั้นอนุภาคซีโอไลต์จะช่วยลดพลังงานก่อกักในพอลิโพรพิลีน จึงส่งผลทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แล้วขึ้นนั่นเอง (Zhao *et al.*, 1996; Dawood and Miura, 2002) และที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 100 กิโลเกรย์ พบว่ามีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 50 กิโลเกรย์ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของรังสีที่สูงส่งผลต่อการเกิดผลึกใหม่ในพอลิโพรพิลีน และการเกิดผลึกใหม่เป็นการขัดขวางการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนจึงส่งผลให้มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลง สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ ตามลำดับ มีผลทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของรังสี เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิดฟรีเรดิเคิลขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และก่อให้เกิดหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิก ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนเกิดสมบัติความมีขรุขระเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแก๊สออกซิเจนที่มีสมบัติความไม่ขรุขระจึงซึมผ่านได้ยากขึ้น (Klepac *et al.*, 2014)

จากการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ ดังตารางที่ 11 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมอนุภาคซีโอไลต์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของรังสี 10 และ 50 กิโลเกรย์ ตามลำดับ เนื่องจากพันธะของพอลิโพรพิลีนเกิดการแตกตัวและส่งผลต่อสมบัติความมีขรุขระจากมีสมบัติความมีขรุขระต่ำเป็นสมบัติที่มีความมีขรุขระสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ไอน้ำสามารถ

ซึมผ่านเข้าสู่เมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น แต่ที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 100 กิโลเกรย์ พบว่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลง เมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของรังสี 50 กิโลเกรย์ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของรังสีที่สูงส่งผลให้เกิดผลึกใหม่ในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนจึงเป็นการขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำ สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่ผ่านการดัดแปร พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 50 กิโลเกรย์ มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่เร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดการแตกตัวของพันธะเร็วขึ้นหรือทำให้พันธะของพอลิโพรพิลีนเกิดความไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ไอน้ำ สามารถแทรกเข้าสู่เมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้ (Ladhari *et al.*, 2010) จากการแตกตัวของพันธะในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนนี้ยังส่งผลให้เกิดการเสียรูปของช่องว่างระหว่างเมทริกซ์กับอนุภาคซีโอไลต์ โดยทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีขนาดที่กว้างขึ้นและไม่มีเป็นระเบียบ นอกจากนั้นยังส่งผลให้อนุภาคซีโอไลต์มีโอกาสสัมผัสกับไอน้ำมากขึ้น เนื่องจากเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนเกิดความอ่อนแอ โดยอนุภาคซีโอไลต์ถือว่าเป็นสารอนินทรีย์ที่มีสมบัติความมีขั้ว มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอน้ำ (Dougnaç *et al.*, 2010) ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงขึ้น แต่ที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 100 กิโลเกรย์ พบว่ามีสภาพการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อเทียบกับที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 50 กิโลเกรย์ เป็นผลมาจากการเกิดผลึกใหม่ของพอลิโพรพิลีน สำหรับฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของรังสี 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ ตามลำดับ มีผลทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของรังสี เนื่องจากการฉายรังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิดฟรีเรดิเคิลขึ้น มีผลทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิก ซึ่งทำให้โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนเกิดสมบัติความมีขั้วขึ้นและเกิดการแตกตัวของพันธะเช่นเดียวกับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่ แต่เมื่อเปรียบเทียบสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่และชนิดซีเอสเอ็ม 5 ในฟิล์มพอลิโพรพิลีน พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมากกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นที่กระจายตัวได้ดีบนเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนและทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ส่วนอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 มีพฤติกรรมเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสลดลง ส่งผลให้ไอน้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น

ตารางที่ 11 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำในฟิล์มพอลิพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์

ตัวอย่าง	ปริมาณความเข้ม ของรังสีแกมมา (kGy)	สภาพให้ซึมผ่านได้ของ แก๊สออกซิเจน (cc.mm/m ² .day.atm)	สภาพให้ซึมผ่านได้ของ ไอน้ำ (g.mil/day/m ² /atm)
พอลิพรพิลีน	0	211.6	32.0
	10	236.0	40.0
	50	206.9	53.2
	100	239.3	51.0
พอลิพรพิลีนผสม อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็น	0	219.3	37.3
	10	202.8	38.2
	50	347.2	65.0
	100	219.2	48.3
พอลิพรพิลีนผสม อนุภาคซีโอไลต์ชนิด ซีเอสเอ็ม 5	0	204.1	26.2
	10	237.0	32.5
	50	220.4	35.3
	100	206.8	39.5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ต่อสมบัติความเป็นผลึกและสมบัติทางเคมีสำหรับการนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ได้ดีกว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็ม 5 และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนี้จะส่งผลต่อการกระจายตัวและการเกิดผลึกในฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน

2. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและผ่านการดัดแปร มีสมบัติความเป็นผลึก สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลดีที่สุด โดยสมบัติความเป็นผลึกพบว่าค่าความเข้มฟลักที่ตำแหน่ง 2 เซต่า เท่ากับ 10° 15.6° และ 20.3° มีพื้นที่ใต้ฟลักสูงชันแสดงถึงความเป็นผลึก สมบัติทางกายภาพพบว่าการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคและมีขนาดของรูพรุนระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนที่สม่ำเสมอ สมบัติทางกลพบว่ามีความต้านทานต่อแรงดึงทั้งแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่องเท่ากับ 42.8 และ 23.5 เมกะปาสคาล ร้อยละการยืดตัวเท่ากับร้อยละ 742.5 และ 8.4 และยังสัมพันธ์เท่ากับ 1280.4 และ 1194.3 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและผ่านการดัดแปรมีความแข็งแรงที่สุด ซึ่งในทางเดียวจากการทดสอบสมบัติทางกลเชิงความร้อน พบว่ามีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของทั้งผลึกเบต้าและผลึกแอลฟาที่อุณหภูมิประมาณ 10 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและผ่านการดัดแปรมีประสิทธิภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำเท่ากับ $219.3 \text{ cc.mm/m}^2 \cdot \text{day.atm}$ และ $37.7 \text{ g.mil/day.m}^2 \cdot \text{atm}$ ตามลำดับ โดยมีค่ามากกว่าสูตรอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ผ่านการดัดแปรมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารและกักเก็บสารได้เป็นอย่างดี ดังนั้นฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายที่ปริมาณการผันแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและผ่านการดัดแปรมีความเหมาะสมในการเตรียมฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน

3. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสลายตัวของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ปริมาณการแผ่นแปรร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและผ่านการดัดแปรโดยฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 10 50 และ 100 กิโลเกรย์ ตามลำดับ พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็มที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 50 กิโลเกรย์ เกิดการสลายตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนได้ดีที่สุด โดยพบว่าสมบัติทางเคมีที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1170 และ 1153 cm^{-1} เกิดการลดลงของสเปกตรัมอย่างชัดเจน เนื่องจากพันธะของพอลิโพรพิลีนถูกทำลาย สมบัติทางกายภาพพบว่าผิวหน้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีความเรียบและตื้นขึ้น สมบัติทางกลพบว่ามีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทั้งแนวตามเครื่องและแนวขวางเครื่องเท่ากับ 19.4 และ 18.5 เมกะปาสคาล ร้อยละการยืดตัวเท่ากับร้อยละ 3.2 และ 3.2 และยังสัมพันธ์กับ 1709.0 และ 1542.8 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่าอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวที่ดีและการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณความเข้มเท่ากับ 50 กิโลเกรย์เป็นความเข้มที่เพียงพอและมีประสิทธิภาพในการสลายฟิล์มพอลิโพรพิลีน ในทางเดียวกันพบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็มที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 50 กิโลเกรย์ มีสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำสูงที่สุด โดยมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ $347.2 \text{ cc.mm/m}^2.\text{day.atm}$ และมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ $65.0 \text{ g.ml/day/m}^2/\text{atm}$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพันธะของพอลิโพรพิลีนถูกทำลายและเกิดช่องว่างมากขึ้นระหว่างอนุภาคซีโอไลต์กับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน ดังนั้นฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็มที่ปริมาณความเข้มของรังสีเท่ากับ 50 กิโลเกรย์ มีความเหมาะสมต่อสภาวะการสลายตัวด้วยรังสีแกมมาของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน

ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับงานวิจัยนี้สามารถต่อยอดและนำไปใช้ประโยชน์กับการบรรจุผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เนื่องจากฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงและมีสมบัติการดูดซับแก๊สที่ดี ดังนั้นในการใช้งานจริงของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีนควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านของสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น เพื่อควบคุมปัจจัยดังกล่าวให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

2. ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาถึงสมบัติการสลายตัวของฟิล์มแอคทีฟพอลิโพรพิลีน ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติต่างๆ ลดลงและง่ายต่อการสลายตัว ซึ่งการสลายตัวของฟิล์มพลาสติกนี้จะเกิดผลพลอยได้ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานได้ เช่น สารประกอบไฮโดรเจน ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านการนำสิ่งเหลือใช้ไปก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. การบรรจุอาหาร (Food Packaging). พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ บริษัท เอส.พี.เอ็ม, กรุงเทพฯ.

เจริญ นาคะสรรค์. 2547. กระบวนการแปรรูปพลาสติก (Plastic processing). พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์โพธิ์เพชร, กรุงเทพฯ.

ดวงฤทัย อารังโชติ. 2550. เทคโนโลยีภาชนะบรรจุ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ตะวัน สุขน้อย. ม.ป.ป. เอกสารคำสอน วิชาซีโอไลต์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง (Zeolites and Related Microorous Materials). ม.ป.ท

พรชัย ราชตะนະพันธุ์. 2552. บรรจุภัณฑ์สำคัญไฉน. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วนิดาการพิมพ์, เชียงใหม่.

วิริยะ ทองเรือง. 2554. วิศวกรรมพอลิเมอร์ (Polymer Engineering). พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ หน่วยเทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2544. พลาสติก 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์บริษัท สยามสปอร์ต ซินดิเคท จำกัด, กรุงเทพฯ.

สินธนา ลีนานุรักษ์. 2535. เอกสารประกอบคำสอน วิชาการแปรรูปผักและผลไม้ (Fruit and Vegetable Processing). ม.ป.ท

สมพงษ์ เพื่องอารมย์. 2550. บรรจุภัณฑ์กับการส่งออก (Export Packaging). พิมพ์ครั้งที่ 1. จามจุรีโปรดักท์, กรุงเทพฯ.

อรอุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อโนดาซ์ รัชเวทย์. 2552. **พอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ดวงกมลพับลิชชิง, กรุงเทพฯ.

Biswas, J., H. Kim, S. Choe. P. P. Kundu, Y. H. Park and D. S. Lee. 2003. Linear Low Density Polyethylene (LLDPE)/Zeolite Microporous Composite Film. **Macro molecular Research**, 11, 5, 357-367.

