

การพัฒนาฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียม
Development of Polymeric Film for Colostomy Bag

นันทยา จันทร์สุข
Nantaya Junsook

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวาร
 เทียม
 ผู้เขียน นางสาวนันทยา จันทรสุข
 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร.วรศักดิ์ เพชรวโรทัย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล)

.....
 (นายแพทย์วรวิทย์ วาณิชย์สุวรรณ)

.....กรรมการ
 (นายแพทย์วรวิทย์ วาณิชย์สุวรรณ)

.....กรรมการ
 (ดร.ต่อศักดิ์ กิตติกรรม)

.....กรรมการ
 (ดร.อศิรา เฟื่องฟูชาติ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับ
 นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความ
ขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตน์กุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวนันทยา จันทร์สุข)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวนันทยา จันทร์สุข)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวาร เทียม
ผู้เขียน	นางสาวนันทยา จันท์สุข
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ชนิดเทรพทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ชนิดเอทีปริมาณ 6 ร้อยละโดยน้ำหนัก ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว เป้าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่ความหนาระหว่าง 0.05 ถึง 0.06 มิลลิเมตร และ 0.09 ถึง 0.10 มิลลิเมตร ตรวจสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) และเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA) ประสบความสำเร็จในการดัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์ด้วย PEG ซึ่งยืนยันจากการปรากฏหมู่ฟังก์ชันของ PEG บนอนุภาคซีโอไลต์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE พบว่าการเติมซีโอไลต์ที่ปริมาณ 6 ร้อยละโดยน้ำหนัก ส่งผลให้ความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มสูงขึ้น ในขณะที่การเติมซีโอไลต์ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ 4 ชนิด ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซออกซิเจน (O₂) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) และก๊าซมีเทน (CH₄) พบว่าฟิล์ม LDPE มีการซึมผ่านของก๊าซ O₂ และ N₂ ในขณะที่ฟิล์ม PBAT มีการซึมผ่านของก๊าซ CO₂ และ O₂ โดยมีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ที่ความหนา 0.09-0.10 มิลลิเมตร ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซทุกชนิด การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมซีโอไลต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว โดยฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์ที่ความหนา 0.05-0.06 มิลลิเมตร และ 0.09-0.10 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่

ฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมซิลโอไซด์ทั้งสองช่วงความหนา มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกัน

Thesis title	Development of polymeric film for colostomy bag
Author	Miss Nantaya Junsook
Major Programs	Polymer Science and Technology
Academic Year	2014

Abstract

The aims of this work are to prepare and study the properties of polymeric film of low density polyethylene (LDPE) and poly butylene adipate-co- terephthalate (PBAT) with and without the addition of 6 wt% zeolite A. The zeolite was surface treated by polyethylene glycol (PEG). Polymer compounds were prepared by twin screw extruder. The tubular blown films with the thickness of 0.05-0.06 mm and 0.09-0.10 mm were processed by a single screw extruder equipped with the film blowing apparatus. The tensile properties, tear strength and gas permeation of CO₂, O₂, N₂ and CH₄ were investigated. The thermal properties were evaluated by a differential scanning calorimetry (DSC) and the thermal decomposition was determined by a thermogravimetric analysis (TGA). The surface treatment of the zeolite was successful, confirmed by the presence of the functional group of PEG on the surface of treated zeolite that was characterized by (fourier transform infrared spectrometer, FTIR). The mechanical properties showed that the addition of 6 wt% zeolite (untreated or treated surface) increased the tensile properties and tear strength of the LDPE film but no significant effect on the mechanical properties of the film PBAT was observed. LDPE film showed permeation of O₂ and N₂ while PBAT film showed permeation of CO₂ and O₂. The gas permeation increased with increasing of pressure. In addition, no gas permeation occurred in the thicker film (0.09-0.10 mm) for both LDPE and PBAT films. The DSC thermograms showed that zeolite had no significant effect on the melting temperature, crystallization temperature and degree of crystallization of LDPE and PBAT film. The thermal stability determined by TGA showed a single step of decomposition. The maximum decomposition temperatures of LDPE films with untreated and treated zeolite slightly increase. In addition, PBAT films containing zeolite have the same maximum decomposition temperatures for both thicknesses.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(14)
รายการรูป	(17)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(22)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โพลีเอทิลีน (polyethylene, PE)	4
2.2 โพลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT)	8
2.3 ซีโอไลต์ (zeolite)	9
2.4 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก (blown film processes)	16
2.5 กระบวนการดูดซับ (adsorption process)	18
2.6 อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability)	19
2.7 การตรวจสอบเอกสาร	20
3. วิธีการวิจัย	
3.1 สารเคมี	29
3.2 อุปกรณ์	29
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	30
3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง	31
3.4.1 การตัดแปรรูปผิวซีโอไลต์แอดด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอล	31
3.4.2 การเตรียมโพลีเมอร์คอมพาวด์ที่ผสมซีโอไลต์เอ	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูป	31
3.4.4 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง	33
3.4.5 การทดสอบสมบัติความทนต่อการฉีกขาด	34
3.4.6 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	35
3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	36
3.4.8 การวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อน	36
3.4.9 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การตัดแปรรูปผิวซีโอไลต์เอด้วย PEG	38
4.2 ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมซีโอไลต์เอ	40
4.2.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	40
4.2.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	50
4.2.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	53
4.2.4 สมบัติทางความร้อน	54
4.2.5 การสลายตัวทางความร้อน	56
4.3 ฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมซีโอไลต์เอ	60
4.3.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	60
4.3.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	69
4.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	71
4.3.4 สมบัติทางความร้อน	72
4.3.5 การสลายตัวทางความร้อน	74
4.4 ถุงเย็นทางการค้า (plastic bag) กับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ ความหนา 0.05-0.06 mm	77
4.4.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	77
4.4.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	82
4.4.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	83
4.4.4 สมบัติทางความร้อน	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.5 การสลายตัวทางความร้อน	86
4.5 Colostomy bag ทางการค้ากับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้ง ชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ ความหนา 0.09- 0.10 mm	88
4.5.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	88
4.5.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	93
4.5.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	94
4.5.4 สมบัติทางความร้อน	94
4.5.5 การสลายตัวทางความร้อน	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	98
5.1 การดัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วย PEG	98
5.2 ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมซีโอไลต์เอ	98
5.2.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	98
5.2.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	98
5.2.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	98
5.2.4 สมบัติทางความร้อน	99
5.2.5 การสลายตัวทางความร้อน	99
5.3 ฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมซีโอไลต์เอ	99
5.3.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	99
5.3.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	99
5.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	85
5.3.4 สมบัติทางความร้อน	100
5.3.5 การสลายตัวทางความร้อน	100
5.4 ถุงเย็นทางการค้า (plastic bag) กับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้ง ชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ ความหนา 0.05-0.06 mm	101
5.4.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	101
5.4.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	101
5.4.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	101

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.4 สมบัติทางความร้อน	101
5.3.5 การสลายตัวทางความร้อน	101
5.5 Colostomy bag ทางการค้ากับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้ง ชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ ความหนา 0.05-0.06 mm	102
5.5.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง	102
5.5.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	102
5.5.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	102
5.5.4 สมบัติทางความร้อน	102
5.5.5 การสลายตัวทางความร้อน	102
บรรณานุกรม	104
ภาคผนวก	108
เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	109
ประวัติผู้เขียน	116

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม LDPE	8
2.2	สมบัติทางกายภาพของ PBAT และ LDPE (Product Information Ecoflex [®] F BX 7011)	9
2.3	ชนิดของสารดูดซับที่มีความสำคัญและถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆ	19
3.1	สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม LDPE และ LDPE ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.04-0.06 mm	32
3.2	สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.04-0.06 mm	32
3.3	สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม LDPE และ LDPE ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.07-0.09 mm	32
3.4	สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.07-0.09 mm	33
4.1	หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพิกในซีโอไลต์เอ็ดดแปรพื้นผิวด้วย PEG	39
4.2	หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพิกในซีโอไลต์เอ	39
4.3	หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพิกใน PEG	39
4.4	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm	41
4.5	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm	41
4.6	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.9-0.10 mm	42
4.7	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวขวาง เครื่องจักร ความหนา 0.09-0.10 mm	43
4.8	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm	52
4.9	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm	52

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	54
4.11	อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm	55
4.12	อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	56
4.13	เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาระหว่าง 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm	58
4.14	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm	60
4.15	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm	61
4.16	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.09-0.10 mm	61
4.17	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ความหนา 0.09-0.10 mm	62
4.18	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm	71
4.19	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm	71
4.20	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม PBATฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-Tความหนา 0.05-0.06 mm	72
4.21	เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-Tความหนา 0.05-0.06 mm	73
4.22	เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-Tความหนา 0.07-0.09 mm	74

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.23	เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-Tที่มีความหนาระหว่าง 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm	77
4.24	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่าง ๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	78
4.25	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่าง ๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	78
4.26	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่าง ๆ มีความหนา 0.05-0.06 mm	82
4.27	ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มต่าง ๆ มีความหนา 0.05-0.06 mm	84
4.28	เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์มต่าง ๆ ความหนา 0.05-0.06 mm	85
4.29	เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	86
4.30	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่าง ๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	89
4.31	สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่าง ๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	89
4.32	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่าง ๆ มีความหนา 0.09-0.10 mm	94
4.33	เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์มต่าง ๆ ความหนา 0.09-0.10 mm	95
4.34	เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	96

รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	4
2.2	โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ คือ LDPE LLDPE และ HDPE	6
2.3	สัญลักษณ์การจำแนกพลาสติกในการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	6
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ PBAT	8
2.5	โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์เอ	10
2.6	ลักษณะโครงสร้างของหน่วยทฤษฎี	11
2.7	โครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์	12
2.8	กรงของซีโอไลต์เอและกรงของซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย	12
2.9	โครงสร้างของซีโอไลต์เอ ที่เป็นกรงโซดาไลต์	13
2.10	โครงสร้างของซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย	14
2.11	โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5	14
2.12	โครงสร้างของซีโอไลต์มอร์ดีไนต์	15
2.13	โครงสร้างของซีโอไลต์แอล	15
2.14	โครงสร้างของซีโอไลต์ซาบาไซต์	16
2.15	ส่วนประกอบหลักของเครื่องเป่าฟิล์ม	17
3.1	ขั้นตอนทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 type IV	33
3.2	ขั้นตอนทดสอบแบบมุ่มสำหรับการทดสอบการฉีกขาด	34
3.3	เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ	35
4.1	สเปกตรัม FTIR ของซีโอไลต์เอ PEG และซีโอไลต์เอดัดแปรพื้นผิวด้วย PEG	38
4.2	มอดุลัสของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	43
4.3	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	44
4.4	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	45
4.5	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	45

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	มอดุลัสของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	46
4.7	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	47
4.8	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	47
4.9	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	48
4.10	มอดุลัสของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm	48
4.11	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm	49
4.12	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm	49
4.13	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm	50
4.14	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างกัน : (a) ทดสอบตามแนวเครื่องจักร และ (b) ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	51
4.15	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm	52
4.16	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm : (a) heating scan (b) cooling scan	55
4.17	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	56

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	57
4.19	TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	57
4.20	DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	59
4.21	DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	59
4.22	มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	63
4.23	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	63
4.24	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	64
4.25	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร	64
4.26	มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	65
4.27	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	65
4.28	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	66
4.29	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	67
4.30	มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร	67
4.31	ความเค้น – ความเครียดของฟิล์ม ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร	68

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร	68
4.33	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร	68
4.34	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนาต่างกัน : (a) ทดสอบตามแนวเครื่องจักร และ (b) ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร	69
4.35	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm	70
4.36	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm	73
4.37	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm	73
4.38	กราฟ TGA ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	75
4.39	กราฟ TGA ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	75
4.40	DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm	76
4.41	DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm	76
4.42	มอดุลัสของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	80
4.43	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	80
4.44	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	81
4.45	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	81
4.46	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	82
4.47	TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	87

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.48	DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm	81
4.49	มอดูลัสของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	91
4.50	ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	91
4.51	ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	92
4.52	ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	92
4.53	สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	93
4.54	TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	97
4.55	DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันพอลิเมอร์มีบทบาทและความสำคัญในชีวิตประจำวันที่มีการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น โຕ้ะ แก้วอี้ ของเล่นเด็ก ชิ้นส่วนรถยนต์ ภาชนะบรรจุของเหลว บรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น ทำให้ความต้องการในการใช้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพอลิเมอร์มีความเหนียว น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถผลิตขึ้นรูปได้ง่ายตามความต้องการในการใช้งาน ด้วยกระบวนการผลิตและขึ้นรูปต่างๆ มีขอบข่ายการใช้งานที่กว้างและมีสมบัติตามความต้องการ ทำให้พอลิเมอร์แพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ตลอดจนฟิล์มบรรจุภัณฑ์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ มีการวิจัยเพื่อพัฒนาพอลิเมอร์ให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ทางการแพทย์ เช่น ถุงมือแพทย์ ชุดให้น้ำเกลือ สายใส่ทางเดินอาหาร หลอดฉีดยา บรรจุภัณฑ์ยา ถุงเก็บเลือด รวมถึงถุงรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียม เป็นต้น

ถุงรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียมเป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ภายนอกร่างกายสำหรับผู้ป่วยที่เป็นมะเร็งลำไส้ใหญ่และทวารหนักที่ได้รับการรักษา ทำให้แบบแผนการขับถ่ายเปลี่ยนแปลงไป โดยการผ่าตัดลำไส้ส่วนที่เป็นมะเร็งออกและยึดติดลำไส้ส่วนที่เหลือกับผนังหน้าท้องเป็นทวารเทียม เพื่อรองรับสิ่งขับถ่ายที่ร่างกายขับออกมาทางทวารเทียม โดยไม่สามารถควบคุมการขับถ่ายได้ ถุงรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียมนี้เป็นวัสดุที่ควรใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งเพื่อสุขลักษณะที่ถูกต้อง ถุงรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียมผลิตจากพลาสติกคุณภาพสูงและเป็นสินค้านำเข้าจากต่างประเทศหลากหลายชื่อทางการค้า มีราคาแตกต่างกันไปตามชนิดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ประกอบกับประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตอุปกรณ์ชนิดนี้ได้เองในเชิงอุตสาหกรรม ภาครัฐต้องเสียงบประมาณเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นที่จะพัฒนาให้มีราคาต่ำและผลิตได้เองภายในประเทศ เพื่อช่วยเหลือผู้ป่วยที่มีรายได้น้อยเป็นการเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยดังกล่าว โดยการเลือกพลาสติกที่มีความเหมาะสมในการผลิตถุงรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียม พลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) สามารถนำมาขึ้นรูปชุดอุปกรณ์รองรับสิ่ง

ขับถ่ายจากทวารเทียม ถูกนำมาใช้สำหรับบรรจุปัสสาวะและอุจจาระให้แก่ผู้ที่มีทวารเทียม เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้สะดวกต่อการใช้งานระหว่างวัน การเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกจึงมีความจำเป็นจะต้องเป็นฟิล์มพลาสติกชนิดที่สามารถบรรจุของเหลวและสามารถกักเก็บก๊าซได้ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีการใช้งานกันเป็นปริมาณมากและในขอบเขตที่กว้าง ไม่ว่าจะ เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับของสด บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร แต่พลาสติกชนิดนี้มีค่าการซึมผ่านของก๊าซค่อนข้างสูงกว่าความต้องการใช้งานสำหรับชุดอุปกรณ์รองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียม (วารภรณ์, 2549) ดังนั้นเราสามารถลดปัญหาการซึมผ่านของก๊าซได้โดยการเลือกใช้สารตัวเติมแบบรูพรุน ที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซและกลิ่นต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัสสาวะและอุจจาระของมนุษย์ โดยการนำซีโอโลต์เอ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุน มีสมบัติในการดูดซับที่ดีมาปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อใช้ในการดูดซับก๊าซและกลิ่นต่าง ๆ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่มีปัญหาในเรื่องของกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณขยะมากขึ้นตามปริมาณการใช้พลาสติก แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกมักมีการใช้งานในช่วงเวลาสั้น ๆ อาจเนื่องมาจากสภาวะการใช้งาน ระยะเวลาและสภาพแวดล้อม เมื่อใช้งานแล้วมักถูกทิ้งเป็นขยะ ซึ่งขยะพลาสติกบางส่วนถูกนำกลับมาใช้ซ้ำได้และบางส่วนถูกกำจัดทิ้งไปด้วยกระบวนการกำจัดขยะที่ต่างกันออกไป การกำจัดขยะพลาสติกโดยทั่วไปมักมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้ยาก ในขณะที่ความต้องการใช้งานพลาสติกมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymers) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณขยะพลาสติก พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (polybutyleneadipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่งเตรียมได้จากพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียม สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ง่าย มีความยืดหยุ่นสูง จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกได้ ผลิตภัณฑ์จาก PBAT จึงเป็นพลาสติกทางเลือกในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกตามท้องตลาด

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (PBAT) เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการทำเป็นชุดอุปกรณ์รองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียม ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติกและมีความเหมาะสมกับการใช้งานดังกล่าว แต่ยังไม่มียางานการนำพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ไปใช้งานกับอุปกรณ์ชุดนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีรายงานการศึกษาการซึมผ่านของก๊าซใน PBAT นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้มี

การเลือกใช้ ซีโอไลต์เอเป็นสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติการกักเก็บก๊าซและกลิ่นให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เตรียมฟิล์มจาก LDPE และ PBAT ที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปร
2. ทดสอบสมบัติเชิงกลและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซบางชนิดของแผ่นฟิล์มจาก ข้อ 1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมฟิล์มพลาสติกโดยใช้พอลิเมอร์และสารเคมีเกรดทางการค้าเพื่อใช้งานรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียมและเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า

2. ใช้ซีโอไลต์เอที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 μm ผสมกับพอลิเมอร์ในปริมาณ 2 -10 wt% ทำการศึกษากิจกรรมการดัดแปรซีโอไลต์

3. ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพลาสติกที่เตรียมได้และทำการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซที่เกิดขึ้นในสิ่งขับถ่าย คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซออกซิเจน O_2 และก๊าซมีเทน (CH_4)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

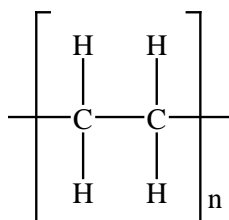
เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์มพลาสติกที่มีราคาถูกในการใช้เป็นถุงรองรับสิ่งขับถ่ายจากทวารเทียม เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) (Harper, 2002; Gregory, 2009)

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้อย่างแพร่หลายถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1933 โดย Reginald Gibson and Eric Fawcett แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษ พอลิเอทิลีนเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากเอทิลีนมอนอเมอร์ ลักษณะโดยทั่วไปจะมีสีขาว โปร่งแสง มีความลื่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสชาติ มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะมีความแข็ง ความเหนียวและอุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอรัชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการนำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนมีหลายชนิด ดังนี้

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE)

LDPE มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.910-0.940 g/cm³ มีกิ่งก้านสาขาทั้งสั้นและยาวที่มาก ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ มีค่าความเหนียวสูง ถูกใช้เป็นภาชนะและฟิล์มบรรจุภัณฑ์

2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (medium density polyethylene, MDPE)

MDPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.926-0.940 \text{ g/cm}^3$ ทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่จะเกิดรอยต่าง ๆ ได้ง่ายกว่า HDPE และทนทานต่อการเกิดรอยแตกร้าวได้ดีกว่า HDPE ถูกนำมาใช้เป็นท่อก๊าซ กระสอบ พลาสติกหัดตัว พลาสติกบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE)

HDPE มีกึ่งก้านสาขาน้อยมาก ความหนาแน่นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.941 g/cm^3 มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลสูงขึ้นไป มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นไป ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ เช่น เข็ยอกใส่หม ถูใส่ชยะ ภาชนะใส่เนย ขวดใส่น้ำยาล้างจาน เป็นต้น

4. พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำมาก (very low density polyethylene, VLDPE)

VLDPE มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.880-0.913 \text{ g/cm}^3$ เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีปริมาณกิ่งขนาดสั้นเป็นจำนวนมาก มักใช้เป็นสายยาง หลอด ถูบรรจุอาหารเย็น บรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

5. พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำพิเศษ (ultra low density polyethylene, ULDPE)

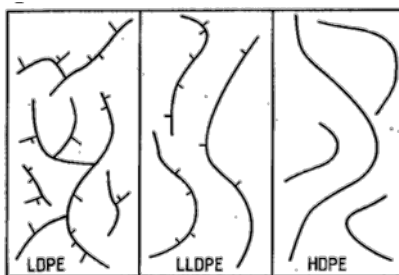
ULDPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำมากเป็นพิเศษ คือจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.905-0.915 \text{ g/cm}^3$ ทนต่อการแตกได้ดี มักขึ้นรูปเป็นถูบรรจุอาหาร บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

6. พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ (linear low density polyethylene, LLDPE)

LLDPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.915-0.925 \text{ g/cm}^3$ มีค่าความทนต่อแรงดึงแรงกระแทกและการเจาะสูงกว่า LDPE เนื่องจากมีความยืดหยุ่น เหนียวและโปร่งใส สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้แต่จะบางกว่า LDPE ทนต่อการเกิดรอยจากสภาพแวดล้อมได้ดีกว่า LDPE แต่ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ยาก มักจะถูกขึ้นรูปเป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล ของเล่นและฝาปิดภาชนะ โครงสร้างสายรูปที่ 2.2 แสดงภาพเปรียบเทียบสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนสามชนิดที่นิยมใช้กันทั่วไป (LDPE LLDPE และ HDPE)

7. พอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE)

UHMWPE คือ พอลิเอทิลีนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากถึงหลักล้าน ($3 - 5 \times 10^6 \text{ g/mol}$) ความหนาแน่นมีค่าน้อยกว่า HDPE จะอยู่ในช่วง $0.930-0.935 \text{ g/cm}^3$ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงทำให้สายโซ่โมเลกุลอยู่ชิดกันมาก ส่งผลให้มีความโดดเด่นด้านความเหนียว ทนทานต่อการตัด การฉีกขาดและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี จึงถูกนำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น เป็นชิ้นส่วนบนอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ เครื่องจักร เสื้อเกราะ ข้อต่อเทียม เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ คือ LDPE LLDPE และ HDPE (Harper, 2002)

2.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE)

(Harper, 2002)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากเอทิลีนมอนอเมอร์ผ่านกระบวนการผลิตที่ใช้ความดันสูง LDPE มีกิ่งขนาดสั้นและขนาดยาวในปริมาณสูง อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนที่มีโซ่สาขา (branched polyethylene) จึงมีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ ทนต่อสารเคมี อากาศสามารถซึมผ่านได้ ราคาไม่แพง มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง นิยมขึ้นรูปเป็นภาชนะที่ต้องการความแข็งแรง เช่น ขวด ของเล่น และสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มพลาสติก ถุงพลาสติก ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ หีบห่ออาหาร เป็นต้น เพื่อความสะดวกสำหรับการจำแนกชนิดของพลาสติกในการนำกลับมาใช้ใหม่ LDPE จัดเป็นพลาสติกที่ได้รับสัญลักษณ์หมายเลข 4 หมายถึง resin identification code 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์การจำแนกพลาสติกในการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

2.1.2 สมบัติทั่วไปของ LDPE (Gregory, 2009)

LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมากและมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีจุดหลอมเหลว ประมาณ 115°C ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C จะละลายในตัวทำละลายจำพวกไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) และไฮโดรเจนเตตไฮโดรคาร์บอน (hydrogenated hydrocarbon) เช่น โทลูอีน (toluene) ไชลีน (xylene) และไดคลอโรเอทิลีน (dichloroethylene) สมบัติทั่วไปของ LDPE ได้แก่ มีความนิ่ม ยืดหยุ่นได้ดี โปร่งแสง มีความเงามัน มีความเหนียว มีความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรด-ด่าง ได้ปานกลาง ดูดซึมน้ำได้ต่ำมาก ป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี สามารถนำไปใช้งานได้ระหว่างอุณหภูมิ -40°C ถึง 80°C และมีความปลอดภัยสามารถใช้กับอาหารและยาได้

การใช้งาน LDPE

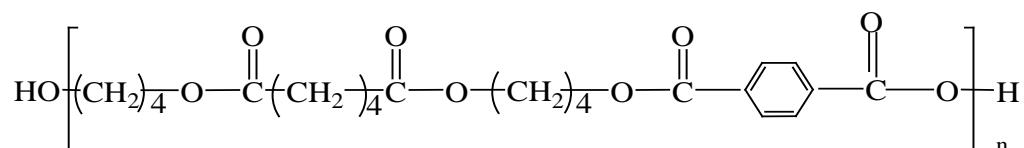
LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลาย จึงสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่

1. งานฉีดแบบ (injection moulding) เช่น ฝาขวดน้ำ ตะกร้า ของเด็กเล่น ถ้วย ชาม
2. งานอัดรีด (extrusion) เช่น หลอดดูด ท่อหุ้มสายไฟ
3. งานบรรจุภัณฑ์ฟิล์มและงานเคลือบ (lamination) หลายๆ ชั้น เช่น ฟิล์มหดหุ้ม (shrink wrap) บรรจุภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ซองน้ำยาปรับผ้านุ่ม
4. การใช้งานฟิล์ม ได้แก่ ถุงบรรจุอาหาร เช่น ผักผลไม้สด ขนมปัง อาหารแช่แข็ง และถุงหิ้ว
5. ใช้ร่วมกับวัสดุอื่น เช่น พลาสติกต่างชนิดกัน โดยการประกบหรือรีดร่วมหรือเคลือบ เพื่อเสริมสมบัติในการใช้งานให้เหมาะสม เช่น รีดร่วมกับพอลิพรอพิลีน (oriented polypropylene, OPP)/LDPE หรือ รีดร่วมกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)/LDPE เป็นต้น

ฟิล์ม LDPE เป็นฟิล์มพลาสติกที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่ มักจะใช้ทำบรรจุภัณฑ์ ถุงบรรจุอาหารที่ต้องการความใส ชื่อสามัญเรียกว่า ถุงเย็น หรือทำถุงฟิล์มหด ฟิล์มยืด เป็นต้น ฟิล์ม LDPE สามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดเพื่อปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ได้ดี สมบัติของฟิล์ม LDPE คือ ยืดตัวได้ดี ทนต่อการที่มทะเลและการฉีกขาด สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม LDPE แสดงในตารางที่ 2.1 ฟิล์ม LDPE ป้องกันความชื้นได้พอสมควรและอากาศซึมผ่านได้ ยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน ซึมผ่านได้ในระดับหนึ่ง

2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT)

PBAT ทางการค้ามีอยู่ 2 ชนิด คือ Ecoflex™ ผลิตโดยบริษัท BASF และ EastarBio™ ผลิตโดยบริษัท Eastman ซึ่งแต่ละบริษัทได้ผลิตโดยการควบคุมปริมาณกิ่งก้านสาขาและความยาวสายโซ่เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานด้านต่างๆ โครงสร้างทางเคมีของ PBAT แสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปพบว่า PBAT มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับ LDPE โดยเฉพาะเกรดเป่าคือมีความโปร่งใสและมีความยืดหยุ่น สมบัติทางกายภาพของ PBAT และ LDPE แสดงในตารางที่ 2.1 PBAT เป็น อะลิฟาติกอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ประกอบด้วย 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) อะดิพิก-แอซิด (adipic acid) และเทเรพทาริกแอซิด (terephthalic acid) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.25-1.27 g/cm³ PBAT สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิ 140 - 170°C โดยความหนาแน่นและสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป แสดงในตารางที่ 2.2 โดยทำการเปรียบเทียบด้วย LDPE



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT (Zhang *et al.*, 2009)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT (Yamamoto *et al.*, 2005)

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	LDPE*	PBAT**
ความโปร่งแสง	%	ASTM D 1003	89	82
มอดุลัส	N/mm ²	ISO 527	240/200	95/80
ความต้านทานต่อแรงดึง	N/mm ²	ISO 527	2/20	35/44
ความต้านทานต่อการฉีกขาด	N/mm ²	ISO 527	-	36/45
ระยะยืด ณ จุดขาด	%	ISO 527	300/600	560/710
พลังงานในการแตกหัก	J/mm	DIN 53373	5.5	24
อัตราการซึมผ่าน:				
ออกซิเจน	ml/(m ² d bar)	ASTM D 3985	2900	1400
ไอน้ำ	g/(m ² d)	ASTM F 1249	1.7	170

หมายเหตุ *Lupolen 2420 F

**Ecoflex® F BX 7011

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของ LDPE และ PBAT

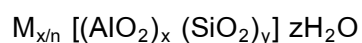
สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	LDPE*	PBAT**
ความหนาแน่น	g/cm ³	ISO 1183	0.922 – 0.925	1.25 – 1.27
อัตราการหลอมไหล 190°C, 2.16 kg	g/10 min	ISO 1133	0.6 – 0.9	2.7 – 4.9
ปริมาตรการหลอมไหล 190°C, 2.16 kg	ml/10 min	ISO 1133	0.8 – 1.2	2.5 – 4.5
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	DSC	111	110 - 120
ความแข็ง (shore D)	-	ISO 868	48	32
อุณหภูมิการอ่อนตัว (vicat VST A/50)	°C	ISO 306	96	91

หมายเหตุ *Lupolen 2420 F

**Ecoflex®F BX 7011

2.3 ซีโอไลต์ (zeolite) (Guisnet and Gilson, 2002)

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) ของธาตุแอลคาไลน์ (alkali) หรือ แอลคาไลเอิร์ธ (alkali earth) มีสูตรโดยทั่วไป ดังนี้



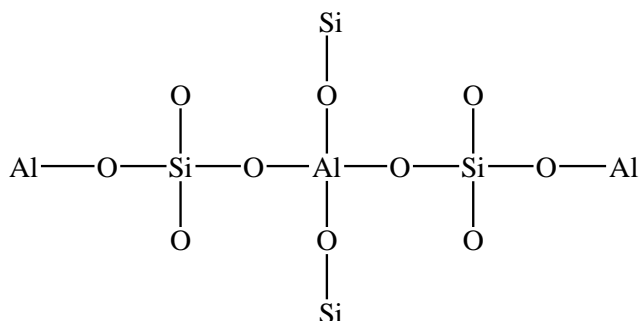
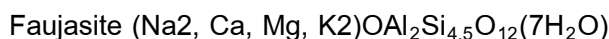
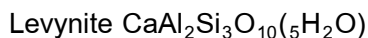
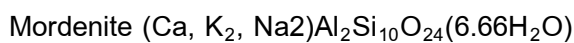
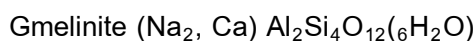
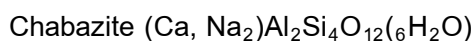
เมื่อ x และ y เป็นเลขจำนวนเต็ม

อัตราส่วน y/x มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าหนึ่ง

n เป็นเลขเวเลนซ์ของแคตไอออน

M และ z เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำในแต่ละหน่วยย่อย (unit cell)

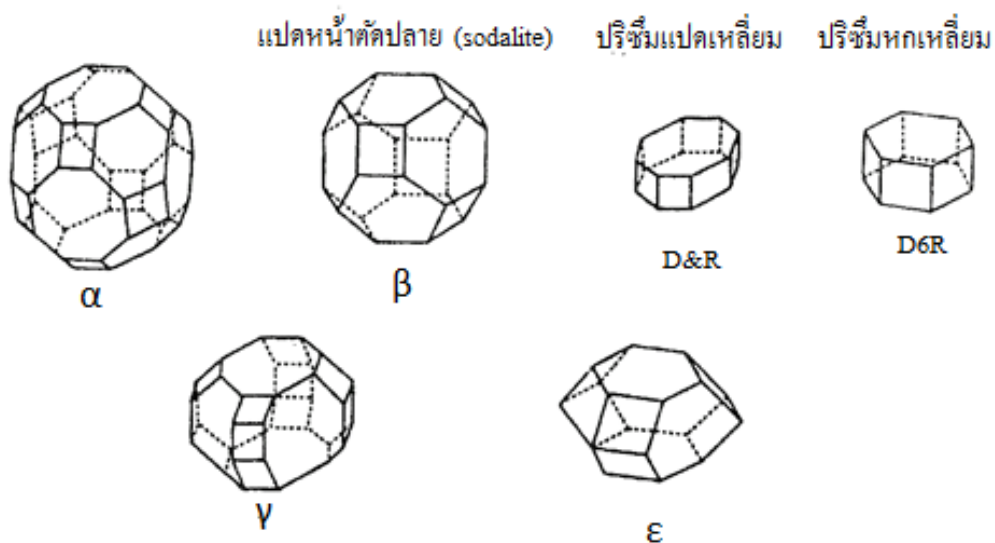
โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ แสดงในรูปที่ 2.5 ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุน (pore) และช่องว่าง (channel) หรือโพรง (cavity) ที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ มีขนาดตั้งแต่ 2-10 Å นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจน แล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เก้ากัณอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ ซีโอไลต์เป็นสารที่มีรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวมาก คือ ประมาณ 600-1,000 m²/g เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดของหน้าต่าง (window) ที่สม่ำเสมอและแน่นอนจึงมีสมบัติพิเศษในการดูดซับโมเลกุลของสารที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของหน้าต่างได้ ทำให้มีความเฉพาะเจาะจงต่อสารถูกดูดซับสูง ด้วยเหตุนี้ซีโอไลต์จึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สารกรองโมเลกุล (molecular sieve) ซีโอไลต์นั้นมีมากกว่า 600 ชนิด โดยจำแนกเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติหรือหินภูเขาไฟประมาณ 40 ชนิดและซีโอไลต์สังเคราะห์อีกมากกว่า 500 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ชนิดที่สำคัญได้แก่



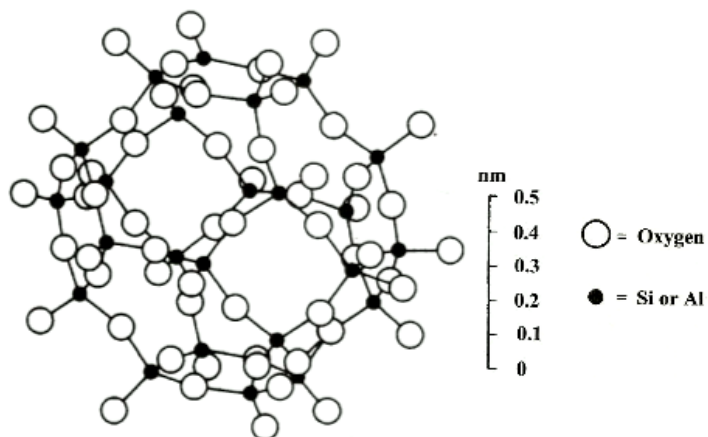
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์

โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์มีซิลิกอนและอะลูมิเนียมในรูปของ SiO₄ และ AlO₄ หน่วยโครงสร้างนี้ประกอบกันเป็นพอลิอีตรอลทุติยภูมิ (secondary polyhedral) เช่น ทรงลูกบาศก์ ทรง

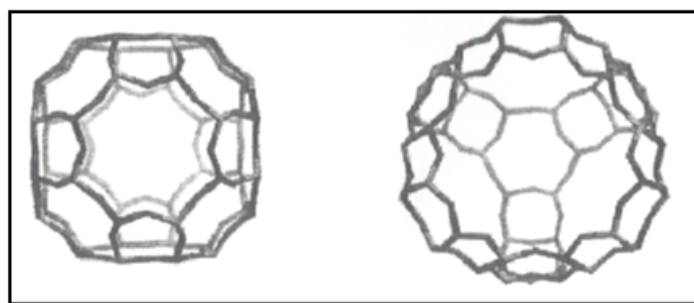
ปริซึมหกเหลี่ยม ทรงแปดหน้า และทรงแปดหน้าตัดปลาย เป็นต้น อะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะอยู่ที่มุมของทรงหลายหน้า และเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของลักษณะโครงสร้างของหน่วยทุติยภูมิ ที่เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายผลึกแบบสามมิติในซีโอไลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งความแตกต่างในรูปร่างโครงสร้างมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงของซีโอไลต์เป็นหลัก ซีโอไลต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกัน เช่น ซีโอไลต์ เอ็กซ์และวาย (ชนิด Faujasite) และซีโอไลต์เอ พบว่าเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานการดูดซับ การเร่งปฏิกิริยาและการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ดังกล่าว มีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่ผิวภายในมาก จึงสามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำได้เป็นอย่างดี และโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับถูกไล่ออกจากซีโอไลต์ได้ง่ายด้วยความร้อน ซีโอไลต์ทั้งสองชนิดดังกล่าวจึงเป็นสารดูดความชื้นที่ดีมาก ซีโอไลต์เหล่านี้มีสมบัติเป็นตัวกรองเชิงโมเลกุลโดยขนาดของโพรงของซีโอไลต์เป็นตัวควบคุมขนาดของโมเลกุลที่ต้องการกรอง กรงของซีโอไลต์เอ และซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของหน่วยทุติยภูมิ (Ruthven, 1984)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์ (Coulson and Richardson, 1991)



α -Cage of Zeolite A-LTA

Supercage of Zeolite X-FAU

รูปที่ 2.8 กรงของซีโอไลต์เอ (ซ้าย) และ กรงของซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย (ขวา) (Auerbach *et al.*, 1999)

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของซีโอไลต์

โครงสร้างความเป็นรูพรุนของซีโอไลต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

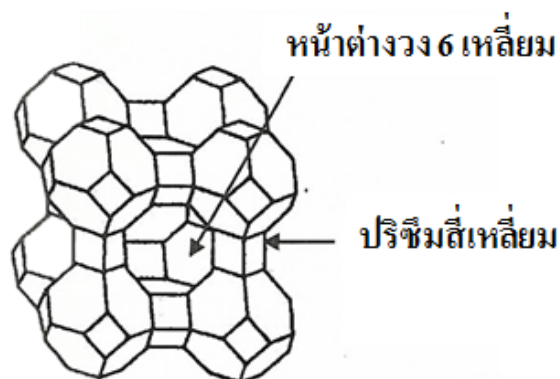
1. ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กมีรูพรุนวงแหวน 8 ช่อง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.30 ถึง 0.45 nm
2. ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง มีรูพรุนวงแหวน 10 ช่อง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.45 ถึง 0.60 nm
3. ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีรูพรุนวงแหวน 12 ช่อง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.60 ถึง 0.80 nm

2.3.2 โพรงของซีโอไลต์ (Auerbach *et al.*, 2003)

โพรงของซีโอไลต์ คือ หน่วยพอลิฮีดรอล (polyhedral unit) ที่มีความต่างจากกรง (cages) โดยที่โมเลกุลของน้ำ เอลเคนเชิงเส้น (linear alkanes) และโมเลกุลขนาดเล็ก (small molecules) เช่น CO_2 และ N_2 สามารถผ่านได้ หากโพรงของซีโอไลต์เชื่อมต่อกับวงแหวนแปดเหลี่ยม โมเลกุลจะแพร่กระจายอยู่ในผลึกของซีโอไลต์โดยการเคลื่อนที่ไปมาระหว่างกรง เพราะจะมีหน้าต่าต่างในทุกๆ ทิศทาง การแพร่กระจายของโมเลกุลจะเกิดขึ้นแบบสามมิติ มีการแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามลักษณะและขนาดโพรงต่างๆ ดังนี้

(1) ซีโอไลต์เอ (zeolite A)

ซีโอไลต์เอ เป็นโครงสร้างแบบ Linde Type A, LTA หน่วยเตตระฮีดรอน (T) ประกอบด้วยโพรงที่มีจำนวน 48 ด้านหรือประกอบด้วยวงแหวนขนาด 4 หน่วยเตตระฮีดรอน (4T) 6 หน่วยเตตระฮีดรอน (6T) และ 8 หน่วยเตตระฮีดรอน (8T) ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย (1) หน่วยของ D4R (2) หน่วยโซดาไลต์ (sodalite) และ (3) หน่วยแอลทีเอ (LTA) ทำให้เกิดเป็นกรงที่เรียกว่า กรงโซดาไลต์ (sodalite cage) ที่มีโพรงขนาดใหญ่ ซึ่งเรียกว่า กรงชนิดเบต้า (β) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 อีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ โครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากคูโบออกตะฮีดรอน ซึ่งเรียกว่า กรงชนิดแอลฟา (α) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซีโอไลต์เอเป็นสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติการกักเก็บก๊าซและกลั่นให้กับฟิล์มพอลิเมอร์

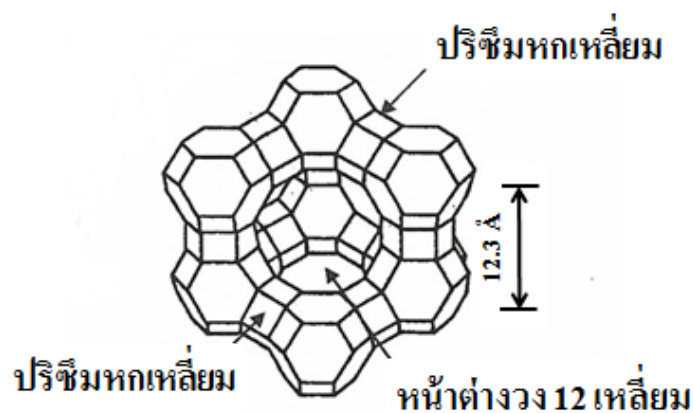


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ ที่เป็นกรงโซดาไลต์ (Ruthven, 1984)

(2) ซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย (X and Y)

ซีโอไลต์เอ็กซ์ เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ มีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างที่มีในธรรมชาติ ซึ่งเรียกว่า โฟเยไซต์ (faujasite, FAU) ดังนั้นการสร้างซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย จึงถูก

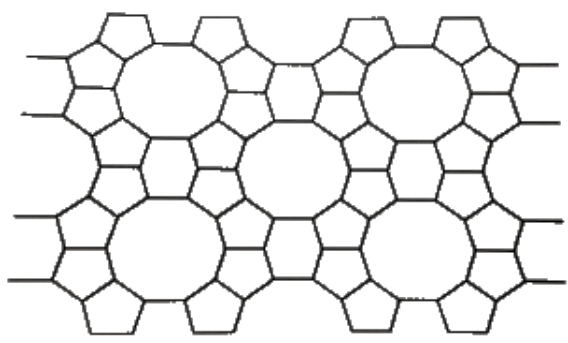
กำหนดให้เป็นโครงสร้างแบบโพเยไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โพรงมีลักษณะเป็นท่อเชื่อมโยงกัน เป็นเครือข่าย โดยขนาดท่อที่ใหญ่ที่สุดมีความกว้างของท่อเป็นวงแหวนขนาด 12 หน่วยเตตระอีตรอน (12T) โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.8 Å



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย (Ruthven, 1984)

(3) ซีโอไลต์ ZSM-5

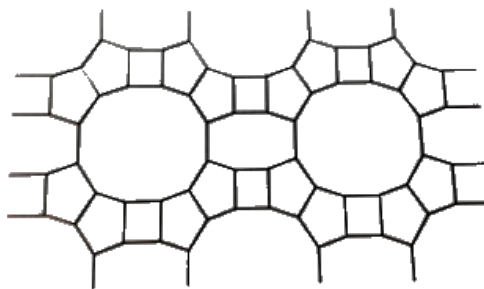
ซีโอไลต์ ZSM-5 (zeolite Socony Mobile Number 5) เป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างแตกต่างจากซีโอไลต์เอ และซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย อย่างมาก คือ ซีโอไลต์ ZSM-5 มีรูปผลึกเป็นแผ่นต่อเนื่องและโพรงมีลักษณะเป็นท่อเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยขนาดท่อที่ใหญ่ที่สุดมีความกว้างของท่อเท่ากับ 10 หน่วยเตตระอีตรอน (10T)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 (วิทยา, 2554)

(4) ซีโอไลต์มอร์ดินีต์ (Mordenite)

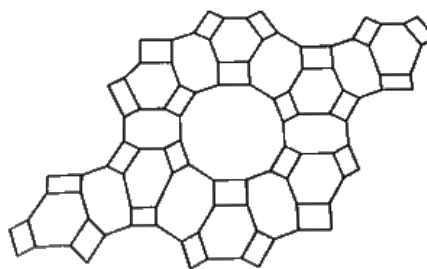
ซีโอไลต์มอร์ดินีต์ เป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างรูปผลึกเป็นแผ่นต่อเนื่อง เช่นเดียวกับซีโอไลต์ ZSM-5 และโพรงมีลักษณะเป็นท่อเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยขนาดท่อที่ใหญ่ที่สุดมีความกว้างของท่อเท่ากับ 12 หน่วยเตตระอีตรอน (12T)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของซีโอไลต์มอร์ดินีต์ (วิทยา, 2554)

(5) ซีโอไลต์แอล (L)

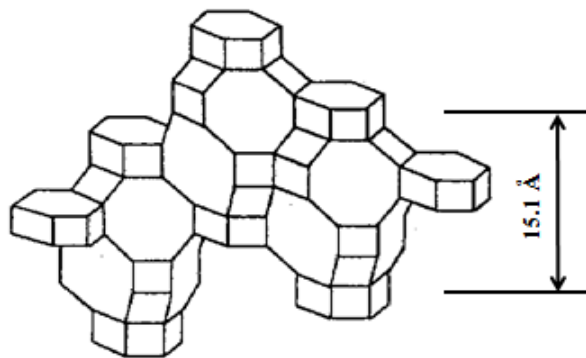
ซีโอไลต์แอล เป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างรูปผลึกเป็นแผ่นต่อเนื่องเช่นเดียวกับซีโอไลต์ ZSM-5 และโพรงมีลักษณะเป็นท่อเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยขนาดท่อที่ใหญ่ที่สุดมีความกว้างของท่อเท่ากับ 12 หน่วยเตตระอีตรอน (12T)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของซีโอไลต์แอล (วิทยา, 2554)

(6) ซีโอไลต์ซาบาไซต์ (Chabazite)

ซีโอไลต์ซาบาไซต์ เป็นซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างรูปผลึกเป็นแผ่นต่อเนื่องเช่นเดียวกับซีโอไลต์ ZSM-5 และโพรงมีลักษณะเป็นท่อเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยขนาดท่อที่ใหญ่ที่สุดมีความกว้างของท่อเท่ากับ 8 หน่วยเตตระอีตรอน (8T)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของซีโอไลต์ซาบาไซต์ (Ruthven, 1984)

2.3.3 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ (วิทยา, 2554)

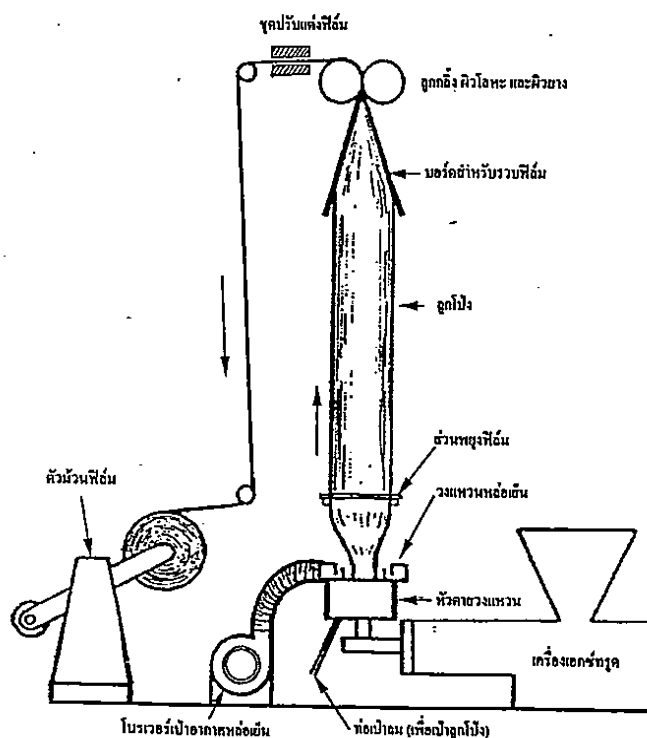
ซีโอไลต์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ได้แก่

- (1) ซีโอไลต์ถูกนำไปใช้เป็นสารลดความกระด้าง (builder) แทนฟอสเฟตในอุตสาหกรรมผลิตสารซักฟอก เพื่อลดปัญหาการทำลายสิ่งแวดล้อมทางน้ำโดยฟอสเฟต
- (2) ใช้เป็นสารดูดความชื้นในห้องปฏิบัติการเคมี
- (3) ใช้เป็นสารตัวกรองเชิงโมเลกุลเพื่อแยกขนาดสารประกอบพอลิเมอร์
- (4) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และสิ่งแวดล้อม

2.4 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก (blown film processes) (เจริญ, 2554)

การเป่าฟิล์มพลาสติกเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่อง โดยมีหลักการคือ เม็ดพลาสติกถูกอัดรีดผ่านเครื่องอัดรีด (extruder) ที่มีการให้ความร้อนด้วยการตั้งค่าอุณหภูมิ เพื่อให้เม็ดพลาสติกเกิดการหลอมเหลว จากนั้นพลาสติกหลอมเหลวจะถูกขับออกมาผ่านหัวดาย (die) โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกบังคับให้หมุนรอบสกรูที่อยู่ภายในเครื่องและไหลออกผ่านดายเปิดที่มีรูปร่างแหวน ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ ในขณะเดียวกันมีลมเป่าเพื่อทำให้พลาสติกหลอมพองตัวออกในแนวขวางเครื่องจักร เกิดเป็นลูกโป่งที่มีผนังบาง ซึ่งหัวเป่าลมมีลักษณะเป็นวงแหวนอยู่ด้านนอกหัวดาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งที่ได้จะมีค่ามากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดายหลายเท่าตัว ลักษณะของเครื่องเป่าฟิล์มแสดงในรูปที่ 2.15 ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสม จากนั้นลูกโป่งจะเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้งสองตัว ลูกโป่งจะแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น ทำการดึงฟิล์มเพื่อม้วนเก็บด้วยตัวม้วนฟิล์มเพื่อ

นำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือผลิตเป็นถุงเพื่อใช้งานต่อไป การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าเหมาะสำหรับการผลิตถุง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป่าได้ไม่มีตะเข็บด้านข้าง โปร่งแสงใส มีสมบัติเชิงกลและความแข็งแรงสม่ำเสมอทั้งในทิศทางตามแนวขนานและตามขวางของเครื่องเป่า



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม

จากรูปที่ 2.15 ส่วนประกอบหลักของเครื่องเป่าฟิล์มมี 5 ส่วน คือ

1. เครื่องอัดรีด (extruder)
2. หัวตาย (die unit)
3. ส่วนหล่อเย็นและรองรับลูกโป่ง (cooling and calibration unit)
4. ส่วนดึง (haul-off unit)
5. ส่วนม้วนเก็บ (wind-up หรือ winder)

วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกเป็นเทอร์โมพลาสติก พลาสติกที่นิยมใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์มมากที่สุด ได้แก่ พลาสติกในกลุ่มพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีน ซึ่งในบรรดาพอลิเอทิลีน มีการใช้ LDPE มากที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อการเป่าฟิล์ม ได้แก่ ความเร็วในการดึง อุณหภูมิเครื่องอัดรีด และความดันภายในเครื่องอัดรีด ปัจจัยเหล่านี้จะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี

2.5 กระบวนการดูดซับสาร (adsorption process) (ชัยยศ, 2554)

กระบวนการดูดซับสารเป็นหนึ่งในกระบวนการแยกสาร (separation processes) ทางวิศวกรรมเคมีที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม กระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (ก๊าซ ไอ ของเหลว) โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ซึ่งเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) โดยกลไกของการแพร่ไปสะสมอยู่บนพื้นผิวภายในของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับหรือสารดูดซับ (adsorbent) ทำให้ความหนาแน่นหรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล การดูดซับนี้เกิดขึ้นได้จากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ คุณสมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดีจึงจำเป็นต้องมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงหรือเป็นวัสดุที่มีความพรุนและประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเพื่อให้มีพื้นที่ผิวภายในสูง

ชนิดของสารดูดซับและการประยุกต์ใช้งาน

เพื่อให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมาก สารดูดซับที่นำมาใช้งานจำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง กล่าวคือต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ นอกจากจะขึ้นกับโครงสร้างของรูพรุน ได้แก่ ขนาด และการกระจายขนาดของรูพรุนแล้ว ยังขึ้นกับเคมีพื้นผิวของสารดูดซับอีกด้วย ซึ่งรวมถึงสมบัติความเป็นขั้วและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (surface functionality) ที่ปรากฏบนพื้นผิว สารดูดซับที่ใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ สามารถแบ่งตามคุณลักษณะได้ดังนี้

1. แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะโครงสร้าง (structural nature) ได้แก่
 - สารดูดซับอสัณฐาน (amorphous adsorbents)
 - สารดูดซับโครงสร้างผลึก (crystalline adsorbents)
2. แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (pore size distribution) ได้แก่
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 nm)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 nm)
3. แบ่งตามความเป็นขั้วของพื้นผิว (surface polarity) ได้แก่
 - สารดูดซับที่แสดงความเป็นขั้ว

- สารดูดซับที่ไม่มีขี้
4. แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (chemical compositions) เช่น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ซีโอไลต์ และแร่ดิน (clay adsorbents) พวกที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ หรือ สารดูดซับเรซินที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดของสารดูดซับที่มีความสำคัญและถูกนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยจำแนกตามลักษณะโครงสร้าง ขนาดของรูพรุน และความมีขี้ของพื้นผิวดูดซับ ได้แก่ ซีโอไลต์ (zeolite) ซิลิกาไลต์ (silicalite) ซิลิกาเจล (silica gel) อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ (carbon molecular sieve, CMS)

ตารางที่ 2.3 ชนิดของสารดูดซับที่มีความสำคัญและถูกนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ

ความเป็นขี้ ของพื้นผิว	การกระจายขนาดของรูพรุน		ลักษณะโครงสร้าง
	แคบ	กว้าง	
มีขี้	¹ ซีโอไลต์	^{1,2} ซิลิกาเจล ² อะลูมินากัมมันต์	1 = โครงสร้างผลึก 2 = โครงสร้างอสัณฐาน
ไม่มีขี้	¹ ซิลิกาไลต์ ² คาร์บอนโมเลกุลาสีฟ	² ถ่านกัมมันต์	

2.6 อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability) (กัญญาวีร์, 2548 และ วราภรณ์, 2549)

อัตราการซึมผ่านของก๊าซ หมายถึง ปริมาตรของก๊าซที่ซึมผ่านจากฟิล์มพลาสติกต่อหน่วยพื้นที่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่กำหนด อัตราการซึมผ่านของก๊าซอาจมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ การกำหนดค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซเพื่อเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้งานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของผลิตภัณฑ์ สภาวะและอายุในการเก็บรักษา การเลือกวัสดุป้องกันก๊าซควรเลือกวัสดุที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (O₂) ไม่เกิน 2 cc/m².atm.24 hr ส่วนวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีพอสมควรจะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ 20-30 cc/m².atm.24 hr

2.7 การตรวจสอบเอกสาร

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมซีโอไลต์

Dirim และคณะ (2001) ศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมซีโอไลต์สำหรับบรรจุอาหารด้วยวิธีต่างๆ 3 วิธีคือ การอัดขึ้นรูปร้อนในช่วงอุณหภูมิ 100°C–145°C การเติมซีโอไลต์ในพอลิเอทิลีนในสภาวะหลอมและพอลิเอทิลีนที่อยู่ในตัวทำละลาย การเคลือบเม็ดพอลิเอทิลีนด้วยซีโอไลต์ โดยกระบวนการหมุนเหวี่ยงอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 hr จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการอัดรีดและอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม พบว่าการเคลือบพอลิเอทิลีนด้วยซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 145°C เป็นเวลา 3 hr แล้วนำมาอัดรีดร้อนที่อุณหภูมิ 130°C เป็นวิธีการที่ดีที่สุด ใน 3 วิธี เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีการกระจายตัวและมีความสม่ำเสมอของซีโอไลต์รวมถึงมีความยืดหยุ่นที่ดีอีกด้วย นอกจากนี้ฟิล์มผสมซีโอไลต์ที่ได้ยังมีค่าการดูดซับที่ดีขึ้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

Gu และคณะ (2012) ทำการเตรียม LDPE ผสมกับซีโอไลต์เอ (zeolite 4A) และศึกษาปัจจัยของซีโอไลต์เอที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ โดยการเตรียมเมมเบรน zeolite 4A/LDPE ในสภาวะสารละลาย ที่ปริมาณซีโอไลต์เอ 0-10 wt% พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้น

กัญญาวิรี (2548) ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมกับซีโอไลต์เอ เพื่อใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้ โดยการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวและขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน การเติมซีโอไลต์เอในปริมาณที่น้อยๆ (2 และ 5 wt%) การกระจายตัวของซีโอไลต์เอโดยส่วนใหญ่อยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวและสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมตริก ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและมอดูลัสของแผ่นฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 15 wt% แต่ในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์เอ 10-20 wt% พบว่าซีโอไลต์เอรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มมากขึ้น ความหนืดระบบเพิ่มขึ้นและสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อการฉีกขาด เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลง อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและความสามารถในการผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เอในแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณสูงๆ (10-20 wt%) เนื่องจากปริมาณรูพรุนของซีโอไลต์เอ

วรารภรณ์ (2549) ได้ทำการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมด้วยซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดีในปริมาณ 2-8 wt% เพื่อปรับปรุง

สมบัติในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม นอกจากนั้นมีการปรับปรุงผิวซีโอไลต์เอด้วยกรดสเตียริก (stearic acid, SA) 1% และพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) 3% พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ความต้านทานต่อการฉีกขาดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อย จากการศึกษาศักยภาพฟิล์มสูตรที่มีการเติมซีโอไลต์ 4 และ 6 wt% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA และ PEG พบว่าความหนืดของระบบลดลงเล็กน้อย สมบัติเชิงกลไม่มีการเปลี่ยนแปลง สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนขึ้นอยู่กับความหนาและปริมาณซีโอไลต์ ผู้วิจัยเลือกสูตรซีโอไลต์เอที่ปริมาณ 6 wt% ทั้งที่มีการปรับปรุงและไม่ปรับปรุงพื้นผิวเป็นสูตรที่ดีที่สุด พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวซีโอไลต์เอไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำขึ้นกับความหนาและปริมาณซีโอไลต์เอ เมื่อซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มลดลง เนื่องจากผลของสมบัติการไหล คือ เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลง

เนตรนภาและคณะ (2552) ทำการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะนาว โดยการเตรียมฟิล์ม LDPE และฟิล์มคอมโพสิตที่มีอัตราส่วน LDPE/ซีโอไลต์เอ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เท่ากับ 100/3/9 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสองทิศทาง คือ ตามแนวเครื่องจักร (MD) และตามแนวขวาง (TD) พบว่าฟิล์มคอมโพสิตมีความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (tensile stress at yield) และมอดูลัส มากกว่าฟิล์ม LDPE โดยแนว MD มีค่าสูงกว่า 1.4 และ 3.2 เท่า ในขณะที่แนว TD มีค่าสูงกว่า 1.1 และ 2.0 เท่า แต่การดึงยืด ณ จุดครากของฟิล์มคอมโพสิตมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม LDPE นอกจากนี้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (O₂) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไอน้ำของฟิล์มคอมโพสิตมีค่ามากกว่าฟิล์ม LDPE 1.1, 1.5 และ 1.1 เท่าตามลำดับ โดยความเป็นไปได้ที่ก๊าซจะสามารถซึมผ่านฟิล์มได้ คือ ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) รอยต่อระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม ส่วนที่เป็นรูพรุนของสารตัวเติม

Booncharoen และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและความสามารถในการเลือกของฟิล์มคอมโพสิต โดยการเตรียมฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ขนาด 0.5 μm อัตราส่วน 10 wt% ด้วยเครื่องผสมแบบปิดและเป่าขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ให้ได้ฟิล์มคอมโพสิตที่มีความหนาประมาณ 30-35 μm ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของโครงสร้างฟิล์มคอมโพสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)

และ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) พบว่า อนุภาคซีโอไลต์กระจายตัวได้ดีใน LDPE เมตริกซ์ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงเล็กน้อยเมื่อ มีการเติมอนุภาคซีโอไลต์ใน LDPE นอกจากนี้ยังพบว่าความไม่ชอบน้ำของซีโอไลต์ ส่งผลให้เกิด การกีดขวางในการการซึมผ่านสำหรับก๊าซที่ไม่มีขั้ว

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการกักเก็บก๊าซของฟิล์มพลาสติก

Wang และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาถึงค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซ เอทิลีนที่อุณหภูมิ 19°C โดยเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเอทิลีนสามชนิด คือ LDPE LLDPE และ HDPE ทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง $4-30^{\circ}\text{C}$ สำหรับ LDPE จากการทดสอบที่อุณหภูมิคงที่ที่ 19°C พบว่าค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซเอทิลีนลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ เพิ่มขึ้น ผลของความหนาต่อการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซเอทิลีนสำหรับฟิล์ม LDPE ที่มี ค่าความหนา 50 85 และ $100\ \mu\text{m}$ พบว่าการซึมผ่านของก๊าซไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม ในขณะที่การศึกษาค่าการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิระหว่าง $4-30^{\circ}\text{C}$ สำหรับ LDPE ที่ความหนา $85\ \mu\text{m}$ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก $4-30^{\circ}\text{C}$ การซึมผ่านของก๊าซผสม ระหว่างออกซิเจนกับเอทิลีนเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่การเปรียบเทียบซึมผ่านของฟิล์ม PE ทั้งสาม ชนิด พบว่า เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิ 19°C ลดลง นอกจากนี้ยัง พบว่าฟิล์ม LDPE ที่มีการผสมซีโอไลต์ 5 wt% มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซเอทิลีนและ ก๊าซผสมระหว่างออกซิเจนกับเอทิลีนที่มากกว่าฟิล์ม LDPE ที่ไม่มีการผสมซีโอไลต์

Supong และคณะ (2007) ศึกษาอิทธิพลของดินเหนียวต่อสมบัติเชิงกลและการกักเก็บ ก๊าซของฟิล์ม LDPE/ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต ที่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ พอลิเอทิลีน กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ทั้งการทดสอบแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร เนื่องจากดินเหนียวเสริมแรงให้กับพอลิ เมอร์เมตริกซ์และพบว่าค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มนาโนคอมโพสิตมีค่าลดลง ประมาณ 24% เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นจนถึง 7 wt% นอกจากนี้ยังมีการยืนยันว่าค่าการซึม ผ่านของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการซ้อนทับกันของชั้นดินเหนียวในพอลิเมอร์เมตริกซ์

Hong และ Krochta (2004) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการเคลือบ whey protein isolate (WPI) เพื่อเป็นตัวกักเก็บก๊าซออกซิเจนสำหรับฟิล์ม LDPE พบว่า WPI ถูกเคลือบลงบน LDPE ได้สำเร็จและส่งผลให้มีค่าการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วย WPI

Zhong และคณะ (2007) ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของดินเหนียว-พอลิเอทิลีน นาโนคอมโพสิตฟิล์ม โดยการเตรียมคอมพาวด์ระหว่างมอนมอริลโลไนต์ดัดแปรโครงสร้าง (organically modified montmorillonite) กับพอลิเมอร์สามชนิด คือ เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) LDPE และ HDPE ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และเป่าขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก โดยมีพอลิเอทิลีนที่กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPE) สองชนิดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MB100D) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MB226D) ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ LDPE และ HDPE นาโนคอมโพสิต ที่ปริมาณ 5 wt% การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นถึง 5 wt% สำหรับระบบของดินเหนียว/EVA ค่ามอดุลัสระหว่าง LDPE/MAPE และ LDPE ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่ามอดุลัสของระบบดินเหนียว/LDPE/MAPE เพิ่มขึ้น 37% และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซลดลง 30% สำหรับระบบของดินเหนียว/EVA เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น 5 wt% ในขณะที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสำหรับฟิล์มที่ใช้ MAPEs เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้มีค่าลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ HDPE และที่ปริมาณดินเหนียว 5 wt% สำหรับระบบ LDPE/MAPE พบว่ามีการปรับปรุงสมบัติความสามารถในการกักเก็บก๊าซออกซิเจนได้ 30% ด้วย

Brulé และ Flat (2006) ทำการเตรียมคอมโพสิตชนิดใหม่ที่เป็นการนำเอาเทคโนโลยีทางด้านอัลลอย (alloy) และนาโนคอมโพสิตมาผสมเข้าด้วยกัน โดยประกอบไปด้วยในลอน 6 (polyamide, PA6) พอลิโอเลฟิน (polyolefin, PO) และดินเหนียวนาโน (organoclay alloys) โดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าเป็นฟิล์มชั้นเดียว ที่มีความหนา 50 μm จากนั้นทดสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต (dynamic thermo mechanical analysis, DTMA) ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและสัญญาณวิทยาของฟิล์มนาโนคอมโพสิต จากการศึกษาสมบัติ DTMA ของ PA6/PE และ PA6/PE/ดินเหนียวนาโน ที่อุณหภูมิระหว่าง -100°C ถึง 220°C พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของมอดุลัสสะสมเพียงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 60°C ถึง 80°C และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 220°C แต่พบสิ่งที่น่าสนใจคือฟิล์มพลาสติกที่เป่าขึ้น

รูปได้มีสมบัติการกักเก็บเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง พบว่าฟิล์มนาโนคอมโพสิต มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนลดลง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PA6 และ PA6/ดินเหนียวนาโน

Krohn และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยการเป่า พบว่าความหนาแน่น ความหนาของ ฟิล์ม และการจัดเรียงตัวของผลึกเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำ โดยอัตราการ ซึมผ่านของไอน้ำแปรผันโดยตรงกับอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และอัตราส่วนระหว่าง การดึงฟิล์มตามแนวขนานกับเครื่องจักรกับแนวขวางของเครื่องจักร จากผลการทดลองอัตราการ ซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาของฟิล์มไม่มีผลต่อ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำมากนัก

Kurek และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกักเก็บก๊าซของฟิล์ม LDPE ที่มีความหนา 45 μm โดยการเคลือบผิวด้วยไคโตซาน (chitosan, CS) ความหนา 3 และ 5 μm จากการศึกษาความสามารถของ CS ในการเสริมความสามารถสำหรับการกักเก็บก๊าซของ ฟิล์ม LDPE/CS ที่อุณหภูมิ 4°C และ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 96% พบว่า การซึมผ่าน ของ O₂ ลดลงสองเท่าและการซึมผ่านของ CO₂ ลดลงสามเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE ที่ ไม่ได้รับการเคลือบผิว สำหรับการทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% พบว่าการซึมผ่านของ CO₂ มีค่า ต่ำกว่าการซึมผ่านของ O₂ ที่มีค่าเท่ากับ 1.02×10^{-17} g/m·s·Pa และ 6.18×10^{-17} g/m·s·Pa ตามลำดับ

2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์

Rahmati และ Modarress (2008) ได้ทำการศึกษาการดูดซับไนโตรเจนโดยซีโอไลต์ พบว่าซีโอไลต์แต่ละชนิดมีผลต่อการดูดซับ ไม่ว่าจะเป็นการทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ เพิ่มขึ้นหรือลดลง รวมไปถึงขนาดของซีโอไลต์ที่เลือกมาใช้ในการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้ว่าซี โอไลต์ขนาด 0.7 mm ดูดซับไนโตรเจนได้ดีที่สุดที่ความดันสูง

Siriwardane และคณะ (2003) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซด้วยซี โอไลต์ธรรมชาติ 3 ชนิดคือ ซีโอไลต์ชาร์บาไซท์ธรรมชาติ (natural herschelite sodium chabazite ชนิดโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต) ไคลนอปติโลไลท์ (clinoptilolite ชนิด โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต) และ

โคลนเชื้อพดิลไลท์ (ชนิดโพแทสเซียม แคลเซียม อะลูมิเนียมซิลิเกต) ที่มีประจุบวกต่างกันแต่มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากันที่อุณหภูมิ 25°C โดยเลือกใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) และก๊าซออกซิเจน (O₂) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5, 99.5 และ 99.6% ตามลำดับจากการทดลองนำซีโอไลต์ธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดมาวิเคราะห์ปริมาณในการดูดซับก๊าซที่อุณหภูมิ 25°C ความดัน 300 psi พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด สามารถดูดซับก๊าซ CO₂ ได้ แต่ซีโอไลต์ชนิดที่มีปริมาณโซเดียมและพื้นที่ผิวสูงที่สุดจะมีค่าความสามารถในการดูดซับทั้งในก๊าซ CO₂ บริสุทธิ์และสามารถแยก CO₂ ในก๊าซผสม CO₂/N₂/O₂ ได้สูงสุด

ธีระพงษ์ และคณะ (2553) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนและทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen) ในตัวอย่างน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง โดยใช้ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์จากถ้ำชายอ้อย (ZBG) และซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 4A (Z4A) เป็นตัวดูดซับ การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจนและทีเคเอ็นนั้นใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานอเมริกา (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) และคู่มือวิเคราะห์น้ำเสียสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย โดยใช้กฎอัตราอินทรีเกรดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order) ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order) สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (pseudo first order) และปฏิกิริยาอันดับสอง (pseudo second order) จากการทดลองแบบกะระยะเวลา 14 วัน พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนและทีเคเอ็น ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศร่วมกับการใช้ ZBG และซีโอไลต์ Z4A พบว่าเหมาะกับจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจากกระบวนการดูดซับของซีโอไลต์ควบคู่กับการทำงานของจุลินทรีย์ โดย ZBG มีสมบัติใกล้เคียงกับ ซีโอไลต์ Z4A จึงส่งผลให้จลนพลศาสตร์การดูดซับใกล้เคียงกัน คือ การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนของ ZBG และ Z4A เท่ากับ 6.13 และ 7.70 mg/g ตามลำดับ

อุษา (2549) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติในการบำบัดแอมโมเนียในน้ำเสีย โดยการใช้ซีโอไลต์จากจังหวัดสงขลาเป็นสารดูดซับตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็งในเขตจังหวัดสงขลา 2 โรงงาน ทำการทดลองที่ระยะเวลา 2 hr และ 12 hr จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณแอมโมเนียลดลงแต่มีค่าความเป็นกรดสูงขึ้น หลังนำน้ำเสียมาผ่านการดูดซับด้วยซีโอไลต์ ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการแช่ซีโอไลต์ในน้ำตัวอย่างคือ 2 hr และปริมาณซีโอไลต์ต่อน้ำตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 g/100 ml และประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณ

แอมโมเนียออกจากน้ำเสียจากโรงงานอาหารแช่แข็งโรงงานที่หนึ่งและโรงงานที่สอง มีค่าเท่ากับ 43.81% และ 78.79% ตามลำดับ ซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวทางในการนำไปใช้ในการดูดซับแอมโมเนียในน้ำทิ้งได้

อุษาและวิภาญดา (2552) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำด้วยซีโอไลต์ จากการเกิดอันตรกิริยาของฟอสเฟตบนโครงสร้างซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 โดยการใช้ระเบียบวิธีทางเคมีคอมพิวเตอร์คำนวณอัตรากรียาของการดูดซับฟอสเฟตบนโครงสร้างซีโอไลต์พบว่าโครงสร้างที่ถูกดัดแปลงของซีโอไลต์มีผลต่อการเกิดอันตรกิริยาของระบบ $H_3PO_4/H-ZSM-5$ มีค่าพลังงานการดูดซับ (adsorption energy) เท่ากับ -26.23 kcal/mol สำหรับแบบจำลอง 5T-quantum cluster และ 12T, 34T, 128T ONIOM model (T=tetrahedron) มีค่าพลังงานการดูดซับเท่ากับ -28.76, -37.34 และ -39.47 kcal/mol ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสมบัติการดูดซับของฟอสเฟตบนซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่จำเพาะเจาะจงของซีโอไลต์

อุษาและศุภโชค (2548) ได้ทำการศึกษาการดูดซับร่วมแอมโมเนียและฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยซีโอไลต์บน H-zeolite ด้วยวิธีการคำนวณทางเคมีคอมพิวเตอร์ โดยแอมโมเนียเข้าทำปฏิกิริยากับ H-zeolite บริเวณที่แสดงความเป็นกรดของบรอนสเตด จากการคำนวณพบว่าในระบบที่มีการดูดซับร่วมจะช่วยให้การดูดซับของสารทั้งสองชนิดบนซีโอไลต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งผลการคำนวณที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการเคมี

2.7.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต

Nampicth และ Magaraphan (2012) ได้ทำการศึกษาการลดต้นทุนของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพและปรับปรุงสมบัติโดยเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized natural rubber, ENR) ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (PBAT) โดยทำการผสม ENR ในอัตราส่วนคงที่ที่ 10 wt% ส่วน PLA และ PBAT จะผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและมีการเติม Irganox[®] และ Uvinul[®] เพื่อเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและแสงยูวีตามลำดับ นอกจากนี้ได้เติมเขม่าดำ (carbon black, CB) เนื่องจาก CB เป็นสารให้สีดำดูดซับแสงและเป็นสารเสริมแรงได้ด้วย โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามด้วยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มและเครื่องเป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 160-170°C ความเร็ว 26 rpm จากนั้นนำฟิล์มที่ผลิตได้มาทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณ

PBAT เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มลดลง ระยะยืดของฟิล์มเพิ่มขึ้น จากการทดสอบค่าสีของฟิล์มพบว่าให้สีที่สว่างขึ้นและให้สีเขียวและสีฟ้ามากขึ้น การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PBAT เนื่องจากค่าการซึมผ่านไอน้ำของ PBAT จะให้ค่าที่สูงกว่าค่าของ PLA

Pisutthian *et al.*, (2010) ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT กับ NR ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 wt% ของ PBAT โดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 120°C จากนั้นนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางที่มีความหนาประมาณ 0.06 mm ที่อุณหภูมิสังกะ 120-145°C และอุณหภูมิที่ตาย 140°C ความเร็วรอบของสังกะ 100 rpm ความดันลม 5 psi ความเร็วในการหมุนเก็บ 1 m/min จากการนำไปทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามแนวเครื่องจักร และแนวขวางของเครื่องจักร ด้วยความเร็ว 500 mm/min พบว่า NR ช่วยปรับปรุงค่ามอดุลัส ระยะยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาดให้กับพอลิเมอร์ผสม ซึ่งปริมาณ NR ที่เหมาะสมที่สุด คือ 5 และ 10 wt% ของ PBAT

Mohanty and Nayak (2012) ได้ทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตฟิล์มระหว่าง PBAT กับนาโนเคลย์ 4 ชนิด คือ โซเดียมมอนมอริลโลไนต์ (Na^+ MMT) Cloisite 20A (C20A) Cloisite 30B (C30B) และเบนโทไนท์ (bentonite, B109) ที่อัตราส่วน 1 3 และ 5 wt% นอกจากนี้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ PBAT และ นาโนเคลย์ โดยมีวิธีการเตรียมสองขั้นตอน คือ การเตรียม PBAT กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA-g-PBAT) ที่อัตราส่วน 3 wt% ของ PBAT และนำ MA-g-PBAT ที่เตรียมได้ผสมกับ C20A C30B และ B109 ที่อัตราส่วน 3 wt% โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนา 0.07 mm จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามแนวเครื่องจักร และแนวขวางของเครื่องจักร ด้วยความเร็ว 50 mm/min เปรียบเทียบกับฟิล์ม PBAT พบว่า PBAT-g-B109 เป็นสูตรที่ดีที่สุด คือ มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด เท่ากับ 58.18 MPa และ 445.93 g/mm ตามลำดับ ในขณะที่ ฟิล์ม PBAT มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด เท่ากับ 30.17 MPa และ 335.76 g/mm ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA พบว่านาโนคอมโพสิตฟิล์มที่เตรียมได้มี T_g , T_c และเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าฟิล์ม PBAT

Chen *et al.*, (2011) ทำการเตรียมและตรวจสอบลักษณะเฉพาะของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับมอนมอริลโลไนต์ (MMT) ที่อัตราส่วน 0-10 wt% โดยทำการดัดแปร MMT

ด้วย octadecylamine (ODA) และตรวจสอบลักษณะเฉพาะ ผลการศึกษาชั้นฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ของนาโนคอมโพสิต พบว่าพื้นผิวของ PBAT/MMT ตัดแปรด้วย ODA เรียกว่า PBAT/MMT ที่ไม่ตัดแปร ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตฟิล์มสูงกว่าฟิล์ม PBAT และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC แสดงให้เห็นว่า MMT ที่มีการตัดแปรช่วยเพิ่มอัตราการตกผลึกของ PBAT ได้ นอกจากนี้ MMT ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ความแข็งดึงของนาโนคอมโพสิตฟิล์มเพิ่มขึ้น และส่งผลให้โมดูลัสสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ผลของการตัดแปร MMT ด้วย ODA พบว่าความชอบน้ำเพิ่มขึ้นและการซึมผ่านของไอน้ำลดลงอย่างมาก

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density (polyethylene), LDPE) ชนิด LD2426K จำหน่ายโดยบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) มีจุดหลอมเหลว เท่ากับ 150 - 190°C ดัชนีการไหลเท่ากับ 4 g/10 min เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C ด้วยตุ้มน้ำหนัก 2,160 g และความหนาแน่นเท่ากับ 0.924 g/cm³
2. พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทเรพทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) ชนิด Ecoflex™ F BX 7011 ผลิตโดย BASF มีจุดหลอมเหลว เท่ากับ 110 - 120°C ดัชนีการไหลเท่ากับ 2.7 – 4.9 g/10 min เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C ด้วยตุ้มน้ำหนัก 2,160 g และความหนาแน่นเท่ากับ 1.25 – 1.27 g/cm³
3. ซีโอไลต์สังเคราะห์ ชนิด A (zeolite, type A) ขนาดอนุภาค 3.9 μm มีเส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุน 4 Å หรือประมาณ 0.4 nm ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท พีคิวเคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
4. พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) มีน้ำหนักโมเลกุล 400 g/mol ผลิตโดย บริษัท Fluka
5. เอทานอล (ethanol, EtOH) จัดจำหน่ายโดยบริษัท High Science Ltd.