_____, _____, C. S. Yim, J. Cho, G. J. Kim and S. Choe. 2004. Structural Effects on the Tensile and Morphological Properties of Zeolite-filled Polypropylen Derivative Composites. **Macromolecular Research**, 12, 5, 443-450.

Bernstein, R., S. M. Thornberg , R. A. Assink , D. M. Mowery, M. K. Alam, A. N. Irwin, J. M. Hochrein, D. K. Derzon , S. B. Klamo and R. L. Clough. 2007. Insights into oxidation mechanisms in gamma-irradiated polypropylene, utilizing selective isotopic labeling with analysis by GC/MS, NMR and FTIR. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 265, 8–17.

Chiu, S. J. 2009. Effects of Zeolite on the Catalytic Degradation of Polypropylene. *In* **The 5th ISFR**. 11-14 October 2009. Chengdu, China.

Dawood, A and K. Miura. 2002. Catalytic pyrolysis of γ -irradiated polypropylene (PP) over HY-zeolite for enhancing the reactivity and the product selectivity. **Polymer Degradation and Stability**, 76, 45–52.

Dikobe, D. G., A. S. Luyt. 2009. Morphology and properties of polypropylene/ethylene vinyl acetate copolymer/wood powder blend composites. **eXPRESS Polymer Letters**, 3, 3, 190–199.

Domagala, U. W. 2012. The Use of the Spectrometric Technique FTIR-ATR to Examine the Polymers Surface, pp. 85-104. *In* M. A. Farrukh., Ed. **Advanced Aspects of Spectroscopy**. InTech, Croatia.

- Dougnac, V.N., R. Alamillo, B. C. Peoples and R. Quijada. 2010. Effect of particle diameter on the permeability of polypropylene/SiO₂ nanocomposites. **Polymer**, 51, 2918-2926
- Fukui, K., K. Kanayama, T. Yamamoto and H. Yoshida. 2006. Effects of microwave irradiation on the crystalline phase of zeolite synthesized from fly ash by hydrothermal treatment. **Advanced Powder Technol**, 18, 381-393.
- Georgiev, D., B. Bogdanov, K. Angelova and I. Markovska. 2009. Synthetic Zeolites- Structure, Clasification, Current Trends in Zeolite Synthesis, vol 7, pp. 1-5. *In International Science conference on Economics and Society development on the Base of Knowledge*. 4-5 June 2009. Bulgaria.
- Htun, M. M. H., M. M. Htay and M. Z. Lwin. 2012. Preparation of Zeolite (NaX, Faujasite) from Pure Silica and Alumina Sources, pp. 15-16. *In International Conference on Chemical Processes and Environmental issues (ICCEEI'2012)*. 15-16 July 2012. Singapore.
- Jiang, J., G. Li, N. Tanb, Q. Dinga, and K. Maia. 2012. Crystallization and melting behavior of isotactic polypropylene composites filled by zeolite supported- β nucleator. **Thermochimica Acta**, 546, 127– 133.
- _____, Y. Yang, C. Duanmu, Y. Xu, L. Feng, X. Gu and J. Chen. 2012. Preparation of hollow ZSM-5 crystals in the presence of polyacrylamide. **Microporous and Mesoporous Materials**, 163, 11-20.
- Kim, K. J. and H. G. Ahn. 2011. The effect of pore structure of zeolite on the adsorption of VOCs and their desorption properties by microwave heating. **Microporous and Mesoporous Materials**, 152, 78–83.

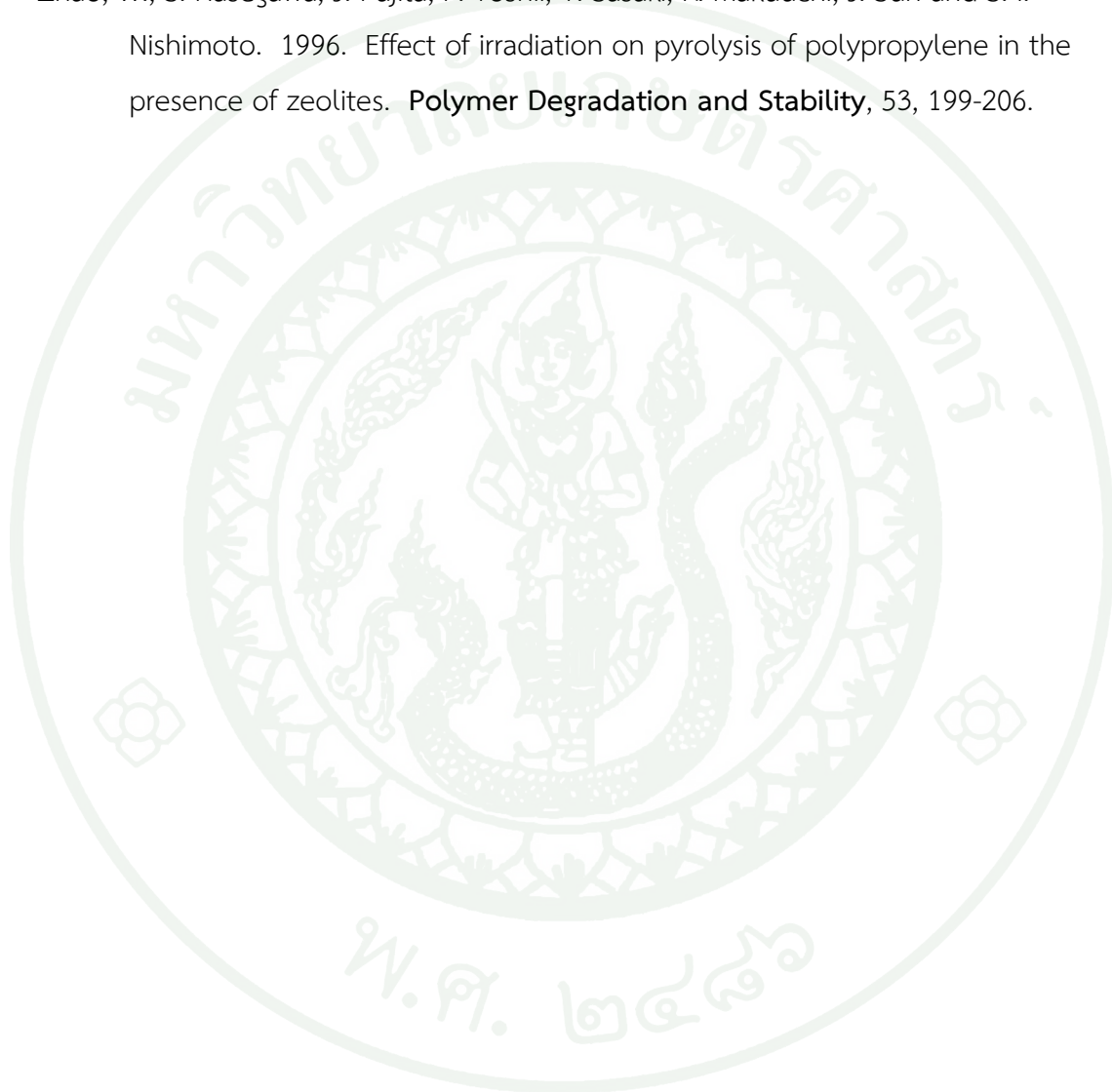
- Klepac, Damir., M. Ščetar, G. Baranović, K. Galić and S. Valić. 2014. Influence of high doses γ -irradiation on oxygen permeability of linear low density polyethylene and castpolypropylene films. **Radiation Physics and Chemistry**, 97, 304–312.
- Ladhari, A., H. B. Daly, H. Belhadjsalah, K. C. Cole and J. Denault. 2010. Investigation of water absorption in clay-reinforced polypropylene nanocomposites. **Polymer Degradation and Stability**, 95, 429-439.
- Leng, J.h., H. Liu, B. He, B. Yang, X. Chen and Q. Qin. 2013. Combined Effect of Modified Zeolite 13X and β -nucleating Agent on Improving β -crystal Content and Toughening Polypropylene Randow Copolymer. *Chinese Journal of Polymer Science*, 31, 11, 1563–1578.
- Li, G. 2005. **FT-IR studies of zeolite materials: characterization and environmental applications**. Ph.D. diss., University of Iowa.
- Lobo R. F. 2003. Introduction to the Structural Chemistry of Zeolites, pp. 65-89. *In* S. M. Auerbach, K. A. Carrado and P. K. Dutta., eds. **Handbook of Zeolite Science and Technology**. Marcel Dekker Inc., USA.
- Lopez, A., I. de Marco, B.M. Caballero, M.F. Laresgoiti, A. Adrados and A. Aranzabal. 2011. Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud. **Applied Catalysis B: Environmental**, 104, 211–219.
- López-Manchado, M. A. and M. Arroyo. 2000. Thermal and dynamic mechanical properties of polypropylene and short organic fiber composites. **Polymer**, 41, 7761–7767.

- Luyt, A. S., M. D. Dramićanin, Ž. Antić and V. Djoković. 2009. Morphology, mechanical and thermal properties of composites of polypropylene and nanostructured wollastonite filler. **Polymer Testing**, 28, 348-356.
- Lv, Z., K. Wang, Z. Qiao and W. Wang. 2010. The influence of modified zeolites as nucleating agents on crystallization behavior and mechanical properties of polypropylene. **Materials and Design**, 31, 3804-3809.
- _____, C. Hu, J. Xue and T. Dou. 2008. Effect of Zeolite 5A on the Crystalline Behavior of Polypropylene (PP) in PP/ β -Nucleating Agent System. **Polymer Composites**, 29, 12, 1291-1296.
- Ozmihci, F., D. Balkose and S. Ulku. 2001. Natural zeolite polypropylene composite film preparation and characterization. **Journal of Applied Polymer Science**, 82, 2913-2921.
- Pehlivan, H., D. Balkose, S. Ulku and F. Tihminlioglu. 2005. Characterization of pure and silver exchanged natural zeolite filled polypropylene composite films. **Composites Science and Technology**, 65, 2049-2058.
- _____, F. Ozmihci, F. Tihminlioglu, D. Balkose and S. Ulku. 2003. Water and Water Vapor Sorption Studies in Poly(propylene)-Zeolite Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, 90, 352-359.
- Ren, N., Z. J. Yang, X. C. Lv, J. Shi, Y. H. Zhang and Y. Tang. 2010. A seed surface crystallization approach for rapid synthesis of submicron ZSM-5 zeolite with controllable crystal size and morphology. **Microporous and Mesoporous Materials**, 131, 103-114.