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดย บริษัท Mettler Co., Ltd.
2. เครื่องวัดความหนา ความละเอียด 0.01 mm ผลิตโดย บริษัท Teclock™ รุ่น SM-112
3. เครื่องวัดความหนา ความละเอียด 0.001 mm ผลิตโดย บริษัท Central Tools รุ่น 6144
4. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 ml
5. ขวดดูแรน (duran bottle) ขนาด 1000 ml

6. แท่งแม่เหล็ก
7. บีกเกอร์ ขนาด 100 mL
8. นาฬิกาจับเวลา (ALBA รุ่น SW01-X008)
9. เครื่องกวนแบบให้ความร้อน (Heidolph รุ่น MR3001)
10. โถดูดความชื้น
11. ตู้อบความร้อน ผลิตโดย บริษัท MEMMERT จัดจำหน่ายโดย บริษัท เค เอส พี อินเตอร์เคม จำกัด
12. ตู้อบสุญญากาศ ผลิตโดย บริษัท ไชแอนติฟิค โปรโมชัน จำกัด

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดเป่าฟิล์มประกอบด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) Brabender™ GmbH & Co.KG รุ่น Extruder 19/25D ดายสำหรับเป่า (annular die) และอุปกรณ์ดึงฟิล์ม
2. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ผลิตโดยบริษัท Prism™ รุ่น TSE 16TC
3. เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 และตัดชิ้นทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624 แบบ Die C
4. เครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ผลิตโดยบริษัท LLOYD instrument รุ่น LR10K
5. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอรимิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ผลิตโดยบริษัท NETZSCH และ รุ่น DSC7 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer
6. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) รุ่น Tensor 27 ผลิตโดยบริษัท Bruker
7. เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารกับอุณหภูมิ (simultaneous thermal analysis, TGA) รุ่น STA 449 F3 Jupiter® ผลิตโดยบริษัท NETZSCH
8. เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (laser particle size analyzer, LPSA) รุ่น LS230 ผลิตโดยบริษัท Coulter
9. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability tester) ผลิตโดย Universite Teknologi Malaysia
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-5800LV

3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.4.1 การตัดแปรซีโอไลต์เอ ด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (Metin *et al.*, 2004)

1. ผสมซีโอไลต์เอกับ PEG โดยการใส่ PEG ปริมาณ 3 wt% ของซีโอไลต์เอ ในสารละลายเอทานอลเข้มข้น 50% โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างซีโอไลต์เอต่อสารละลายเท่ากับ 1:0.3 w/v
2. ปั่นกวนของผสมที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 2 h จากนั้นปล่อยให้แห้งไว้ 1 h แล้วอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 110°C ความดัน 400 mbar เป็นเวลา 3 h
3. นำซีโอไลต์เอที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเก็บใส่โถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องจนกว่าจะนำไปใช้งาน

3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมปาวด์ที่ผสมซีโอไลต์เอ

นำ LDPE และซีโอไลต์เอ ทั้งชนิดตัดแปรและไม่ตัดแปร สัดส่วน 94:6 wt% ผสมพร้อมกันในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ สภาวะการผสมมีดังนี้ อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดโซน 1, 2 และ 3 (die) เท่ากับ 130°C, 140°C และ 150°C ตามลำดับความเร็วรอบของสกรู เท่ากับ 100 rpm จากนั้นทำการหล่อเย็นด้วยน้ำและตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก อบคอมปาวด์ในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 h กำหนดชื่อ LDPE ผสมซีโอไลต์ชนิดไม่ตัดแปรพื้นผิวเป็น L/Z-UT และ LDPE ผสมซีโอไลต์ชนิดตัดแปรพื้นผิวเป็น L/Z-T

นำ PBAT และซีโอไลต์เอ ทั้งชนิดตัดแปรและไม่ตัดแปร สัดส่วน 94:6 wt% ผสมพร้อมกันในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ สภาวะการผสมมีดังนี้ อุณหภูมิสกรูโซน 1 และ 2 เท่ากับ 100°C และ 110°C อุณหภูมิตาย (die) เท่ากับ 120°C ความเร็วรอบของสกรู เท่ากับ 100 rpm จากนั้นทำการหล่อเย็นด้วยน้ำและตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก อบคอมปาวด์ในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 h กำหนดเรียก PBAT ผสมซีโอไลต์ชนิดไม่ตัดแปรพื้นผิวเป็น P/Z-UT และ PBAT ผสมซีโอไลต์เอชนิดตัดแปรพื้นผิว เป็น P/Z-T

3.4.3 การขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูป (blown film extrusion)

ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (blown-film extrusion) สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป แสดงในตารางที่ 3.1-3.4

ตารางที่ 3.1 สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม LDPE และ LDPE ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	Temperature (°C)				Screw speed (rpm)	Blowing pressure (bar)	Take of speed (m/min)
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Die Zone			
LDPE	0.05-0.06	140	150	160	155	45	10	2
L/Z-UT	0.05-0.06	155	165	175	170	30	5	1
L/Z-T	0.05-0.06	135	145	155	150	35	5	1

ตารางที่ 3.2 สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	Temperature (°C)				Screw speed (rpm)	Blowing pressure (bar)	Take of speed (m/min)
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Die Zone			
PBAT	0.05-0.06	125	130	130	129	25	5	2
P/Z-UT	0.05-0.06	125	128	129	132	30	10	1
P/Z-T	0.05-0.06	125	128	130	127	30	10	1

ตารางที่ 3.3 สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม LDPE และ LDPE ผสมซีโอไลต์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.09-0.10 mm

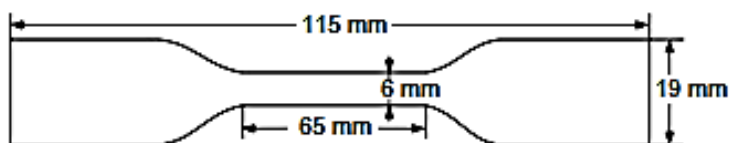
Samples	Thickness (mm)	Temperature (°C)				Screw speed (rpm)	Blowing pressure (bar)	Take of speed (m/min)
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Die Zone			
LDPE	0.09-0.10	130	140	150	140	60	5	1
L/Z-UT	0.09-0.10	155	165	175	170	40	5	1
L/Z-T	0.09-0.10	135	145	155	150	50	5	1

ตารางที่ 3.4 สูตรการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ผสมซีโอโลต์เอททั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว ที่ความหนา 0.09-0.10 mm

Samples	Thickness (mm)	Temperature (°C)				Screw speed (rpm)	Blow feed (bar)	Take of speed (m/min)
		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Die Zone			
PBAT	0.09-0.10	125	129	129	124	25	10	1
P/Z-UT	0.09-0.10	125	128	129	132	45	5	1
P/Z-T	0.09-0.10	125	128	130	127	40	5	1

3.4.4 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile properties testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยนำแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปแล้วตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ ตัดตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และตามแนวขวางเครื่องจักร (transverse direction, TD) ใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ type IV แสดงดังรูปที่ 3.1 วัดความหนาและความกว้างของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่งในช่วงระยะยึด และหาค่าเฉลี่ย นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด โดยใช้ Load Cell 250 N ใช้ความเร็วในการทดสอบ 200 mm/min ใช้ค่าความยาวเกจ (gauge length) เท่ากับ 65 mm ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 6 ชิ้น รายงานผลเป็นค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break, σ_b) และค่าความเครียด ณ จุดขาด (strain at break, ϵ_b) โดยค่ามอดูลัสของยัง ความเค้น ณ จุดขาด และ ความเครียด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1-3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D882

$$\text{modulus, } E = \frac{\sigma_b}{\epsilon_b} \quad (3.1)$$

เมื่อ σ_b = ค่าความเค้น ณ จุดขาด

ϵ_b = ค่าความเครียด ณ จุดขาด

$$\text{stress at break, } \sigma_b = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

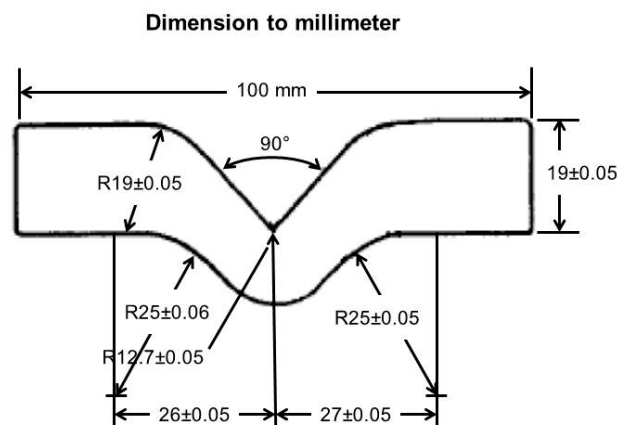
เมื่อ F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm^2)

$$\text{elongation at break, } \epsilon_b = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ L = ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้สูงสุดจนขาด
 L_0 = ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (65 mm)

3.4.5 การทดสอบความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 แบบมุม (Die C) โดยการตัดชิ้นตัวอย่างตามแนวเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักร วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง คือ บริเวณมุม 90° ของชิ้นทดสอบและตามความกว้างของชิ้นทดสอบหาค่าเฉลี่ยของความหนาที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.2 นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ใช้ Load Cell 250 N ความเร็วในการทดสอบ 200 mm/min ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 6 ชิ้น บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบฉีกขาด นำมาหารด้วยความหนาของชิ้นทดสอบ ได้เป็นค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength, N/mm) โดยค่าสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.4



รูปที่ 3.2 ชิ้นทดสอบแบบมุมสำหรับการทดสอบการฉีกขาด

$$\text{Tear strength} = \frac{F}{D} \quad (3.4)$$

เมื่อ F = แรงดึงที่ทำให้ฉีกชั้นทดสอบขาด (N)
 D = ความหนาของชั้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm)

3.4.6 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (gas permeation testing)

ทำการทดสอบการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความดันในการทดสอบเท่ากับ 1, 3, 5, และ 8 bar เวลาในการทดสอบสูงสุด 10 min ทดสอบ 5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) การวัดการซึมผ่านของก๊าซได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ ดังแสดงในรูป 3.3 รายงานผลเป็นความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ หน่วย $\text{cc}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot 10 \text{ min}\cdot\text{atm}$



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ

- (1) ถังบรรจุก๊าซและเกจวัดปริมาณก๊าซ (2) ท่อก๊าซนำเข้า (3) ช่องบรรจุชิ้นตัวอย่าง
 (4) ท่อกักเก็บก๊าซ (5) สเกลวัดอัตราการไหลของฟองก๊าซ (6) การซึมผ่านของก๊าซ

3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (differential scanning calorimetry, DSC)

ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ โดยตัดตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ใน อลูมิเนียมแพน (aluminum pan) ใช้ตัวอย่างประมาณ 1–5 mg วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 20–200°C ขั้นตอนในการวิเคราะห์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการให้ความร้อนซึ่ง อัตราในการให้ความร้อนคงที่ที่ 10°C/min และช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 20°C – 200°C ขั้นตอนที่สองเป็นการหล่อเย็น ซึ่งอัตราในการหล่อเย็นคงที่ที่ 10°C/min จากอุณหภูมิ 200°C จนถึง 20°C และรอบที่สามเป็นการให้ความร้อน ซึ่งอัตราในการให้ความร้อนคงที่ที่ 10°C/min และช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 20°C – 200°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน รายงานผล เป็นค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) คำนวณหาปริมาณ ผลึก โดยค่าความร้อนของการหลอมเหลว (fusion heat, ΔH_f^0) ของผลึก LDPE 100% มีค่า เท่ากับ 293 J/g (Cardinaud and McNally, 2013) และค่าความร้อนของการหลอมเหลว (fusion heat, ΔH_f^0) ของผลึก PBAT 100% มีค่าเท่ากับ 114 J/g (Mohanty *et al.*, 2010) คำนวณหา ปริมาณผลึกได้จากสมการที่ 3.5

$$\text{Degree of crystallinity (\%X}_c) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ X_c = ปริมาณความเป็นผลึก (%)

ΔH_f = ค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึก LDPE และ PBAT

ΔH_f^0 = ค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึก LDPE 100% มีค่า

เท่ากับ 293 J/g และ PBAT 100% มีค่าเท่ากับ 114 J/g

3.4.8 การวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อน (thermalgravimetric analysis, TGA)

ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 30-700°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะทดสอบ 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน รายงานผลการทดสอบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ สูญเสียไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและอุณหภูมิการเสื่อมสลายของสสาร (thermal degradation temperature, T_d) เช่น T_5 คือ อุณหภูมิเมื่อน้ำหนักหายไป 5%

3.4.9 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size analysis, LPSA)

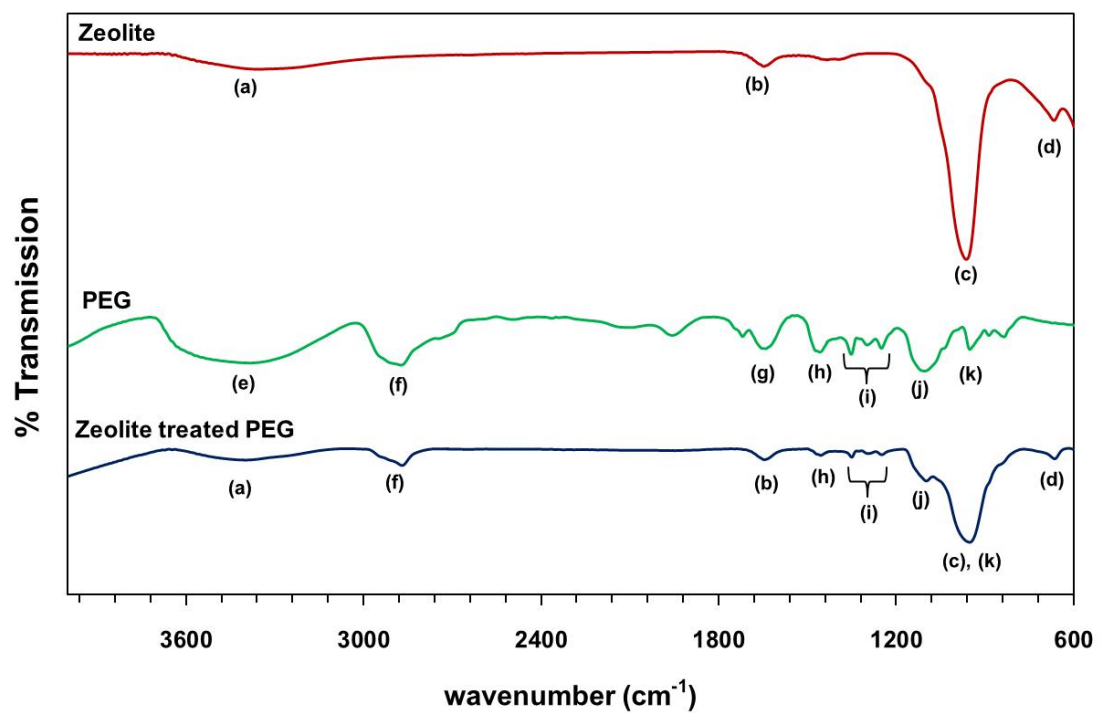
ทำการวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างซีโอไลต์เอที่เป็นผงแห้ง โดยวิเคราะห์ในตัวกลางที่เป็นของเหลว (น้ำ) สามารถวัดขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.04 ถึง 2000 μm เครื่องจะทำการยิงแสงเลเซอร์ไปยังตัวอย่างที่ทำการทดสอบ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของขนาด (D50) และการกระจายของอนุภาค

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การดัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วย PEG

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์เอ พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) และซีโอไลต์เอดัดแปรพื้นผิวด้วย PEG ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.1 ตำแหน่งเลขคลื่นที่เป็นการเคลื่อนไหวของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในซีโอไลต์เอ PEG และซีโอไลต์เอดัดแปรพื้นผิวด้วย PEG แสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของซีโอไลต์เอ PEG และซีโอไลต์เอดัดแปรพื้นผิวด้วย PEG

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพีดในซีโอล์ดัดแปรพื้นผิวด้วย PEG

ตำแหน่ง	แถบการดูดกลืน (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
(a)	3399	H-bonded OH stretching
(f)	2869	-CH ₂ - stretching vibration
(b)	1645	H ₂ O bending
(h)	1454	-CH ₂ - stretching
(i)	1294, 1248	-C-O-C- stretching
(j)	1097	C-O-C stretching
(c), (k)	951	External T-O , crystalline
(d)	664	External, internal double-ring vibration

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพีดในซีโอล์ดเอ

ตำแหน่ง	แถบการดูดกลืน (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
(a)	3399	H-bonded OH stretching
(b)	1647	H-bonded OH stretching
(c)	962	-Si-O-Si- stretching
(d)	666	-Si-O-Si- stretching

ตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพีดใน PEG

ตำแหน่ง	แถบการดูดกลืน (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
(e)	3382	H-bonded OH stretching
(f)	2873	-CH ₂ - stretching vibration
(g)	1719	-CH ₂ - stretching vibration
(h)	1457	-CH ₂ - stretching vibration
(i)	1298, 1249	-C-O-C- stretching
(j)	1104	-C-O-C- stretching
(k)	951	Crystalline

พิจารณาผลการดัดแปรพื้นผิวของซีโอไลต์เอด้วย PEG พบว่าประสบผลสำเร็จ เนื่องจาก หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในอนุภาคซีโอไลต์เอที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏใน PEG พบว่ามีพีคที่เกิดการซ้อนทับกันระหว่างซีโอไลต์เอดัดแปรพื้นผิวและ PEG เมื่อพิจารณาสเปกตรัม FTIR ของ PEG จะปรากฏพีคที่เลขคลื่น 3382 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เลขคลื่นที่ 2873 cm^{-1} , 1719 cm^{-1} และ 1457 cm^{-1} เป็นการสั่นของหมู่เอทิล (-CH₂-) เลขคลื่นที่ 1249 cm^{-1} และ 1104 cm^{-1} เป็นการสั่นของหมู่อีเทอร์ (-C-O-C-) และเลขคลื่นที่ 951 cm^{-1} เป็นการสั่นของผลึกใน PEG (Nuruk and Suwabun, 2009; Kolhe and Kannan, 2003) และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของซีโอไลต์เอดัดแปรพื้นผิว พบว่าปรากฏพีคของ PEG ที่เลขคลื่น 1454 cm^{-1} เลขคลื่น 1294 cm^{-1} เลขคลื่น 1248 cm^{-1} เลขคลื่น 1097 cm^{-1} และเลขคลื่น 951 cm^{-1} ทำให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันของ PEG บนอนุภาคซีโอไลต์เอ จึงสามารถยืนยันการดัดแปรพื้นผิวเชิงกายภาพของซีโอไลต์เอด้วย PEG ได้

4.2 พิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ผสมซีโอไลต์เอ

4.2.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T จากการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนาระหว่าง 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่ามอดุลัส (modulus, E) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress, σ_y) และค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break, σ_b) ของฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีค่าสูงกว่าฟิล์ม LDPE คาดว่าอาจเนื่องจากซีโอไลต์เอสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์และทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง เมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม จึงส่งผลให้ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น (Chang *et al.*, 2013) ในขณะที่ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break, ϵ_b) ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้บ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระดับสูงระหว่าง LDPE กับอนุภาคซีโอไลต์เอ ผลของการเคลือบผิวในซีโอไลต์เอ พบว่า E, σ_y , σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม L/Z-T แสดงค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม L/Z-UT

ตารางที่ 4.4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
LDPE	0.050±0.005	270.±72	9.5±0.5	10±1	9.5±0.3	173±42
L/Z-UT	0.060±0.002	380±36	10.7±0.7	11±1	11.0±0.5	188±7
L/Z-T	0.054±0.006	395±66	11.5±1.3	12±0	13.0±1.2	233±29

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาระหว่าง 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร (transverse direction, TD) แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า E, σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีค่ามากกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจากซีโอไลต์เอทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงส่งผลให้ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการเติมอนุภาคซีโอไลต์เอที่มีความแข็งแรงลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์

ตารางที่ 4.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
LDPE	0.048±0.004	332±62	8.7±2.0	9±3	8.7±2.6	61±11
L/Z-UT	0.055±0.003	404±30	8.0±1.6	11±0	10.2±0.1	73±26
L/Z-T	0.060±0.005	402.8±66	8.2±1.1	10±0	10.0±1.1	123±56

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาระหว่าง 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าค่า E และ σ_y ของฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มากกว่าฟิล์ม LDPE ค่า σ_b มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากซีโอไลต์เอทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงส่งผลให้ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของซีโอไลต์เอกับเมทริกซ์ได้ดีขึ้นและค่า ϵ_b ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง เพราะการเติมอนุภาคซีโอไลต์เอที่มีความ

ซึ่งอาจจะลดความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guichon *et al.*, 2003

ตารางที่ 4.6 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตาม แนวเครื่องจักร ความหนา 0.9-0.10 mm

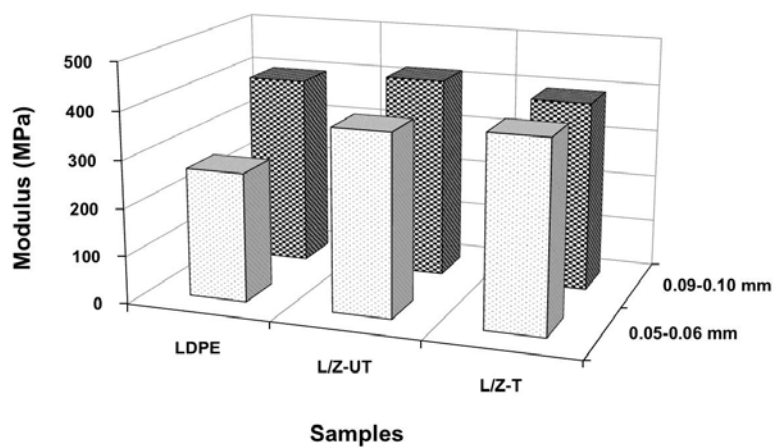
Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
LDPE	0.096±0.009	399±55	5.7±1.0	10±1	13.3±2.3	339±62
L/Z-UT	0.103±0.005	421±5	9.5±1.5	12±0	13.3±0.9	296±21
L/Z-T	0.086±0.006	396±76	7.0±0.9	11±1	13.1±1.8	298±27

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา ระหว่าง 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่า E, σ_y , σ_b และ ϵ_b มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากฟิล์มจะจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรมากกว่าแนวขวางเครื่องจักร ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเป่าฟิล์มที่มีการเป่าขึ้นรูปฟิล์มและการดึงฟิล์มม้วนเก็บตามแนวเครื่องจักร โดยมีความยาวของลูกโป่งตามแนวเครื่องจักรและอัตราเร็วในการม้วนเก็บฟิล์ม เท่ากับ 60 cm และ 1 m/min ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตายและลูกโป่ง เท่ากับ 2.5 cm และ 8-10 cm ตามลำดับ สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีแรงกระทำตามแนวเครื่องจักรมากกว่าแนวขวางเครื่องจักร อาจส่งผลให้สายโซ่เกิดการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรมากกว่าแนวขวางเครื่องจักร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Carotenuto *et al.*, 2012 ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมแกรไฟต์นาโนพลาเลท (GNP) พบว่าเมื่อมีการเติม GNP ที่ปริมาณ 5 wt% ค่า ϵ_b ของฟิล์ม ทั้งการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรมีแนวโน้มลดลงและความต้านทานต่อแรงดึงในแนวขวางเครื่องจักรมีความอ่อนแอ กล่าวคือ การดึงฟิล์มขณะขึ้นรูปจะช่วยจัดเรียงตัวของโมเลกุลพลาสติกให้เป็นระเบียบและอยู่ในทิศทางเดียวกับแรงดึง ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามแนวที่ดึง แต่เมื่อพิจารณาผลของการตัดแปรพื้นผิว พบว่าฟิล์ม L/Z-T มีค่ามากกว่าฟิล์ม ฟิล์ม L/Z-UT เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างผิวสัมผัสของพลาสติก LDPE และอนุภาคซีโอไลต์เอซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญต่อสมบัติเชิงกล (Metin *et al.*, 2004)