- Seo, S. M., E. Y. Chun, D. Y. Chung and W. T. Lim. 2013. Single-crystal structures of fully and partially dehydrated zeolite Y (FAU, Si/Al = 1.56) largely Co^{2+} exchanged at pH 5.1. **Microporous and Mesoporous Materials**, 170, 67–74.
- Stevens, E.S. 2002. **Green Plastics : an introduction to the new science of bio degradable plastic**. Princeton University Press, the United States of America.
- Tabatabaei, H. S., P. J. Carreau and A. Ajji. 2009. Effect of processing on the crystalline orientation, morphology, and mechanical properties of poly propylene cast films and microporous membrane formation. **Polymer**, 50, 4228–4240.
- Tidjani, A., C. A. Wilkie. 2006. TGA Analysis of γ -Irradiated Linear Low-Density Poly ethylene. **Journal of Applied Polymer Science**, 100, 2790–2795.
- Van der Gaag, F.J. 1987. **ZSM-5 type zeolites: Synthesis and use in gasphase reactions with ammonia**. Ph.D. diss., Bibliotheek Technische Universiteit, Netherlands.
- Xiao, Q., Q. Yao, J. Zhuang, G. Liu, Y. Zhong and W. Zhu. 2013. A localized crystallization to hierarchical ZSM-5 microspheres aided by silane coupling agent. **Journal of Colloid and Interface Science**, 394, 604–610.
- Yi, H., H. Deng, X. Tang, Q. Yu, X. Zhou and H. Liu. 2012. Adsorption equilibrium and kinetics for SO_2 , NO , CO_2 on zeolites FAU and LTA. **Journal of Hazardous Materials**, 203– 204, 111– 117.
- Yin, H., T. Zhou, Y. Liu, Y. Chai and C. Liu. 2012. Synthesis of high-quality nano crystalline zeolite Y using pseudoboehmite as aluminum source. **J Porous Mater**, 19, 277–281.

Zhang, H., Y. Maa, K. Song , Y. Zhang and Y. Tang. 2013. A localized crystallization to hierarchical ZSM-5 microspheres aided by silane coupling agent. **Journal of Colloid and Interface Science**, 394, 604–610.

Zhao, W., S. Hasegawa, J. Fujita, F. Yoshii, T. Sasaki, K. Makuuchi, J. Sun and S. I. Nishimoto. 1996. Effect of irradiation on pyrolysis of polypropylene in the presence of zeolites. **Polymer Degradation and Stability**, 53, 199-206.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การดัดแปรพันธุกรรมพืชไร่ชนิดข้าวและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

นำสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก มาทำการปรับปริมาตรให้มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. ดัดแปรพื้นผิวของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

2.1 เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ที่ปริมาณ 10 กรัม ในสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

2.2 ผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ในสารละลายเอทานอลที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 โดยมีอัตราส่วนร้อยละ 1:0.3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)}} \times 100$$

2.3 นำอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรมาอบด้วยตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 300 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอด้วยโกร่ง และนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนก่อนนำไปผสมขึ้นรูปกับเม็ดพลาสติกในขั้นตอนต่อไป

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคและฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

พ.ศ. ๒๕๕๖

1. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรกับผงโพแทสเซียมโบไมด์ (KBr) โดยใช้อัตราส่วน 1:100 ใช้ตัวอย่างที่ปริมาณ 1-3 มิลลิกรัม

1.2 บดตัวอย่างแล้วอัดให้เป็นแผ่นโดยใช้ความดัน 10 ตันต่อตารางนิ้ว

1.3 นำตัวอย่างใส่ในแผ่นใส่ตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดในช่วงคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 16 ครั้ง และความละเอียด 4.0 cm^{-1} โดยใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T)

1.4 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็นร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wave number)

2. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

2.1 เตรียมตัวอย่าง โดยตัดฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอโลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร

2.2 นำตัวอย่างไปใส่ในแผ่นใส่ตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดในช่วงคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 16 ครั้ง และความละเอียด 4.0 cm^{-1} โดยใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance)

2.3 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็น ร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wave number)



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคและฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววาย และชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1. ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1.1 ใส่อนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรในแผ่นแก้วสำหรับใส่ตัวอย่าง ประมาณ 2 กรัม จากนั้นนำเข้าเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา

1.2 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2. ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

2.1 เตรียมตัวอย่างโดยการตัดฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ให้มีขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร จากนั้นนำเข้าเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการสแกนในช่วง 5 ถึง 40 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา

2.2 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง



ภาคผนวก ง

การเตรียมและการขึ้นรูปฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรรูปและไม่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ผ่านกระบวนการเป่าฟิล์ม

1. การเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดว้ายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1.1 นำเม็ดพอลิโพรพิลีน (polypropylene pellets) เกรด EL-PRO P600F ซึ่งมี Melt flow rate (230°C, 2.16 kg) 10.00 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 0.910 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มาผสมกับอนุภาคซีโอไลต์ชนิดว้ายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปร ตามอัตราส่วนดังตารางผนวกที่ ง1 แล้วเขย่าให้เข้ากัน

ตารางผนวกที่ ง1 อัตราส่วนระหว่างเม็ดพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคซีโอไลต์ ในหน่วยกรัม

ตัวอย่าง	พอลิโพรพิลีน	ซีโอไลต์ว้าย	ซีโอไลต์ว้าย ที่ผ่านการตัดแปร	ซีโอไลต์ ซีเอสเอ็ม 5	ซีโอไลต์ซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปร
P1	2000	-	-	-	-
P2	2000	20	-	-	-
P3	2000	60	-	-	-
P4	2000	100	-	-	-
P5	2000	-	20	-	-
P6	2000	-	60	-	-
P7	2000	-	100	-	-
P8	2000	-	-	20	-
P9	2000	-	-	60	-
P10	2000	-	-	100	-
P11	2000	-	-	-	20
P12	2000	-	-	-	60
P13	2000	-	-	-	100

1.2 นำไปผสมทำเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ได้เป็นเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์

2. การขึ้นรูปฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

2.1 นำเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 นำเม็ดพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส ปรับความแรงลมให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 30 ± 2 ไมโครเมตร

2.3 ฟิล์มที่ได้จากการเป่าฟิล์ม ควรเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ



ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่าน
การตัดแปรรและไม่ผ่านการตัดแปรรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1. วิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปร ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร จากนั้นจุ่มในไตรเจนเหลว และฉีกฟิล์มตัวอย่างอย่างรวดเร็ว

1.2 ใช้เทปกาวคาร์บอนติดที่ด้านบนของฐานวางตัวอย่าง (specimen stub) จากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างติดลงบนเทปกาวคาร์บอน

1.3 นำฐานวางตัวอย่างที่ติดฟิล์มตัวอย่างไปผ่านการฉาบผิวด้วยทองคำภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้ทองคำเปลี่ยนสภาพเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความสามารถในการนำไฟฟ้าก่อนนำไปวิเคราะห์

1.4 นำตัวอย่างเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บันทึกภาพตัวอย่างและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

2. การทดสอบสมบัติเชิงกลฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร จากนั้นทดสอบ ด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชีน โดยใช้มาตรฐาน ASTM D882

2.2 เปิดเครื่องทดสอบแล้วปรับระยะที่หนีบตัวอย่างให้อยู่ที่ระยะ 50 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึงที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

2.3 ใส่ตัวอย่างในเครื่องทดสอบ ปรับสกรูให้แน่น

2.4 เลือกค่าและหน่วยที่ต้องการ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa) ยังสัมมอดูลัส (MPa) และร้อยละการยืดตัว จากนั้นปรับค่าแรงดึงและค่าการคลาดเคลื่อนให้เท่ากับศูนย์ และกดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ

2.5 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

3. การทดสอบสมบัติทางกลเชิงความร้อนฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

3.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000 ให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร

3.2 ใส่ตัวอย่างในเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลเทอร์มอลอะนาไลซิส จากนั้นปรับตั้งค่าข้อมูลที่ต้องการ โดยทำการทดสอบแบบดึง (tension) ควบคุมอุณหภูมิการให้ความร้อนคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก -50 องศาเซลเซียส ถึง 120 องศาเซลเซียส ใช้ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ แรงแบบสถิต (static) 0.5 นิวตัน และแรงแบบพลวัต (dynamic) 0.2 นิวตัน โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

3.3 กดปุ่มเพื่อเริ่มทดสอบ

3.4 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

4. การทดสอบสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

4.1 การทดสอบสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

4.1.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาของตัวอย่างก่อนและใส่ตัวอย่างในแผ่นสติ๊กเกอร์อลูมิเนียมที่มีการเจาะรูเป็นวงกลมโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร

4.1.2 กดปุ่ม start ที่เครื่องทดสอบ รอผลประมาณ 1 ชั่วโมง 15 นาที

4.1.3 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

4.1.4 สามารถคำนวณสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนตามสูตรด้านล่าง

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

โดย

OP	=	สภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
OTR	=	อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
ΔX	=	ความหนาของฟิล์ม
ΔP	=	ค่าความแตกต่างของความดัน
5	=	อัตราส่วนของพื้นที่การแพร่ผ่านแก๊สออกซิเจนของเครื่องต่อพื้นที่ของตัวอย่าง

4.2 การทดสอบสภาพการซึมผ่านของไอน้ำ

4.2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร ขนาด 70 x 70 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาของตัวอย่างก่อน

4.2.2 อบเม็ดซิลิกาด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเทซิลิกาปริมาณ 20 กรัมลงในถ้วยอะลูมิเนียม และปิดผนึกฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาค

ซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปรลงบนถ้วยอะลูมิเนียมด้วยพาราฟิน

4.2.3 ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมที่มีฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง โดยชั่งที่เวลาเดิมของทุกวัน จนน้ำหนักมีค่าคงที่

4.2.4 เก็บถ้วยอะลูมิเนียมในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 23 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50

4.2.5 สามารถคำนวณค่าการซึมผ่านของไอน้ำตามสูตรด้านล่าง

$$WVP = \frac{W \times X}{A \times t \times (P_2 - P_1)}$$

$$P_2 - P_1 = S(R_1 - R_2)$$

โดย

WVP = สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

W = น้ำหนักของถ้วย

x = ความหนาของฟิล์ม

A = พื้นที่ที่ไอน้ำซึมผ่าน

t = เวลา

$P_2 - P_1$ = ความแตกต่างของความดันไอน้ำทั้งสองด้านของฟิล์มที่อุณหภูมิทดสอบ

S = ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ยังยวดยที่ 30 องศาเซลเซียส

R_1 = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ ด้านในถ้วยทดสอบ

R_2 = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ ด้านนอกถ้วยทดสอบ



ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

1. ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรรและไม่ผ่านการตัดแปรรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตารางผนวกที่ ฉ1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรรและไม่ผ่านการตัดแปรรพอลิเอทิลีนไกลคอล4000