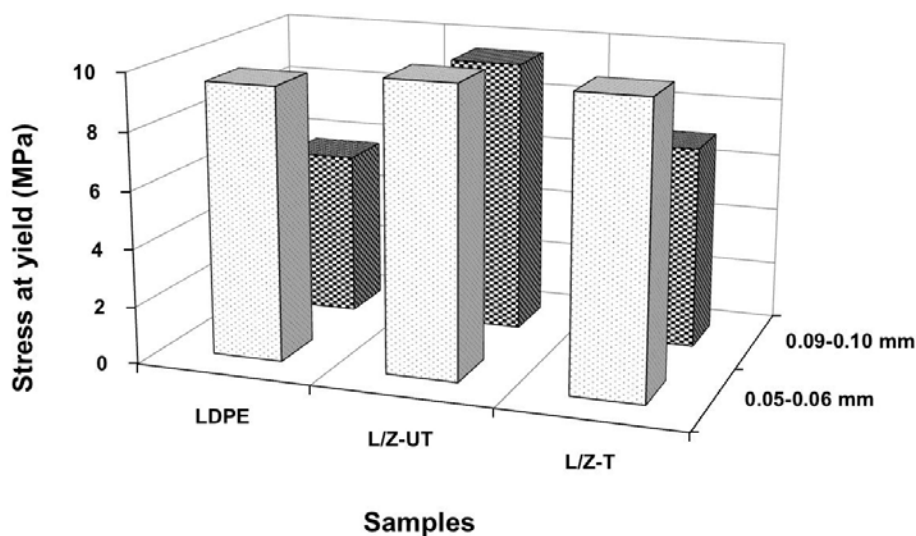
ตารางที่ 4.7 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวขวาง เครื่องจักร ความหนา 0.09-0.10 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
LDPE	0.099±0.004	396±60	8.8±1.2	11±1	10.2±1.0	100±26
L/Z-UT	0.087±0.004	307±44	9.0±1.1	10±1	9.7±0.8	153±52
L/Z-T	0.094±0.007	414±29	7.7±0.6	11±0	10.1±0.6	144±38

พิจารณาค่า E ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์เอทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว มีค่า E มากกว่าฟิล์ม LDPE เนื่องจากอนุภาคซีโอไลต์เอมีความแข็งแรงและคาดว่าจะสามารถกระจายตัวได้ดีใน LDPE เมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม แรงกระทำที่พอลิเมอร์ได้รับจะเกิดการถ่ายโอนแรงไปยังซีโอไลต์เอ ทำให้ฟิล์มสามารถต้านทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น ค่า σ_y ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ค่า σ_y ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมซีโอไลต์เอ ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่า σ_y เพิ่มขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์เอชนิดไม่ดัดแปรพื้นผิว และค่า σ_y ลดลงเมื่อเติมซีโอไลต์เอชนิดดัดแปรพื้นผิว แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าฟิล์ม LDPE และฟิล์ม L/Z-UT ทั้งสองช่วงความหนามีค่าใกล้เคียงกันมาก



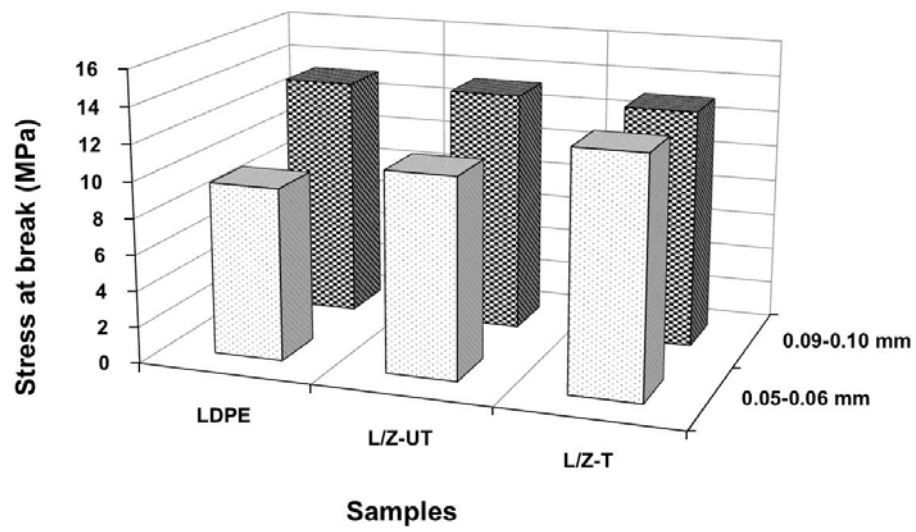
รูปที่ 4.2 มอดุลัสของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร



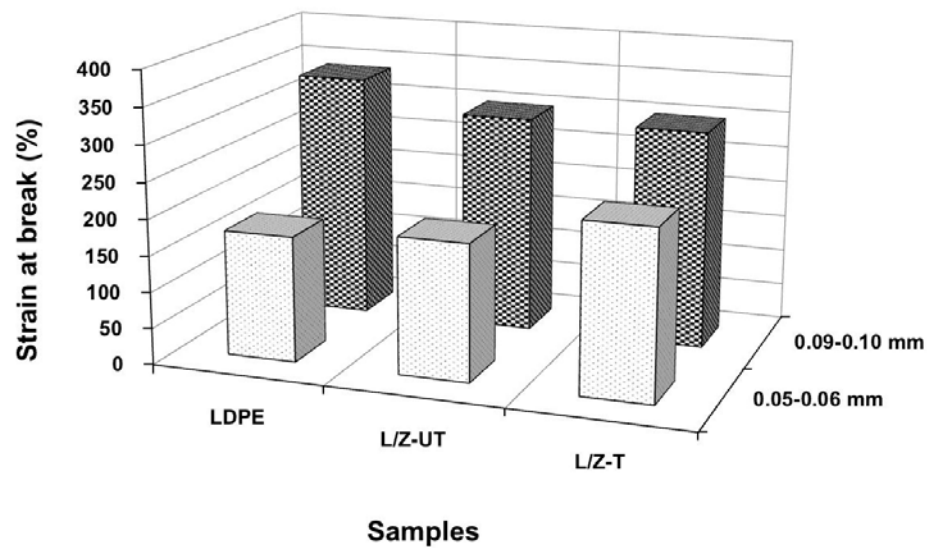
รูปที่ 4.3 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

ค่า σ_b ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.4 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า σ_b ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าใกล้เคียงกัน และแสดงค่าที่สูงกว่าฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

ค่า ϵ_b ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.5 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า ϵ_b ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากอัตราการป้อนพลาสติกที่สูงสำหรับขึ้นรูปฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm และข้อจำกัดของเครื่องมือ จึงส่งผลให้การดึงฟิล์มขณะหลอมเหลวทำได้ยาก แต่ทั้งนี้ก็ยังแสดงค่าที่สูงกว่าฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

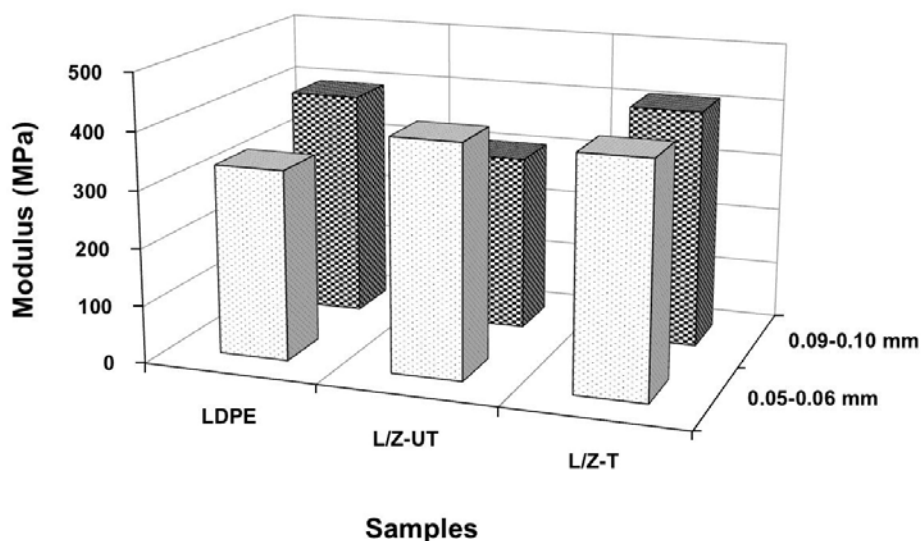


รูปที่ 4.4 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

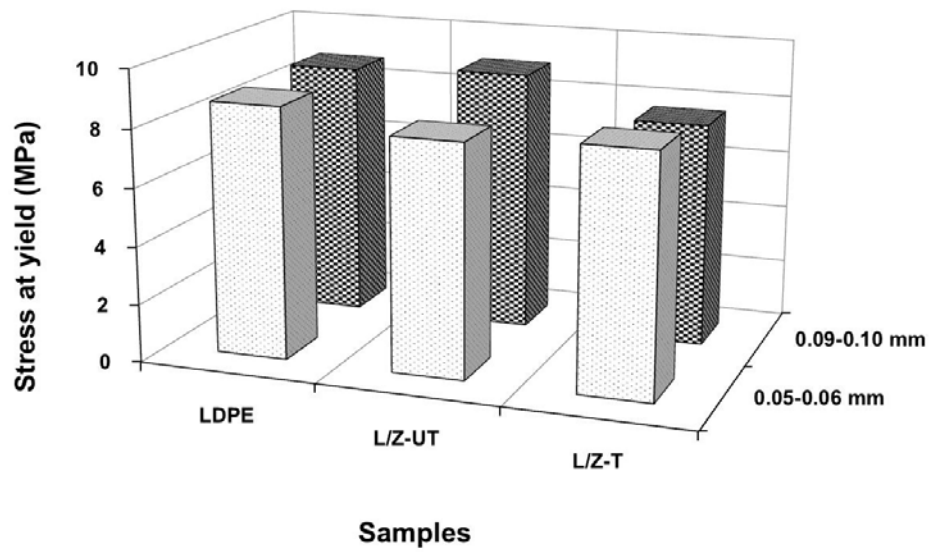


รูปที่ 4.5 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

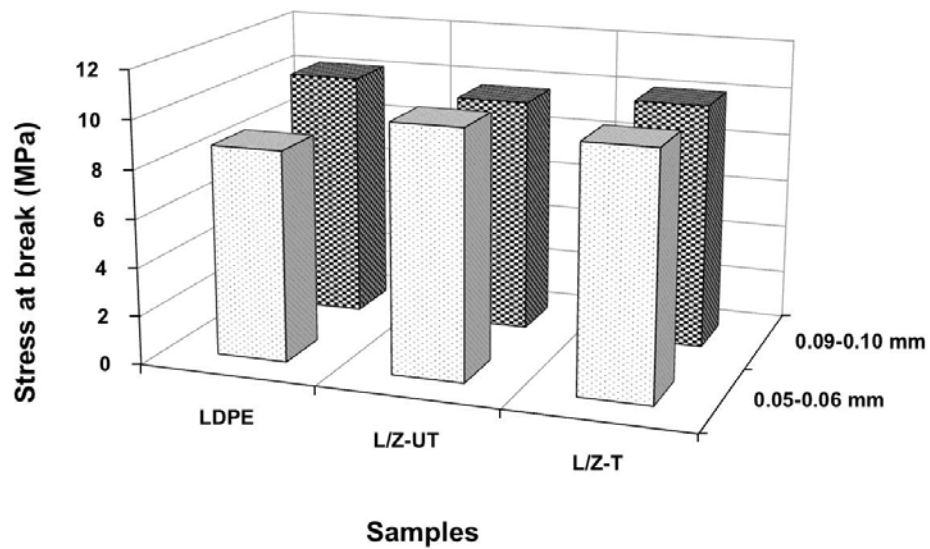
ค่า E ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าสูงกว่าฟิล์ม LDPE เช่นเดียวกับฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักร ค่า σ_y ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าค่า σ_y ของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ ทั้งฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ค่า σ_b ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าค่า σ_b ของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ ทั้งฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm เช่นเดียวกับผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักร ค่า ϵ_b ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และความหนา 0.09-0.10 mm แสดงค่า ϵ_b เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ



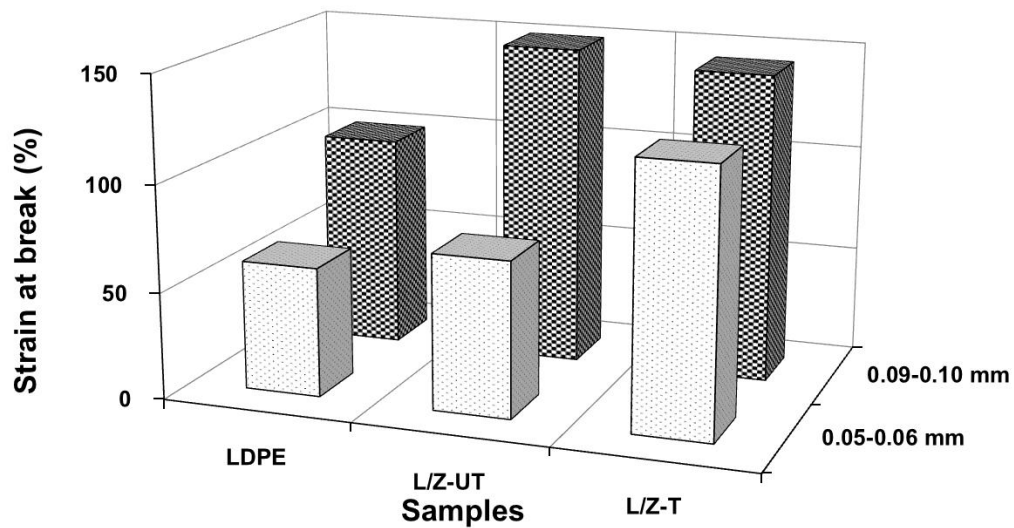
รูปที่ 4.6 มอดุลัสของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร



รูปที่ 4.7 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่าง ๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

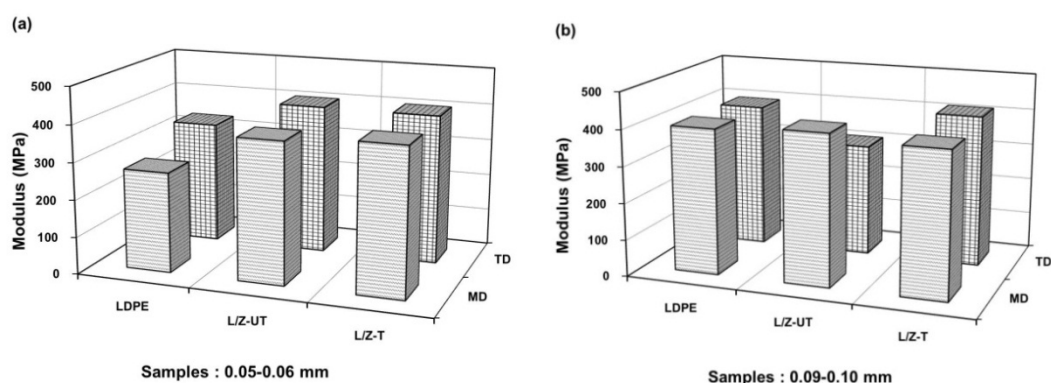


รูปที่ 4.8 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่าง ๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร



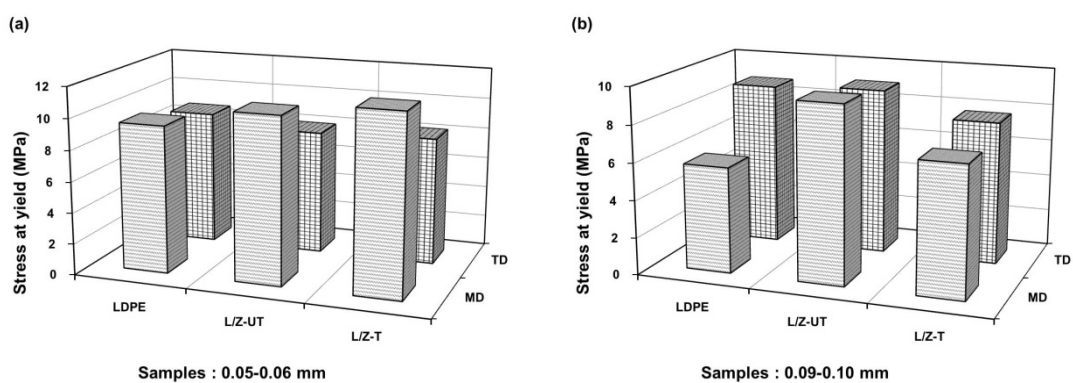
รูปที่ 4.9 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่า E ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร จากรูปที่ 4.10 (a) ฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm แสดงค่า E อยู่ในช่วง 200-400 MPa และรูปที่ 4.10 (b) ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงค่า E อยู่ในช่วง 300-400 MPa พบว่าฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าสูงกว่าฟิล์ม LDPE สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ทั้งในการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักร

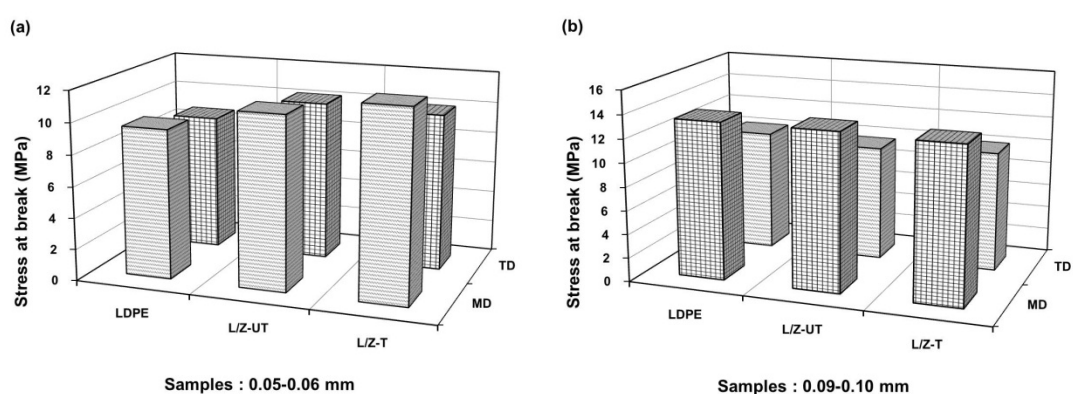


รูปที่ 4.10 มอดุลัสของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm

ค่า σ_y ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มส่วนใหญ่แสดงค่าโดยรวมสูงกว่าการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่า σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร ตามลำดับ ค่า σ_b พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มส่วนใหญ่แสดงค่ามากกว่าการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

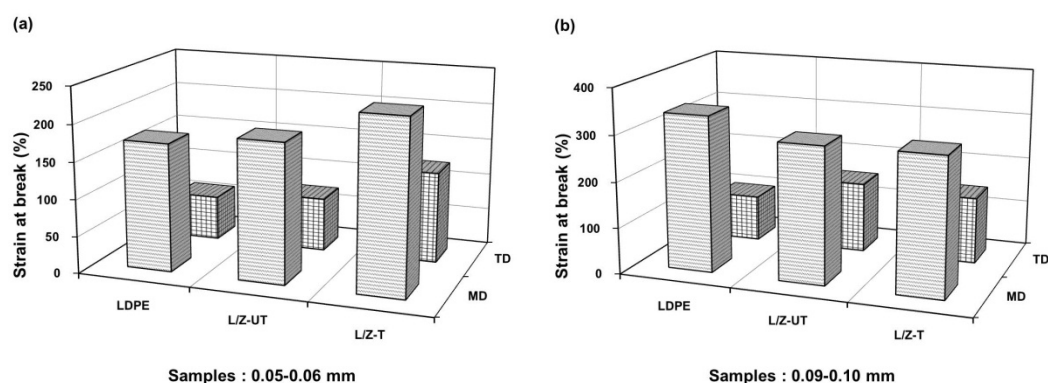


รูปที่ 4.11 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm



รูปที่ 4.12 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm

เมื่อพิจารณาค่า ϵ_b ของฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า ϵ_b ตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร อยู่ในช่วง 150-200% และ 50-100% ตามลำดับ สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าเท่ากับ 250-350% และ 100-150% ตามลำดับ สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรมีค่าสูงกว่าแนวขวางเครื่องจักร



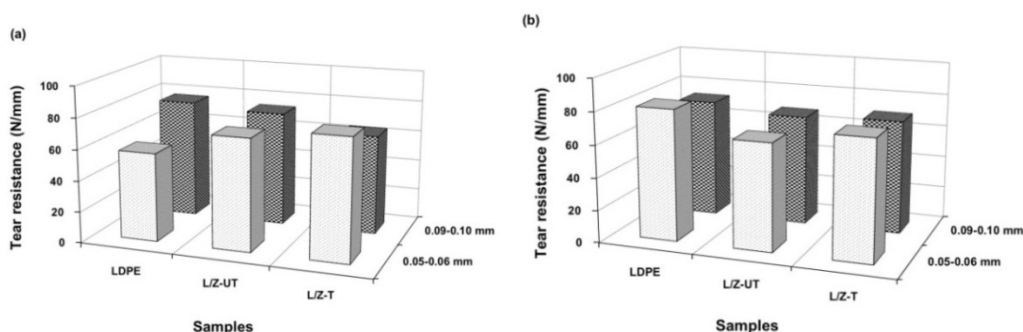
รูปที่ 4.13 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm

4.2.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงรูปที่ 4.14a สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าฟิล์มมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอและฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอแสดงแนวโน้มลดลงต่ำกว่าฟิล์ม LDPE สำหรับผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงรูปที่ 4.14b พบว่าฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm มีค่าลดลงเล็กน้อยสำหรับฟิล์มที่เติมซีโอไลต์เอ ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 70-75 N/mm ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องจากขนาดของลูกโป่งในการเป่าฟิล์มที่ต่างกัน ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของผลึกสำหรับฟิล์มตามแนวขวางของเครื่องจักรต่างกันด้วย

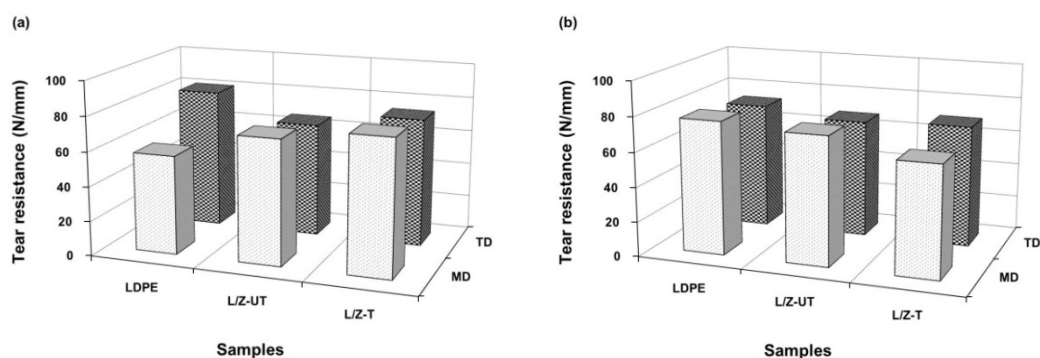
จากรูปที่ 4.15a แสดงการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ตามแนวเครื่องจักร ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม L/Z-UT และ

ฟิล์ม L/Z-T แสดงแนวโน้มในทางเดียวกัน คือมีค่าเท่ากับ 72 N/mm และ 78 N/mm ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าฟิล์ม LDPE ที่มีค่าเท่ากับ 57 N/mm เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นผลึกที่มีความแข็งแรง จึงทำให้ฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าฟิล์ม LDPE



รูปที่ 4.14 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาต่างกัน : (a) ทดสอบตามแนวเครื่องจักร และ (b) ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสำหรับการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีค่าเท่ากับ 75 N/mm และ 66 N/mm ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม LDPE ที่มีค่าเท่ากับ 74 N/mm ส่วนผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 4.15b พบว่ามีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเท่ากับ 77, 74 และ 64 N/mm ตามลำดับ สำหรับการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร มีค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดเท่ากับ 73, 66 และ 70 N/mm ตามลำดับ ฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม LDPE ที่มีค่าเท่ากับ 73 N/mm ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของผลึกตามแนวขวางเครื่องจักรเช่นเดียวกับผลของฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ตารางที่ 4.8 และ 4.9 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ตามแนวเครื่องจักรและตามขวางเครื่องจักร ที่ความหนาต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
LDPE	57 ± 3	75 ± 5
L/Z-UT	72 ± 3	66 ± 2
L/Z-T	78 ± 3	74 ± 2

ตารางที่ 4.9 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm

Samples	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
LDPE	77 ± 4	73 ± 0
L/Z-UT	74 ± 5	66 ± 1
L/Z-T	64 ± 3	70 ± 1

4.2.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

โดยทั่วไปก๊าซที่พบในสิ่งขั้บถ่าย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของก๊าซเหล่านี้มีขนาดที่แตกต่างกัน คือ CO_2 (0.33 nm) < O_2 (0.346 nm) < N_2 (0.364 nm) < CH_4 (0.38 nm) ตามลำดับ (Yampolskii *et al.*, 2006; Yoshiok *et al.*, 2013)

จากตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบโดยการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ เท่ากับ 1 cc ที่ความดันของก๊าซระดับต่างๆ พบว่าก๊าซ CO_2 และ CH_4 ไม่สามารถซึมผ่านฟิล์มตัวอย่างทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอได้ แม้ทำการทดสอบที่ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด 10 min เนื่องจากก๊าซ CH_4 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ จึงไม่สามารถซึมผ่านฟิล์ม LDPE ได้ ส่วนก๊าซ CO_2 มีขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด แต่ไม่สามารถซึมผ่านฟิล์ม LDPE ได้เนื่องจากก๊าซ CO_2 มีความชอบพอลิเมอร์ที่มีขั้ว (Sadeghi *et al.*, 2009) ในขณะที่ LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว จึงไม่เกิดการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 สำหรับฟิล์ม LDPE ชนิดที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ

พิจารณาการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และ N_2 ในฟิล์ม LDPE ชนิดที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ พบว่าก๊าซ O_2 มีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้น เมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลขนาดเล็กจึงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และมีค่าการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ N_2 เมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซ N_2 จัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซเฉื่อย จึงไม่ไวต่อความดัน ค่าการซึมผ่านจึงมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ผลการทดสอบต่างจากทฤษฎีเนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซสูงสุดเพียง 10 min ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่ต่างจากทฤษฎี สำหรับฟิล์ม LDPE ชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์เอทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซใดๆ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับก๊าซของซีโอไลต์เอทำหน้าที่ดูดซับก๊าซไว้ในโครงสร้างรูพรุน และฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm หลังจากการใส่ตัวอย่างและเปิดก๊าซที่ความดันระดับต่างๆ โดยการจับเวลาในการทดสอบสูงสุดเป็น 10 min เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซเกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากฟิล์มตัวอย่างมีความหนาเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายความว่าโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มตัวอย่างเป็นไปได้ยากขึ้น

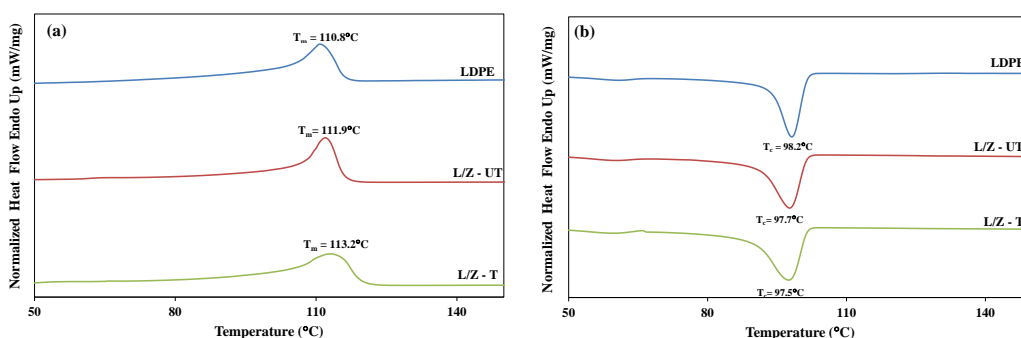
ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T
ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

Gas	Gas permeability (cc·mm/m ² ·10 min·atm)											
	LDPE				L/Z-UT				L/Z-T			
	1	3	5	8	1	3	5	8	1	3	5	8
CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂	0.000922	0.001040	0.001730	0.001660	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂	0.000679	0.000586	0.000767	0.000896	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(ทดสอบที่ความดัน 1 - 8 bar, - หมายถึง ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซ)

4.2.4 สมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC ซึ่งเป็นเทคนิคที่วัดพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปหรือปล่อยออกมากับสารตัวอย่างในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์จากการให้ความร้อนในครั้งแรก โดยไม่มีการลบประวัติทางความร้อน เป็นสภาพที่วัสดุมีสมบัติทางความร้อนในสภาวะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด หรืออยู่ในสภาวะตามการใช้งานจริง จากรูปแสดงอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm แสดงค่า T_m เท่ากับ 110.8°C, 111.9°C และ 113.2°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_m นั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนอุณหภูมิตกผลึก (crystallization temperature, T_c) เท่ากับ 98.2°C, 97.7°C และ 97.5°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_c ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 39.3, 37.0 และ 41.0% ตามลำดับ ค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึกที่ 100% crystalline ของ LDPE (enthalpy, ΔH_f) เท่ากับ 293 J/g (Cardinaud and McNally, 2013) พบว่าระดับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 39±2°C ซึ่งผลการสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าสำหรับฟิล์มพอลิพรอพิลีน (polypropylene, PP) ที่มีการเติมซีโอไลต์ (Pehlivan *et al.*, 2005) แสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์เอนไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม LDPE

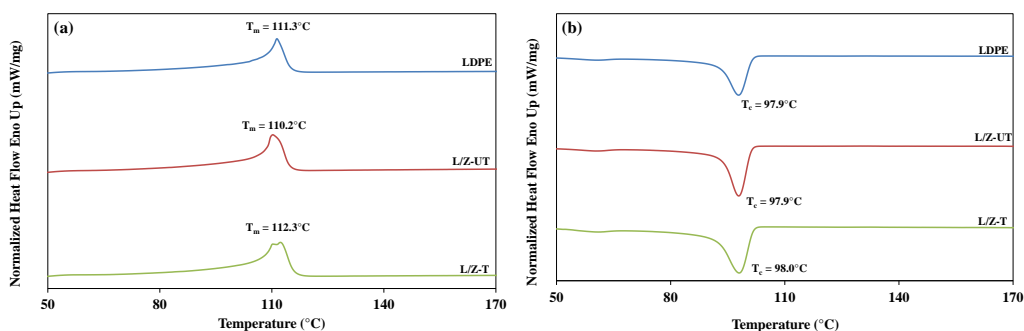


รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm : (a) heating scan (b) cooling scan

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
LDPE	110.8	98.2	115.0	39.3
L/Z-UT	111.9	97.7	108.0	37.0
L/Z-T	113.2	97.5	120.1	41.0

สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm รูปที่ 4.17(a) แสดงค่าอุณหภูมิ T_m เท่ากับ 111.3°C , 110.2°C และ 112.3°C ตามลำดับ และรูป 4.17(b) แสดงค่า T_c เท่ากับ 97.9°C , 97.9°C และ 98.0°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_m และ T_c ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าใกล้เคียงกัน และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เท่ากับ 43.5, 41.1 และ 43.3% ตามลำดับ พบว่าระดับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอยู่ในช่วง $41 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ซึ่งแสดงค่าในทิศทางเดียวกับสมบัติทางความร้อนฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm



รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

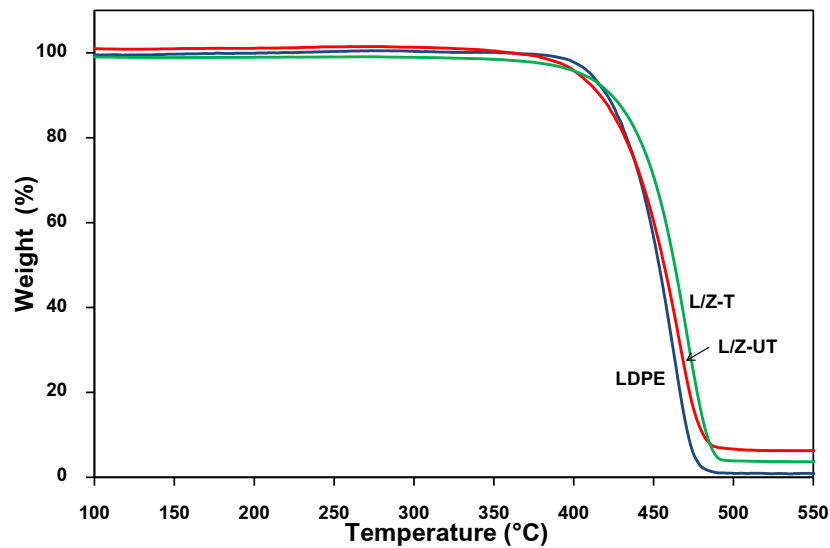
Samples	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
LDPE	111.3	97.9	127.3	43.5
L/Z-UT	110.2	97.9	120.4	41.1
L/Z-T	112.3	98.0	127.0	43.3

4.2.5 การสลายตัวทางความร้อน

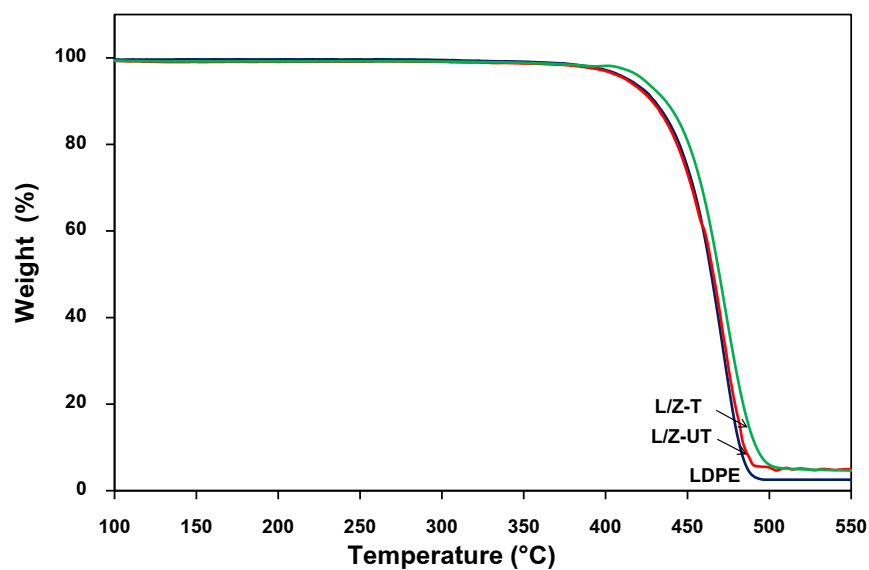
การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน คือ การวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปของวัสดุพอลิเมอร์โดยการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ซึ่งค่าที่วัดได้จะรายงานเป็นร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ จะทำให้ทราบถึงเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าฟิล์มชนิดใดมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ แสดงว่าฟิล์มชนิดนั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง

จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ตามลำดับ พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีความหนา 0.05-0.06 mm มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 464°C, 465°C และ 467°C ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าเท่ากับ 472°C , 472°C และ 472°C ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อมีการเติมซีโอไลท์เอลงในฟิล์ม LDPE เพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นสามารถดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนกลับของน้ำหนักที่สูญเสียไปที่อุณหภูมิต่างๆ (Derivative weight loss/ $\% \text{min}^{-1}$) ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

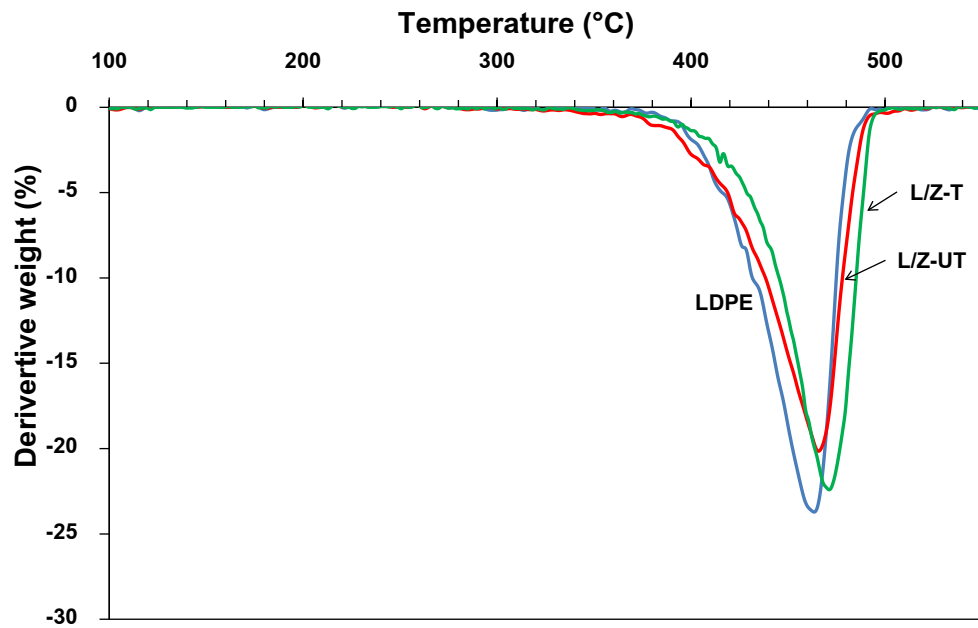


รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

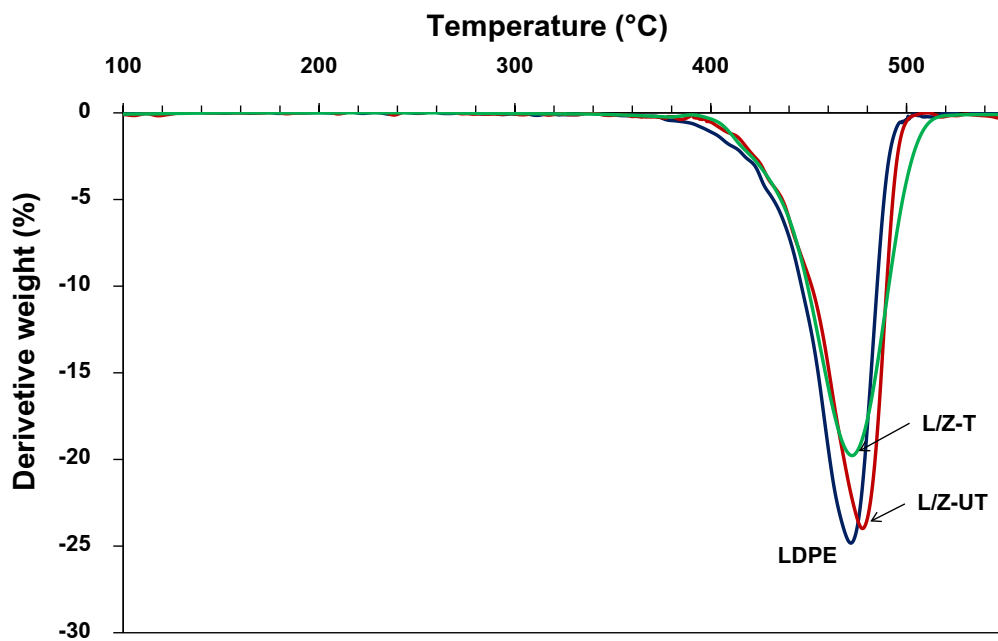
เมื่อเปรียบเทียบความหนาของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ระหว่าง 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ต่ออุณหภูมิที่มีการสูญเสียไปของน้ำหนักปริมาณ 5%, 10% และ 50% หรือ T_5 , T_{10} และ T_{50} ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm ที่อุณหภูมิ T_5 อยู่ในช่วง 399°C ถึง 408°C อุณหภูมิ T_{10} อยู่ในช่วง 414°C ถึง 421°C และอุณหภูมิ T_{50} อยู่ในช่วง 453°C ถึง 463°C แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และ ฟิล์ม L/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงค่า T_5 อยู่ในช่วง 409°C ถึง 420°C อุณหภูมิ T_{10} อยู่ในช่วง 426°C ถึง 435°C และอุณหภูมิ T_{50} อยู่ในช่วง 464°C ถึง 469°C ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ใกล้เคียงกันเช่นกันและพบว่าค่าอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนาระหว่าง 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm

Samples	0.05-0.06 mm			0.09-0.10 mm		
	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
LDPE	408	420	453	409	427	464
L/Z-UT	400	414	456	407	426	466
L/Z-T	399	421	463	420	435	469



รูปที่ 4.20 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06mm



รูปที่ 4.21 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

4.3 फिल्म PBATและฟิล์ม PBAT ผสมซีโอโลดเ

4.3.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T จากการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงผลในตารางที่ 4.14 ค่า E , σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมซีโอโลดเ ส่วนค่า σ_y และ ϵ_y ของฟิล์ม PBAT และฟิล์มที่มีการเติมซีโอโลดเ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความแข็งแรงขณะหลอมเหลวของฟิล์มทั้งสามชนิดต่ำ และข้อจำกัดของเครื่องมือในด้านความเสถียรของระบบไฟฟ้าในการม้วนเก็บฟิล์มและระบบการหล่อเย็นด้วยลมที่ควบคุมได้ยาก จึงทำให้กระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มทำได้ยากกว่าฟิล์ม LDPE หรือแม้แต่ในฟิล์ม PBAT ที่ไม่มีการเติมซีโอโลดเก็ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ยากเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม LDPE คือ ขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านหัวดายน์รูปวงแหวนฟิล์ม LDPE จะตั้งเป็นท่อทรงกระบอกตามแนวเครื่องจักร ในขณะที่ฟิล์ม PBAT จะต้องใช้อุปกรณ์ในการหนีบจับเพื่อยึดให้ตั้งเป็นท่อทรงกระบอกก่อนการเป่าลมเพื่อให้ขยายตัวตามแนวขวางเครื่องจักรเนื่องจากอัตราการไหลของเม็ด PBAT มีค่าเท่ากับ 246 g/10 min ในขณะที่อัตราการไหลของเม็ด LDPE มีค่าเท่ากับ 4 g/10 min มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ (นุตา, 2554) ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 0.05 mm แสดงค่า σ_b และ ϵ_b ตามแนวเครื่องจักรเท่ากับ 22 MPa และ 693% ตามลำดับ พบว่าผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้ามีค่ามากกว่างานวิจัยนี้สาเหตุที่ผลการทดลองต่างกัน อาจเนื่องมาจากสภาวะการขึ้นรูปฟิล์มที่ต่างกัน คือ งานวิจัยก่อนหน้าขึ้นรูปฟิล์มที่อุณหภูมิระหว่าง 120°C ถึง 145 °C กล่าวคือ สภาวะการขึ้นรูปที่ต่างกันประมาณ 20°C จึงอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.14 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
PBAT	0.054±0.005	102±8	20.0±2.2	7±1	16.4±0.8	502±2
P/Z-UT	0.059±0.003	98±4	17.1±0.6	7±0	11.7±0.1	398±6
P/Z-T	0.048±0.006	62±6	17.0±1.5	5±0	7.4±0.5	333±13

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มี ความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.15 พบว่า E , σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีค่าน้อยกว่าฟิล์ม PBAT ผลจากการ เต็มซีโอไลต์เอในฟิล์ม PBAT ส่งผลให้ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีความต้านทานต่อแรงดึง ลดลง เช่นเดียวกับผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักร

ตารางที่ 4.15 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบ ตามแนวขวางเครื่องจักร ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
PBAT	0.055±0.002	96±3	12.2±0.9	7±1	15.1±0.7	441±27
P/Z-UT	0.046±0.004	72±6	15.9±1	5±1	8.1±0.6	345±21
P/Z-T	0.047±0.002	87±5	13.5±1.5	7±0	9.9±0.5	323±17

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา ระหว่าง 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ตารางที่ 4.16 พบว่าค่า E , σ_y , ϵ_y , σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณา ผลจากการดัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์เอ พบว่าฟิล์ม P/Z-T มีค่า σ_b มากกว่าฟิล์ม P/Z-UT ซึ่งคาดว่า น่าจะเกิดจากการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของซีโอไลต์เอกับเมทริกซ์ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.16 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบ ตามแนวเครื่องจักร ความหนา 0.09-0.10 mm

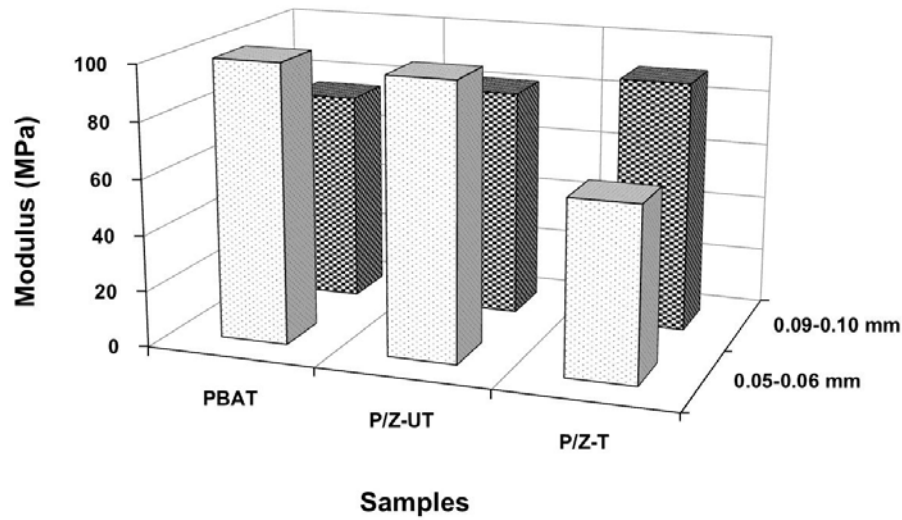
Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
PBAT	0.087±0.010	76±6	21.0±2.3	7±1	11.1±1.1	394±26
P/Z-UT	0.096±0.006	82±10	20.0±2.1	6±1	9.5±1.4	391±6
P/Z-T	0.091±0.006	90±13	21.1±1.3	7±1	10.2±0.9	343±32

ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา ระหว่าง 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.17 พบว่าค่า E , σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม P/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ฟิล์ม P/Z-UT มีค่าสูงที่สุดคือ 110 MPa, 12 MPa และ 334% ตามลำดับ บ่งบอกถึงความแข็งแรงของอนุภาคซีโอล์ดเอที่เติมลงไป ใน PBAT เมตริกซ์ เมื่อพิจารณาผลของการตัดแปรพื้นผิว พบว่าฟิล์ม P/Z-T มีค่าความเค้นสูงกว่าฟิล์ม PBAT และฟิล์ม P/Z-UT

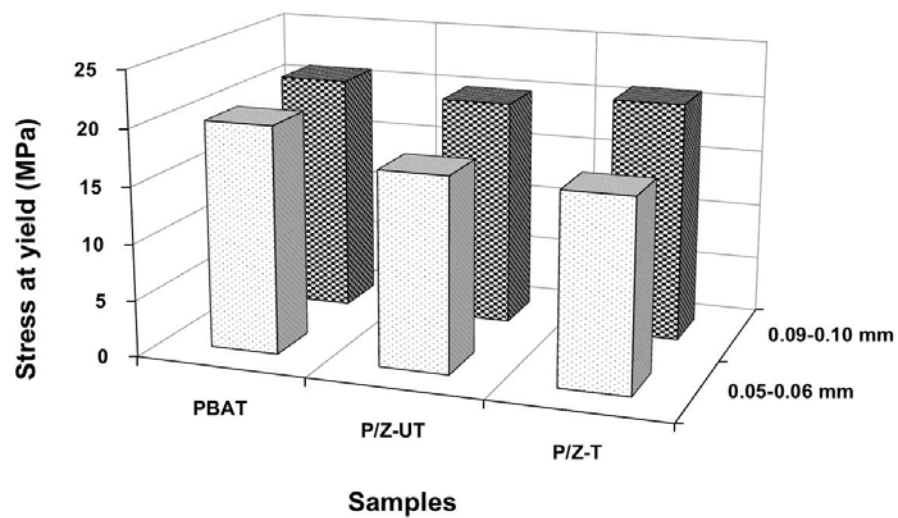
ตารางที่ 4.17 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ความหนา 0.09-0.10 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
PBAT	0.074±0.003	87±6	8.24±1.0	4.83±0.3	9.06±0.2	285.5±11.4
P/Z-UT	0.104±0.004	110±7	13.10±1.1	8.55±0.2	12.57±0.3	334.3±22.4
P/Z-T	0.084±0.003	82±6	16.08±1.0	6.07±0.3	8.45±0.5	276.8±14.2

พิจารณาค่า E ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 4.22 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า E สำหรับฟิล์ม PBAT และฟิล์ม P/Z-UT มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm พบว่าค่า E มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอล์ดเอ ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องมาจากอนุภาคซีโอล์ดเอมีความแข็งแรงและสามารถกระจายตัวได้ดีใน PBAT ทำให้ฟิล์มสามารถต้านทานต่อแรงดึงได้มากขึ้นเช่นเดียวกับ E ของฟิล์ม LDPE เพียงแต่ค่า E ฟิล์ม LDPE มีค่าสูงกว่าฟิล์ม PBAT ค่า σ_y ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 4.23 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า σ_y ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติมซีโอล์ดเอ ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่า σ_y มีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อเปรียบเทียบค่า σ_y ของระหว่างความหนาทั้งสองช่วง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 15-20 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า σ_y ของฟิล์ม LDPE ตามแนวเครื่องจักร พบว่าฟิล์ม PBAT มีค่าสูงกว่า LDPE



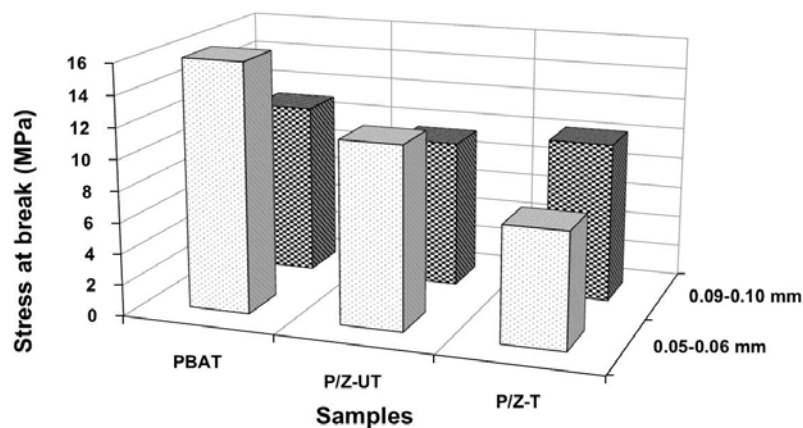
รูปที่ 4.22 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆทดสอบตามแนวเครื่องจักร