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)	
	แนวตามเครื่อง	แนวขวางเครื่อง
P1	44.6 ^{de} ±2.9	29.3 ^f ±1.8
P2	38.8 ^a ±2.2	16.0 ^a ±2.8
P3	43.4 ^{de} ±2.1	27.0 ^e ±2.0
P4	39.8 ^{ab} ±3.2	27.2 ^e ±1.7
P5	42.2 ^{bcd} ± 3.0	27.5 ^{ef} ±2.2
P6	42.8 ^{cde} ±1.2	23.5 ^{cd} ±0.9
P7	43.4 ^e ±2.9	24.4 ^d ±1.8
P8	48.9 ^f ±2.6	21.4 ^b ±2.0
P9	40.0 ^{abc} ±1.5	24.4 ^d ±1.1
P10	42.0 ^{bc} ±2.0	27.0 ^e ±1.4
P11	44.5 ^{de} ±1.9	22.0 ^{bc} ±1.8
P12	43.0 ^{cde} ±2.3	24.1 ^{cd} ±1.8
P13	42.1 ^{bcd} ±4.6	21.1 ^b ±2.9

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

2. ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรรูปและไม่ผ่านการตัดแปรรูปพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตารางผนวกที่ ๑2 ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรรูปและไม่ผ่านการตัดแปรรูปพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการยืดตัว (ร้อยละ)	
	แนวตามเครื่อง	แนวขวางเครื่อง
P1	734.0 ^{bc} ± 57.6	10.3 ^a ± 1.7
P2	740.0 ^{bc} ± 30.0	58.8 ^b ± 38.6
P3	696.8 ^{ab} ± 36.0	18.0 ^a ± 6.9
P4	679.7 ^a ± 81.4	13.5 ^a ± 1.6
P5	672.8 ^a ± 65.4	16.2 ^a ± 5.2
P6	742.5 ^{bc} ± 16.2	8.4 ^a ± 1.4
P7	735.1 ^{bc} ± 35.9	16.3 ^a ± 5.0
P8	801.1 ^d ± 23.0	57.6 ^b ± 30.0
P9	754.0 ^c ± 25.7	15.8 ^a ± 4.5
P10	745.0 ^{bc} ± 30.6	11.2 ^a ± 4.0
P11	784.6 ^{cd} ± 44.1	21.9 ^a ± 11.5
P12	771.0 ^{cd} ± 23.9	7.2 ^a ± 0.4
P13	764.1 ^{cd} ± 25.2	17.8 ^a ± 4.7

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

3. ค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตารางผนวกที่ ๓3 ค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดววายและชนิดซีเอสเอ็ม ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตัวอย่าง	ค่ามอดูลัส (เมกะปาสคาล)	
	แนวตามเครื่อง	แนวขวางเครื่อง
P1	1303.4 ^{cd} ±120.1	1151.4 ^b ±137.1
P2	1021.1 ^a ±156.9	899.5 ^a ±129.8
P3	1265.7 ^{cd} ±94.2	1211.1 ^b ±119.6
P4	1306.0 ^{cd} ±225.0	1210.3 ^b ±159.2
P5	1381.5 ^{de} ±121.6	1152.0 ^b ±93.4
P6	1280.4 ^{cd} ±101.7	1194.3 ^b ±110.5
P7	1463.1 ^e ±104.8	1164.1 ^b ±119.3
P8	1140.1 ^{abc} ±96.9	885.0 ^a ±76.2
P9	1157.3 ^{abc} ±101.0	1188.9 ^b ±119.8
P10	1273.3 ^{cd} ±86.7	1271.7 ^b ±95.5
P11	1084.0 ^{ab} ±186.4	1007.0 ^a ±201.8
P12	1287.7 ^{cd} ±201.2	1224.2 ^b ±108.1
P13	1224.1 ^{bcd} ±185.3	1005.5 ^a ±122.0

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

4. สภาพการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตารางผนวกที่ ๑4 สภาพการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตัวอย่าง	สภาพการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (cc.mm/m ² .day.atm)
P1	211.6 ^{bcd} ±12.0
P2	212.0 ^{bcd} ±2.8
P3	206.5 ^{abc} ±14.0
P4	193.0 ^a ±14.5
P5	227.6 ^d ±4.0
P6	219.3 ^{cd} ±4.7
P7	226.8 ^d ±8.8
P8	226.9 ^d ±13.6
P9	205.4 ^{abc} ±3.7
P10	200.7 ^{ab} ±4.5
P11	201.3 ^{ab} ±4.6
P12	204.1 ^{abc} ±8.3
P13	198.4 ^{ab} ±1.7

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

5. สภาพการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตารางผนวกที่ ๑5 สภาพการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรพอลิเอทิลีนไกลคอล 4000

ตัวอย่าง	สภาพการซึมผ่านไอน้ำ (g.mil/day/m ² /atm)
P1	31.7 ^{abc} ±1.1
P2	34.7 ^{cde} ±2.3
P3	29.6 ^{ab} ±2.9
P4	27.5 ^{ab} ±0.8
P5	32.6 ^{bcd} ±3.0
P6	37.7 ^{de} ±3.2
P7	40.0 ^e ±8.7
P8	26.5 ^a ±1.0
P9	26.1 ^a ±1.9
P10	33.9 ^{cd} ±5.5
P11	39.8 ^e ±6.0
P12	26.2 ^a ±1.1
P13	27.7 ^{ab} ±1.1

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

6. ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรรและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ ๖6 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรร และผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)	
	แนวตามเครื่อง	แนวขวางเครื่อง
D1	44.6 ^f ± 2.9	29.3 ^e ± 1.8
D2	35.4 ^e ± 1.9	25.7 ^{cd} ± 1.6
D3	26.5 ^{cd} ± 1.8	19.5 ^b ± 3.4
D4	15.7 ^a ± 3.3	11.6 ^a ± 3.0
D5	42.8 ^f ± 1.2	23.5 ^c ± 0.9
D6	36.5 ^e ± 1.7	26.1 ^d ± 1.3
D7	19.3 ^b ± 2.0	18.5 ^b ± 3.8
D8	26.7 ^d ± 2.4	20.9 ^b ± 1.9
D9	43.0 ^f ± 2.3	24.1 ^{cd} ± 1.8
D10	34.5 ^e ± 2.0	28.8 ^e ± 1.1
D11	24.3 ^c ± 2.1	23.4 ^c ± 1.7
D12	25.9 ^{cd} ± 2.1	20.6 ^b ± 2.1

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

7. ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ ๗7 ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการดัดแปร และผ่านการฉายรังสีแกมมา 4000

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการยืดตัว (ร้อยละ)	
	แนวตามเครื่อง	แนวขวางเครื่อง
D1	734.0 ^d ± 57.6	10.3 ^f ± 1.7
D2	646.8 ^c ± 32.3	7.7 ^{de} ± 0.4
D3	5.1 ^a ± 0.8	3.6 ^a ± 0.3
D4	3.5 ^a ± 0.4	3.1 ^a ± 0.3
D5	742.5 ^{cd} ± 16.2	8.4 ^e ± 1.4
D6	595.8 ^b ± 49.5	8.1 ^e ± 0.8
D7	3.2 ^a ± 0.1	3.2 ^a ± 0.1
D8	6.2 ^a ± 1.1	3.8 ^{ab} ± 0.8
D9	771.0 ^e ± 23.9	7.2 ^{cd} ± 0.4
D10	640.9 ^c ± 53.3	6.4 ^c ± 0.7
D11	4.4 ^a ± 0.6	4.7 ^b ± 1.3
D12	5.0 ^a ± 0.6	4.0 ^{ab} ± 0.5

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

8. ค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ ๘8 ค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายและชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปร และผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	ค่ามอดูลัส (เมกะปาสคาล)	
	แนวตามเครื่อง	แนวขวางเครื่อง
D1	1303.4 ^{abc} ±120.1	1151.4 ^a ±137.1
D2	1202.7 ^a ±93.5	1185.2 ^a ±85.3
D3	1579.1 ^d ±154.4	1422.8 ^c ±197.3
D4	1570.5 ^d ±167.3	1410.0 ^{bc} ±191.1
D5	1381.5 ^{bc} ±121.6	1194.3 ^a ±110.5
D6	1413.5 ^c ±122.6	1184.7 ^a ±58.8
D7	1709.0 ^e ±116.7	1542.8 ^c ±106.8
D8	1330.3 ^{abc} ±116.7	1518.1 ^c ±140.3
D9	1287.7 ^{abc} ±201.2	1201.1 ^{ab} ±93.0
D10	1253.0 ^{ab} ±66.8	1185.2 ^a ±85.3
D11	1421.9 ^c ±105.4	1278.7 ^{ab} ±143.8
D12	1317.9 ^{abc} ±110.4	1196.2 ^a ±142.1

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

9. สภาพการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรรูปและผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตารางผนวกที่ ๑๑ สภาพการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มพอลิโพรพิลีนผสมอนุภาคซีโอไลต์ชนิดวายเป็นชนิดซีเอสเอ็ม 5 ที่ผ่านการตัดแปรรูป และผ่านการฉายรังสีแกมมา

ตัวอย่าง	สภาพการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (cc.mm/m ² .day.atm)	สภาพการซึมผ่านไอน้ำ (g.mil/day/m ² /atm)
D1	211.6 ^a ±12.0	32.0 ^{ab} ±1.2
D2	236.0 ^a ±8.4	40.0 ^b ±1.6
D3	206.9 ^a ±19.2	53.2 ^c ±5.0
D4	239.3 ^a ±14.0	51.0 ^c ±8.5
D5	219.3 ^a ±4.7	37.3 ^b ±2.9
D6	202.8 ^a ±2.9	38.2 ^b ±2.5
D7	347.2 ^b ±131.4	65.0 ^e ±14.5
D8	219.2 ^a ±12.2	48.3 ^c ±4.5
D9	204.1 ^a ±8.3	26.2 ^a ±1.0
D10	237.0 ^a ±8.8	31.5 ^{ab} ±5.2
D11	220.4 ^a ±3.4	35.3 ^b ±3.0
D12	206.8 ^a ±20.2	39.5 ^b ±0.7

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

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวฐิติมา สระมณี
เกิดวันที่	19 กันยายน 2532
สถานที่เกิด	พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีการบรรจุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	<i>Sramanee, T., S. Panuwat, D. Atong and C. Pechyen. 2014. Structural Effects of Modified Zeolite on Mechanical and Oxygen Permeability Properties of Polypropylene Film. In Proceedings of The 16th Food Innovation Asia Conference 2014. 12 -13 June 2014, Bitec Bangna, Bangkok, Thailand.</i> Pradittham, A., S. Trejitwattanaku, <i>T. Sramanee</i>, S. Thanakkasaranee, D. Atong and C. Pechyen. 2012. Preparathion of LLDPE/Modified Silica Nano particle with Triethoxyvinylsilane Film for Micro waveable Packaging. <i>Advanced Materials Research</i>, 488-489, 1525.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุน “โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2555 ทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่าในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ ระดับบัณฑิต

วิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี
งบประมาณ 2557

ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา สำนักงาน
คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2557