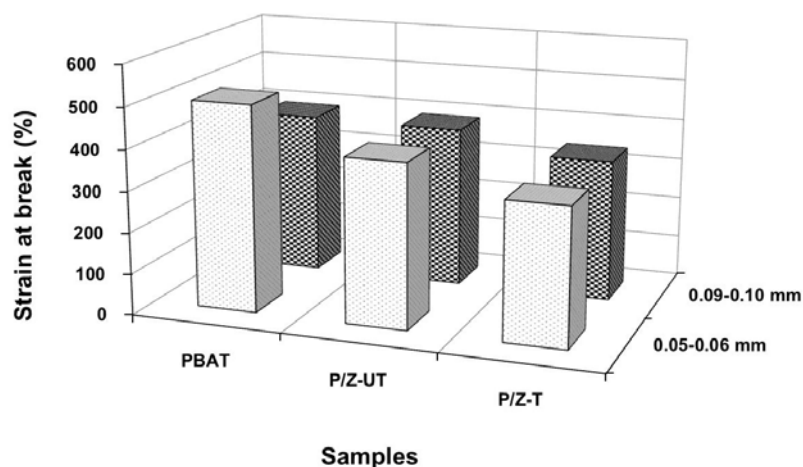
รูปที่ 4.23 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆทดสอบตามแนวเครื่องจักร

พิจารณาค่า σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ และทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 ตามลำดับ สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่ามีค่า σ_b และ ϵ_b มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมซีโอโลดเอน ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติมซีโอโลดเอน จากการเปรียบเทียบค่า σ_b ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ 15-20 MPa

และเมื่อเปรียบเทียบค่า ϵ_b ของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เฮอร์ระหว่างความหนาทั้งสองช่วง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 320 – 390% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม LDPE ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm



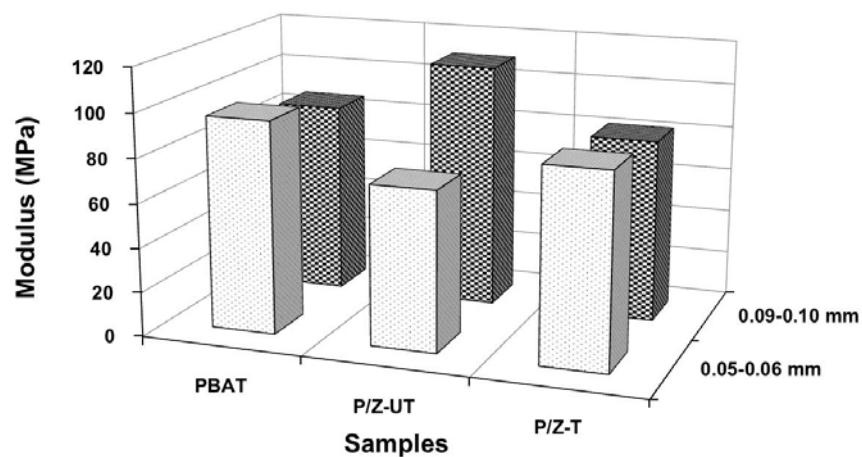
รูปที่ 4.24 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่าง ๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร



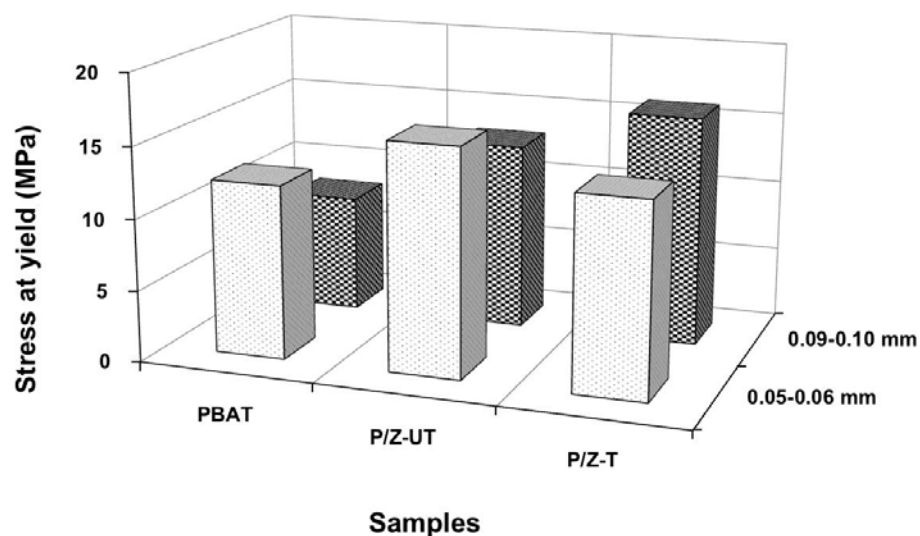
รูปที่ 4.25 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่าง ๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร

ค่า E ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่าง ๆ และทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 4.26 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm พบว่าค่า E ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม P/ZT มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบค่า E ของฟิล์มทั้งระหว่างความหนาทั้งสองช่วงพบว่าฟิล์มส่วนใหญ่แสดงค่าใกล้เคียงกัน คือ มี

ค่าประมาณ 100 MPa ในขณะที่ค่า E ของฟิล์ม LDPE มีค่าประมาณ 400 MPa ค่า σ_y ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าค่า σ_y ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอทั้งชนิดไม่ดัดแปรพื้นผิวและชนิดดัดแปรพื้นผิว จากการเปรียบเทียบค่า σ_y ระหว่างความหนาทั้งสองช่วงพบว่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันนอกจากนี้ค่า σ_y ของฟิล์ม PBAT ยังแสดงค่าที่เป็นไปในทิศทางเดียวกับฟิล์ม LDPE ด้วย

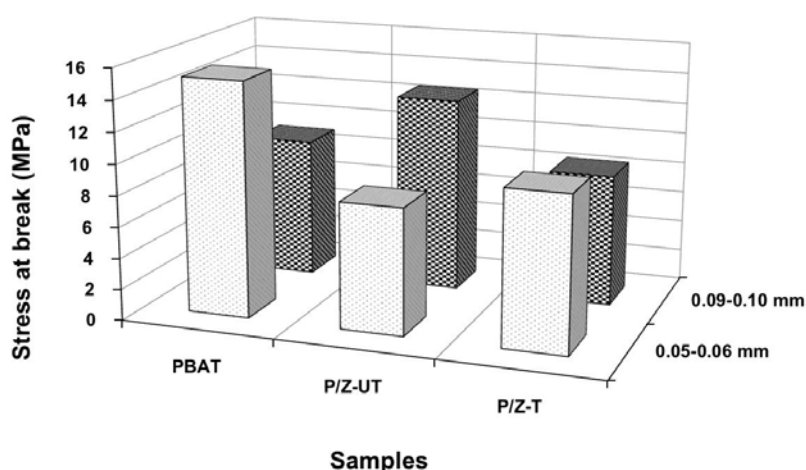


รูปที่ 4.26 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

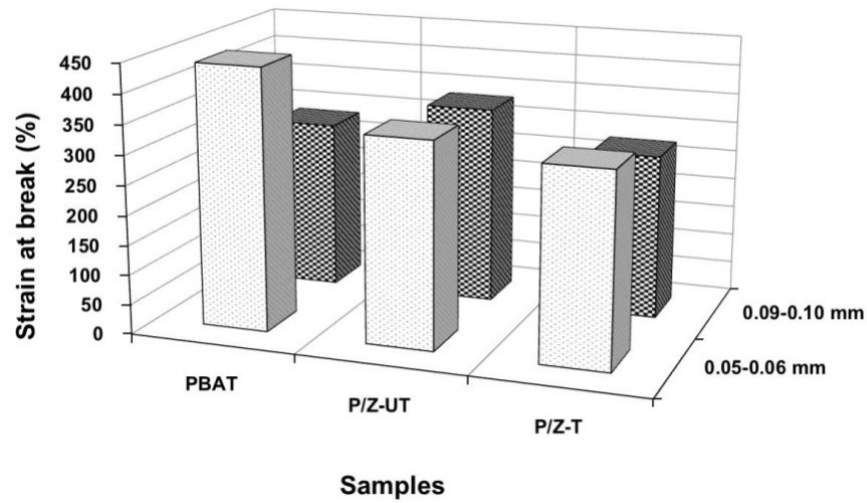


รูปที่ 4.27 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

พิจารณาค่า σ_b ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 4.28 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า σ_b ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอและฟิล์ม P/Z-T มีค่าสูงกว่าฟิล์ม P/Z-UT ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ฟิล์ม PBAT และ P/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 8-9 MPa เมื่อเปรียบเทียบค่า σ_b ระหว่างความหนาทั้งสองช่วงพบว่าแสดงแนวโน้มที่ต่างกัน แต่ฟิล์ม P/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 8 MPa และสอดคล้องกับค่า σ_b ของฟิล์ม LDPE เช่นกัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้คาดว่าอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ค่า ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรแสดงในรูปที่ 4.29 สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าค่า ϵ_b ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอโดยแสดงค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักรแต่ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า ϵ_b ของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอระหว่างความหนาทั้งสองช่วง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 300-330%

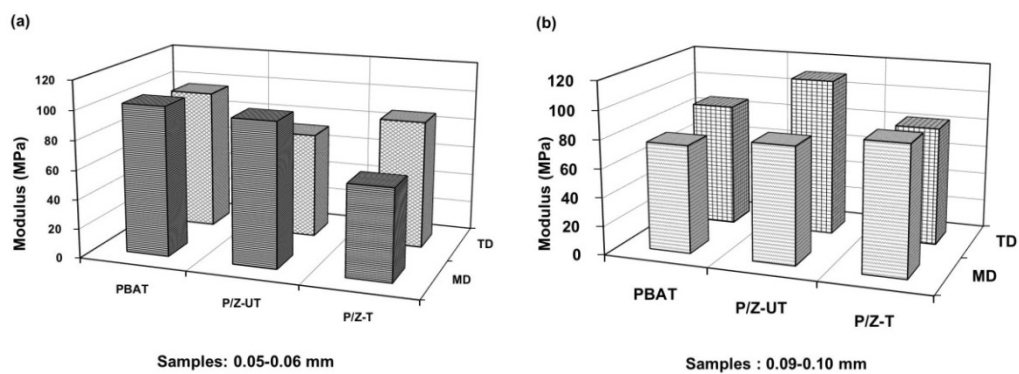


รูปที่ 4.28 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

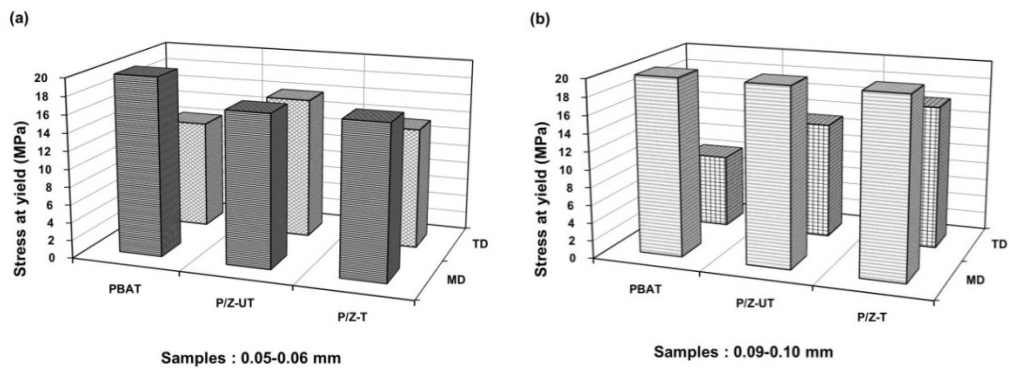


รูปที่ 4.29 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

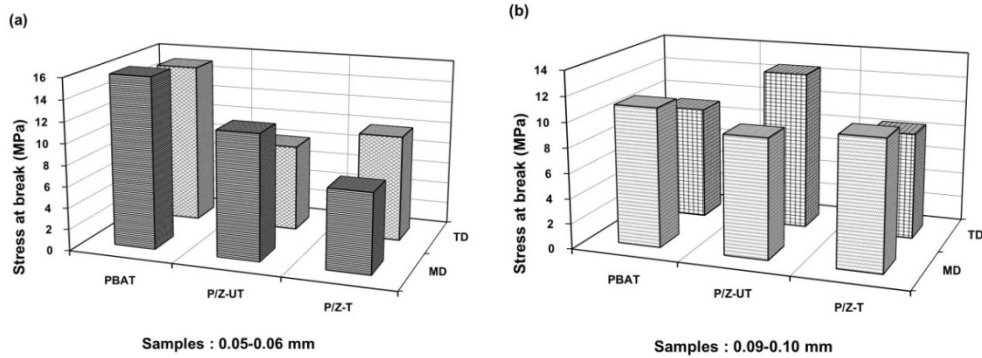
ค่า E , σ_y , σ_b และ ϵ_b ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.33 พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มส่วนใหญ่แสดงค่ามากกว่าการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร เนื่องจากกระบวนการเป่าฟิล์มมีการให้แรงทั้งสองทิศทาง คือ การเป่าขึ้นรูปฟิล์มและม้วนเก็บฟิล์มในแนวตามเครื่องจักรและการเป่าลมเพื่อขยายขนาดของฟิล์มในแนวตามขวางเครื่องจักร โดยแรงที่ให้ในแนวตามเครื่องจักรอาจมากกว่าแนวขวางเครื่องจักร จึงทำให้โมเลกุลส่วนใหญ่มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรและส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงโดยรวมของแนวตามเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่องจักร



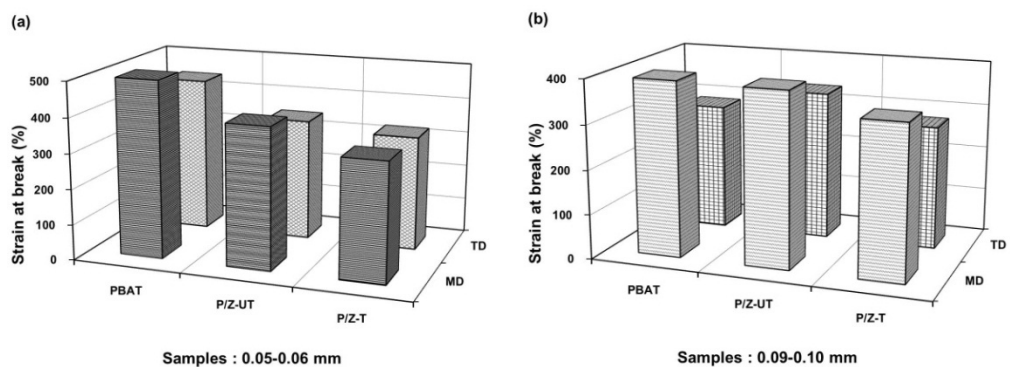
รูปที่ 4.30 มอดุลัสของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร



รูปที่ 4.31 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร



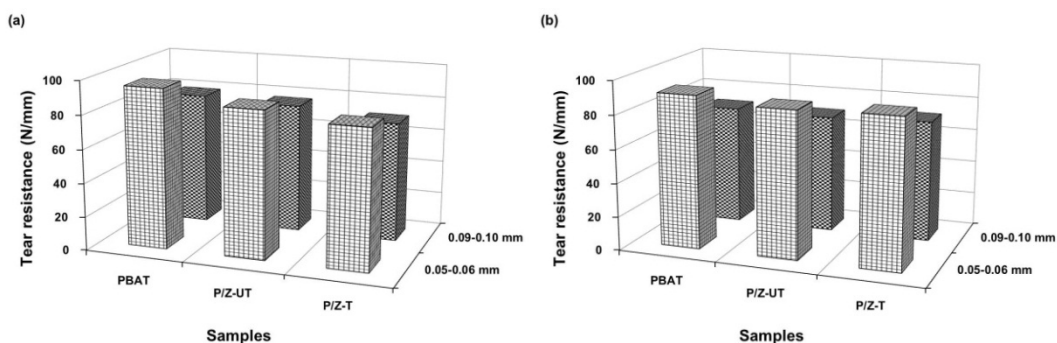
รูปที่ 4.32 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร



รูปที่ 4.33 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร

4.3.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

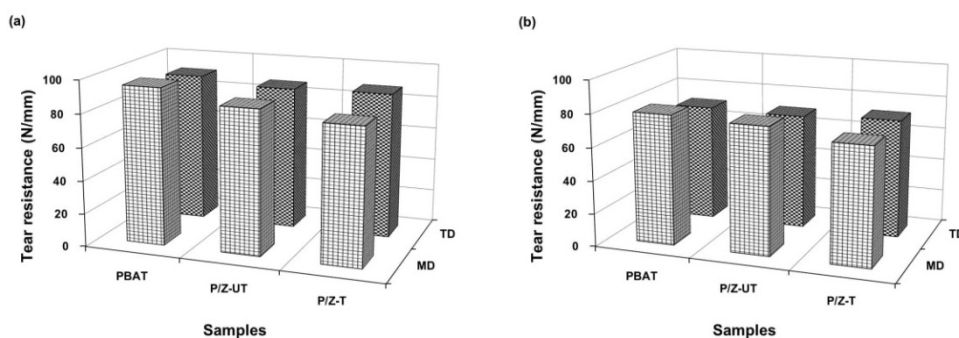
ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักร สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm แสดงรูปที่ 4.34 พบว่าฟิล์มมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมซีโอโลดเอ อาจมีความเป็นไปได้จากการตัดชั้นตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแบบเว้าเมื่อเติมซีโอโลดเอที่เป็นอนุภาคแข็งลงไป อาจจะทำให้เกิดความเค้นสะสมตรงบริเวณส่วนเว้าของชิ้นงานและเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณนี้ได้ง่ายขึ้น (วรารภรณ์, 2549) โดยภาพรวมยังคงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน ระหว่าง 80-90 N/mm และผลการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงรูปที่ 4.43 พบว่าฟิล์ม PBAT และฟิล์มที่มีการเติมซีโอโลดเอมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน โดยฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าประมาณ 90 N/mm และฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าประมาณ 70 N/mm เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มที่มีความหนาทั้งสองช่วง พบว่าฟิล์มส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่าง 60-80 N/mm



รูปที่ 4.34 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนาต่างกัน : (a) ทดสอบตามแนวเครื่องจักร และ (b) ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T แสดงตารางที่ 4.18 และ ตารางที่ 4.19 การพิจารณาค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักร แสดงค่าของฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าเท่ากับ 87 N/mm และ 82 N/mm ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าฟิล์ม PBAT ที่มีค่าเท่ากับ 95 N/mm และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

สำหรับการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีค่าเท่ากับ 87 N/mm และ 88 N/mm ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม PBAT ที่มีค่าเท่ากับ 91 N/mm พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.35 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร : (a) ฟิล์มหนา 0.05-0.06 mm (b) ฟิล์มหนา 0.09-0.10 mm

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรพบว่ามีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเท่ากับ 79, 77 และ 71 N/mm ตามลำดับ สำหรับการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสอดคล้องกับการทดสอบตามแนวเครื่องจักร คือมีค่าเท่ากับ 71, 70 และ 72 N/mm ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม ซีไอไลต์เอมค่าใกล้เคียงกันและความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มตามแนวการทดสอบ พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรมีค่ามากกว่าการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องจากฟิล์มมีการเป่าขึ้นรูปและมีการม้วนเก็บในแนวตามเครื่องจักร จึงทำให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์และมีความแข็งแรงมากกว่าแนวขวางเครื่องจักรเช่นเดียวกับผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T
ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
PBAT	95±9	91±4
P/Z-UT	87±13	87±4
P/Z-T	82±12	88±4

ตารางที่ 4.19 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T
ความหนา 0.09-0.10 mm

Samples	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
PBAT	79±6	71±4
P/Z-UT	77±9	70±4
P/Z-T	71±2	72±1

4.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

จากตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าก๊าซ N_2 และ CH_4 ไม่สามารถซึมผ่านฟิล์มตัวอย่างทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์เอได้ ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซ CH_4 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่จึงไม่สามารถซึมผ่านฟิล์ม PBAT ได้ ส่วนก๊าซ N_2 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่รองลงมาจากก๊าซ CH_4 และจัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซเฉื่อย แม้ความดันจะเพิ่มขึ้นเป็น 8 bar ในขณะที่ก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 สามารถซึมผ่านฟิล์ม PBAT ได้ เนื่องจากก๊าซ CO_2 มีความชอบพอลิเมอร์ที่มีขั้ว (Sadeghi *et al.*, 2009) ในขณะที่ PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว จึงเกิดการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 ได้ และเมื่อพิจารณาการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 และ O_2 ในฟิล์ม PBAT ชนิดที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ พบว่ามีค่าการซึมผ่านก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้นในขณะที่ฟิล์ม PBAT ชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์เอทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปร พื้นผิวพบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซใดๆ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับก๊าซของซีโอไลต์เอทำหน้าที่ดูดซับก๊าซไว้ในโครงสร้างรูพรุนเช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE ความหนา 0.05-0.06 mm

ที่มีการเติมซีโอโลต์เอทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิวพิจารณาการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซเกิดขึ้นแม้ทำการทดสอบที่ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด 10 min ทั้งนี้อาจเนื่องจากฟิล์มตัวอย่างมีความหนาเพิ่มมากขึ้น นั้นหมายความว่าโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มตัวอย่างเป็นไปได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลต์เอ

ตารางที่ 4.20 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม PBATฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์มP/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm

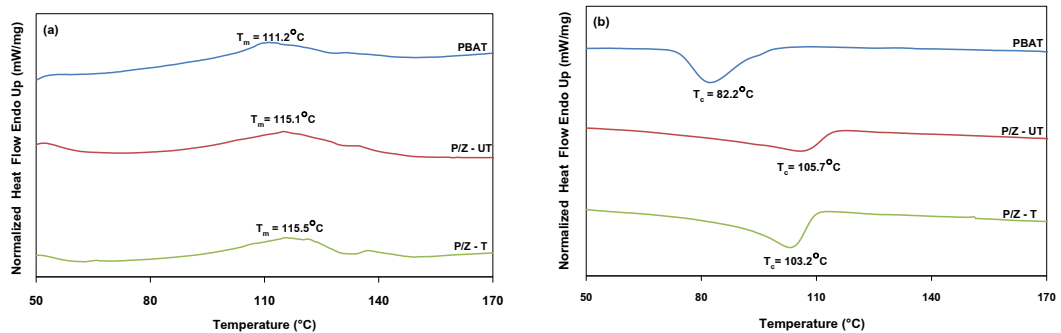
Gas	Gas permeability (cc·mm/m ² ·10 min·atm)											
	PBAT				P/Z-UT				P/Z-T			
	1	3	5	8	1	3	5	8	1	3	5	8
CO ₂	-	-	0.000107	0.000149	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂	-	0.000470	0.000658	0.000749	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(ทดสอบที่ความดัน 1 - 8 bar, - หมายถึง ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซ)

4.3.4 สมบัติทางความร้อน

จากรูปที่ 4.36 และตารางที่ 4.21 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm แสดงค่า T_m เท่ากับ 111.2°C, 115.1°C และ 115.5°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_m นั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติมซีโอโลต์เอ ส่วนค่า T_c เท่ากับ 82.2°C, 105.7°C และ 103.2°C ตามลำดับ ค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึก (enthalpy, ΔH_f) ที่ 100% crystalline ของ PBAT เท่ากับ 114 J/g (Mohanty *et al.*, 2010) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม มีค่าใกล้เคียงกันคือ 14.7, 13.3และ 15.0% ตามลำดับ พบว่าระดับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอยู่ในช่วง $13 \pm 2^\circ\text{C}$ สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงในตารางที่ 4.22 และจากรูปที่ 4.37 (a) แสดง T_m ของฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงค่าอุณหภูมิ T_m เท่ากับ 115.2°C, 120.7°C และ 111.6°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_m มีค่าใกล้เคียงกัน และรูปที่

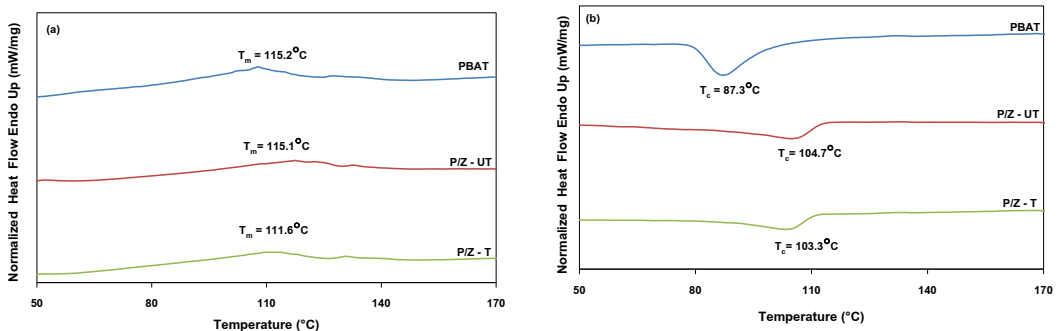
4.45 (b) แสดงค่า T_c เท่ากับ 87.3°C , 106.5°C และ 103.3°C ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าฟิล์ม P/Z-UT และ ฟิล์ม P/Z-T แสดงค่า T_c สูงกว่าฟิล์ม PBAT คาดว่าอาจเนื่องมาจากผลของการเติมซีโอไลต์เอทีที่มีความเป็นผลึก จึงส่งผลให้เกิดผลึกก่อนฟิล์ม PBAT และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก มีค่าเท่ากับ 20.6, 20.6 และ 19.6% ตามลำดับพบว่าผลการเติมซีโอไลต์เอไม่มียผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม PBATเช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE



รูปที่ 4.36 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	T_m ($^\circ\text{C}$)	T_c ($^\circ\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
PBAT	111.2	82.2	16.8	14.7
P/Z-UT	115.1	105.7	15.1	13.3
P/Z-T	115.5	103.2	17.1	15.0



รูปที่ 4.37 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.07-0.09 mm

Samples	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
PBAT	115.2	87.3	23.5	20.6
P/Z-UT	115.1	104.7	23.4	20.6
P/Z-T	111.6	103.3	22.3	19.6

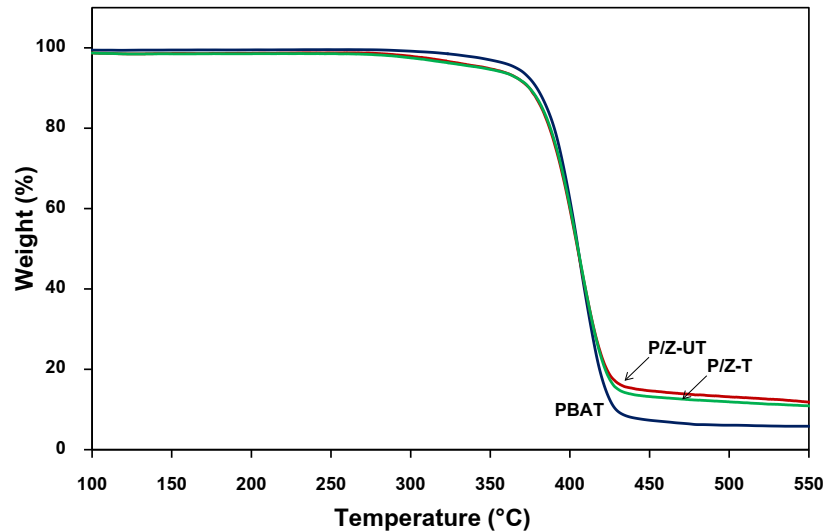
4.3.5 การสลายตัวทางความร้อน

จากรูปที่ 4.38 และ 4.39 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของ ฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ตามลำดับ พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 250 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 450 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 405 $^{\circ}\text{C}$, 405 $^{\circ}\text{C}$ และ 406 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm เท่ากับ 404 $^{\circ}\text{C}$, 405 $^{\circ}\text{C}$ และ 404 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มที่มีการเติมซีโอโลดต์เอมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม PBAT ทั้งที่ความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm

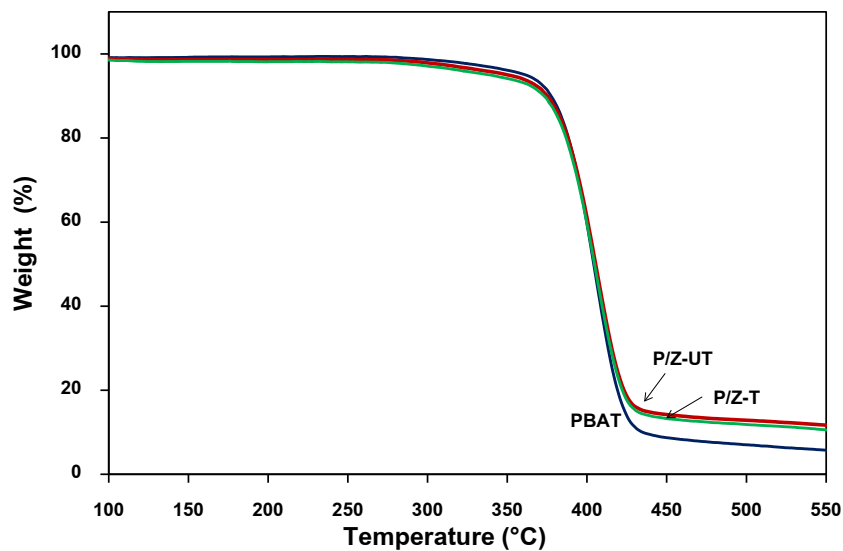
หากพิจารณาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของน้ำหนักพบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปของฟิล์ม PBAT มีค่าประมาณ 95% ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปของฟิล์มที่มีการเติมซีโอโลดต์เอ มีค่าประมาณ 90% ซึ่งอาจคาดการณ์ได้ว่าเป็นผลมาจากการเติมซีโอโลดต์เอ จึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม PBAT และเพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นสามารถดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนกลับของน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักที่สูญหายไปที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ระหว่าง 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ต่ออุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำหนักปริมาณ 5%, 10% และ 50% หรือ T_5 , T_{10} และ T_{50} ดังแสดงในตารางที่ 23 พบว่าฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm ที่อุณหภูมิ T_5 อยู่ในช่วง 360 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 405 $^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิ T_{10} อยู่ในช่วง 333 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 405 $^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิ T_{50} อยู่ในช่วง 329 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 404 $^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

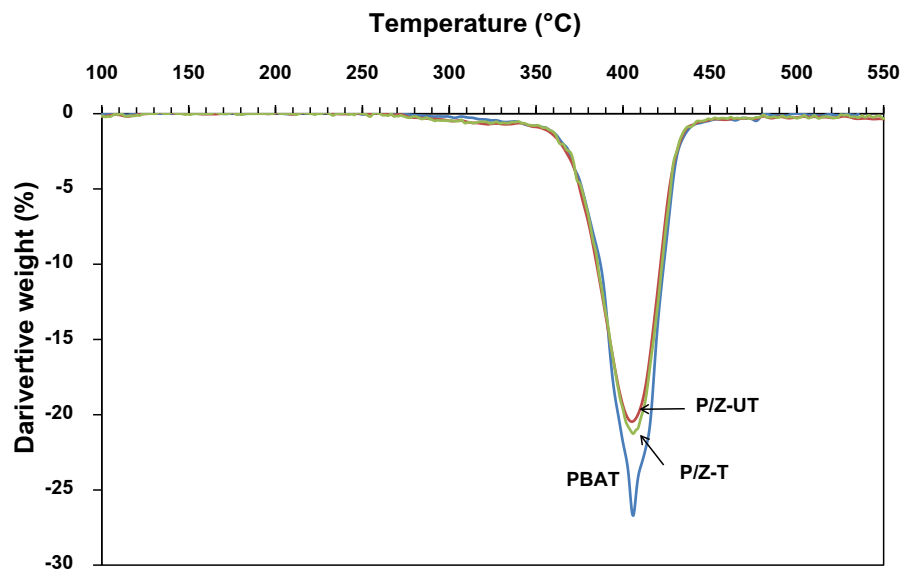
แสดงค่า T_5 อยู่ในช่วง 352°C ถึง 404°C อุณหภูมิ T_{10} อยู่ในช่วง 336°C ถึง 405°C และอุณหภูมิ T_{50} อยู่ในช่วง 322°C ถึง 404°C ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ใกล้เคียงกัน เช่นกันและพบว่าค่าอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่ความหนาทั้งสองช่วงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน



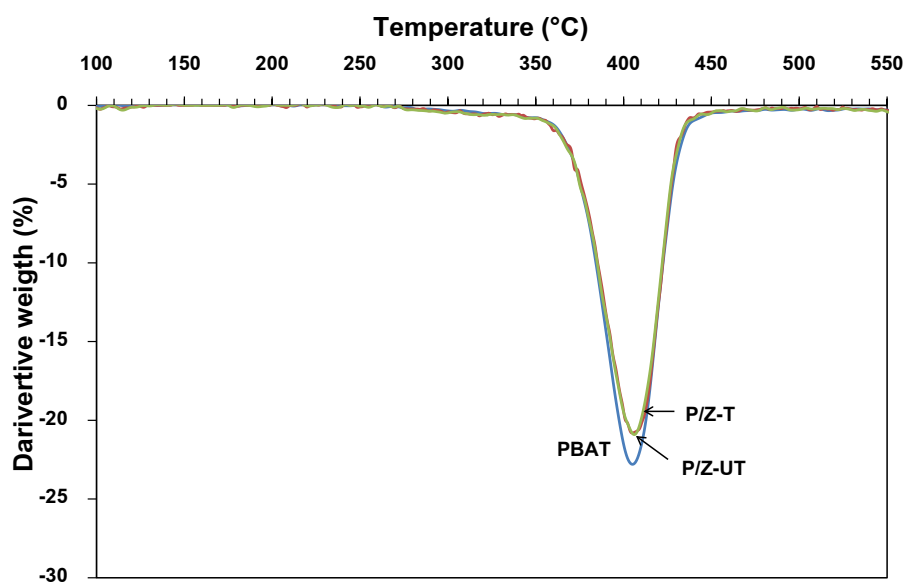
รูปที่ 4.38 กราฟ TGA ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm



รูปที่ 4.39 กราฟ TGA ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm



รูปที่ 4.40 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.05-0.06 mm



รูปที่ 4.41 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ความหนา 0.09-0.10 mm

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm

Samples	0.05-0.06 mm			0.09-0.10 mm		
	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
PBAT	360	333	329	352	336	322
P/Z-UT	378	372	372	376	373	370
P/Z-T	405	405	404	404	405	404

4.4 ถุงเย็นทางการค้า (plastic bag) กับ ฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ ความหนา 0.05-0.06 mm

4.4.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

ผลการศึกษาสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงเย็น กับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ พบว่า E σ_y ϵ_y σ_b และ ϵ_b ของถุงเย็นและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ แสดงค่าใกล้เคียงกัน ทั้งผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักร ในขณะที่สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ แสดงแนวโน้มของ E ϵ_y และ σ_b ที่ต่ำกว่าถุงเย็นและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ สำหรับการทดสอบทั้งสองทิศทาง สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อนำถุงเย็นซึ่งเป็นฟิล์มทางการค้าที่มีการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับสมบัติการทนต่อแรงดึงกับฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ สำหรับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไลท์เอ แสดงสมบัติที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทนต่อแรงดึงดังกล่าว จึงเป็นการยืนยันความสามารถการนำไปใช้งานจริงของฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.24 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ที่มี

ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
Plastic bag	0.050±0.004	256±23	9.9±0.9	10±0	13.8±1.7	188±19
LDPE	0.050±0.005	270±72	9.5±0.5	10±1	9.5±0.3	173±42
L/Z-UT	0.060±0.002	380±36	10.7±0.7	11±1	11.0±0.5	188±7
L/Z-T	0.054±0.006	395±66	11.5±1.3	12±0	13.0±1.2	233±29
PBAT	0.054±0.005	102±8	20.0±2.2	7±1	16.4±0.8	502±2
P/Z-UT	0.059±0.003	98±4	17.1±0.6	7±0	11.7±0.1	398±6
P/Z-T	0.048±0.006	62±6	17.0±1.5	5±0	7.4±0.5	333±13

ตารางที่ 4.25 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักรที่มี

ความหนา 0.05-0.06 mm

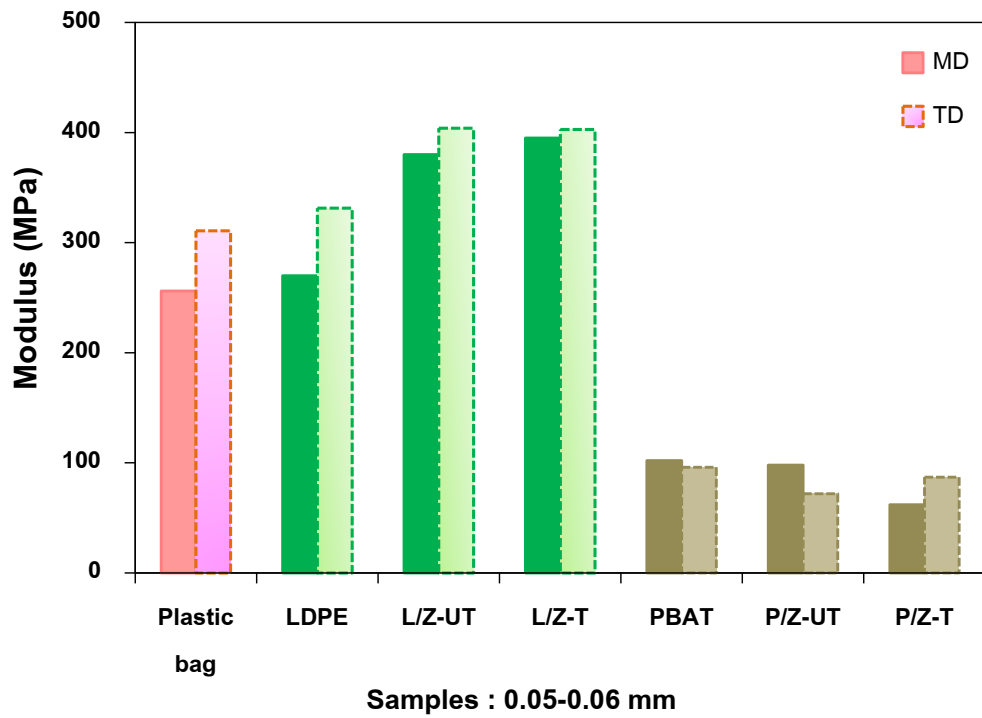
Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
Plastic bag	0.049±0.003	310±62	8.6±2.9	10±1	10.5±0.6	335±23
LDPE	0.048±0.004	332±62	8.7±2.0	9±3	8.7±2.6	61±11
L/Z-UT	0.055±0.003	404±30	8.0±1.6	11±0	10.2±0.1	73±26
L/Z-T	0.060±0.005	402±66	8.2±1.1	10±0	10.0±1.1	123±56
PBAT	0.055±0.002	96±3	12.2±0.9	7±1	15.1±0.7	441±27
P/Z-UT	0.046±0.004	72±6	15.9±1	5±1	8.1±0.6	345±21
P/Z-T	0.047±0.002	87±5	13.5±1.5	7±0	9.9±0.5	323±17

พิจารณาค่า E ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 4.42 พบว่าค่า E สำหรับถุงเย็นมีค่าอยู่ในช่วง 250-300 MPa และฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ มีค่าอยู่ในช่วง 300-400 MPa ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ มีค่าประมาณ 100 MPa พบว่าค่า E ของถุงเย็นและฟิล์ม LDPE มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์

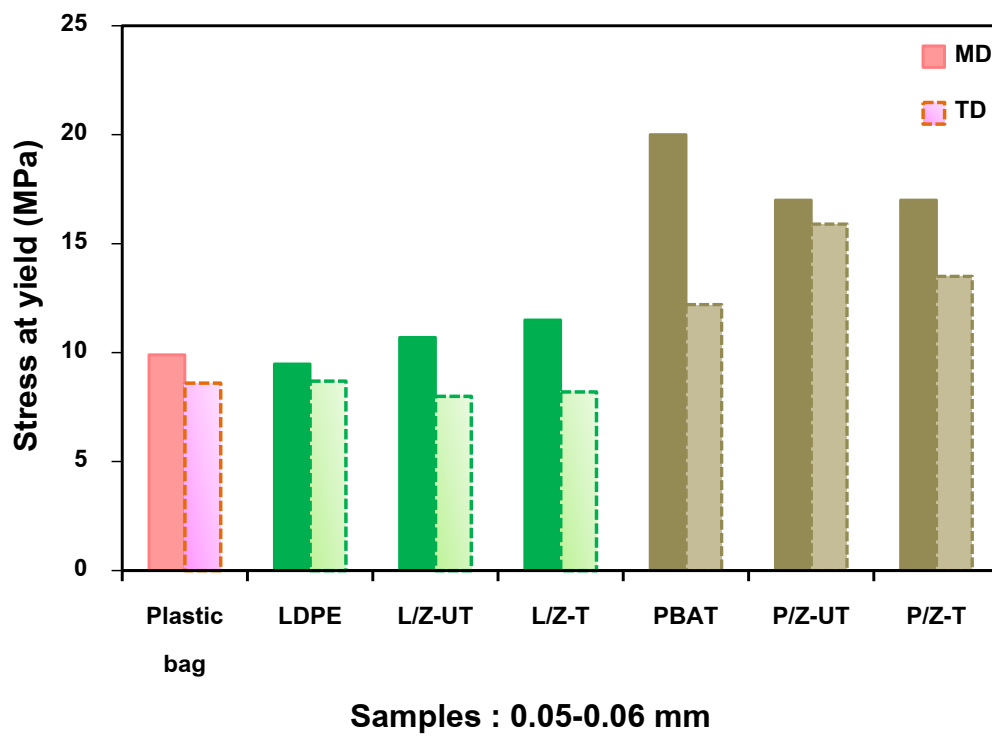
ค่า σ_y ของฟิล์มต่างๆ สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm แสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าค่า σ_y ของถุงเย็นและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 9-12 MPa ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ มีค่าประมาณ 12-18 MPa และเมื่อเปรียบเทียบค่า σ_y จากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรมีค่าสูงกว่าแนวตามขวางเครื่องจักร ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องมาจากโมเลกุลส่วนใหญ่มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรและส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงโดยรวมของแนวตามเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่องจักร

พิจารณาค่า σ_b ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงและแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.44 พบว่า σ_b ของถุงเย็น ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง คือ 9-12 MPa และเมื่อเปรียบเทียบค่า σ_b จากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าแนวตามขวางเครื่องจักร ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบ σ_y

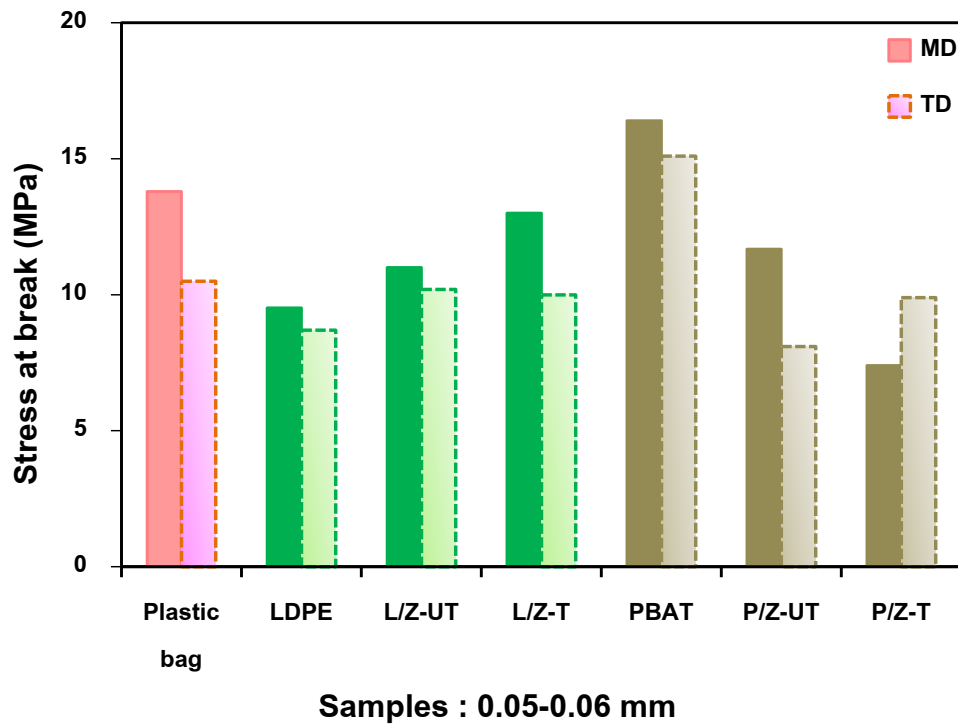
ค่า ϵ_b ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงและแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.45 พบว่า ϵ_b ตามแนวเครื่องจักรของถุงเย็น และฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 200% ส่วนฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ แสดงแนวโน้มที่มากกว่า คือ มีค่าอยู่ในช่วง 250-350% ในขณะที่ ϵ_b ตามแนวขวางเครื่องจักรแสดงค่าในทิศทางเดียวกันกับแนวตามเครื่องจักร



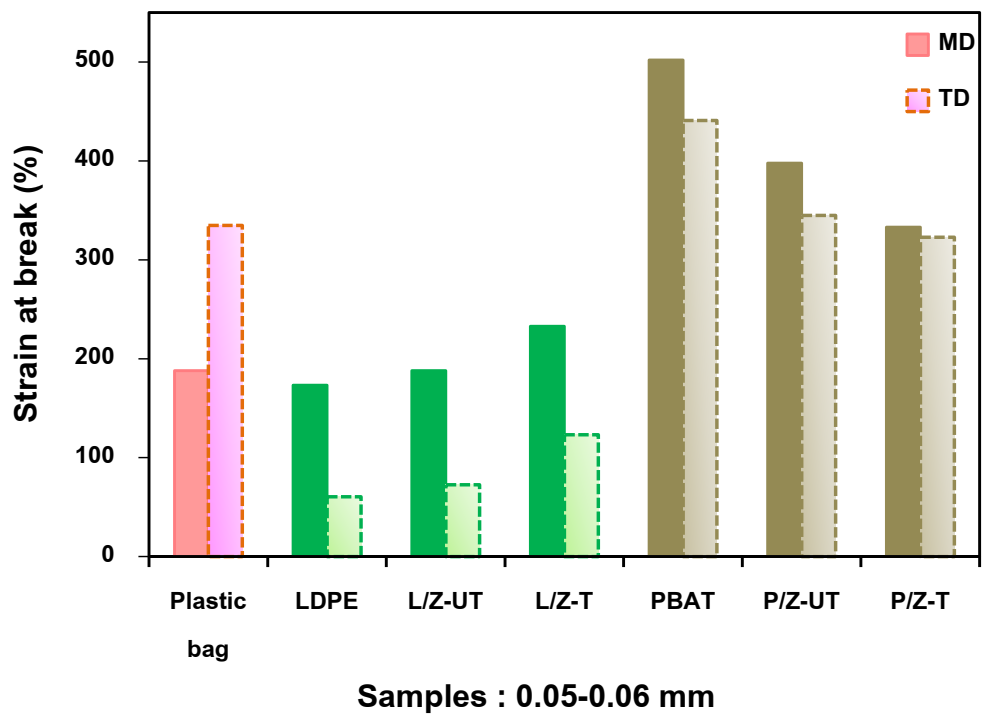
รูปที่ 4.42 มอดุลัสของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm



รูปที่ 4.43 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm



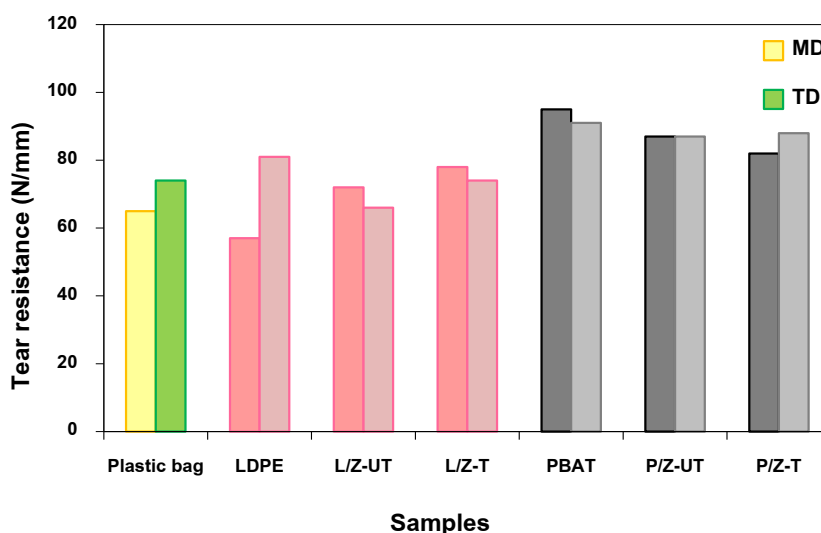
รูปที่ 4.44 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm



รูปที่ 4.45 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

4.4.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm แสดงรูปที่ 4.46 และตารางที่ 4.26 พบว่าถุงเย็นและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์และไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ จากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ระหว่าง 70 – 80 N/mm ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์และไม่มีการเติมซีโอไลต์เอ แสดงแนวโน้มมากกว่าโดยมีค่าระหว่าง 80-100 N/mm สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนได้ว่าถุงเย็นและฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร แสดงค่าในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.46 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

ตารางที่ 4.26 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ความหนา 0.05-0.06 mm

Samples	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
Plastic bag	65 ± 3	74 ± 3
LDPE	57 ± 3	75 ± 5
L/Z-UT	72 ± 3	66 ± 2
L/Z-T	78 ± 3	74 ± 2
PBAT	95 ± 9	91 ± 4
P/Z-UT	87 ± 13	87 ± 4
P/Z-T	82 ± 12	88 ± 4

4.4.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

จากตารางที่ 4.27 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ทดสอบโดยการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ เท่ากับ 1 cc ที่ความดันของก๊าซระดับต่างๆ พิจารณาความสามารถในการซึมผ่านของถุงเย็น พบว่าก๊าซ CH_4 ไม่สามารถซึมผ่านฟิล์มได้ พิจารณาการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 O_2 และ N_2 ในฟิล์ม LDPE พบว่ามีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้น เมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม LDPE พบว่าก๊าซ CO_2 และ CH_4 ไม่สามารถซึมผ่านฟิล์มได้ แม้ทำการทดสอบที่ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด 10 min พิจารณาการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และ N_2 ในฟิล์ม LDPE พบว่าก๊าซ O_2 มีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้น เมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น และมีค่าการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ N_2 เมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซ N_2 จัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซเฉื่อย จึงไม่ไวต่อความดัน สำหรับฟิล์ม LDPE ชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์เอ ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซใดๆ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับก๊าซของซีโอไลต์เอทำหน้าที่ดูดซับก๊าซไว้ในโครงสร้างรูพรุน พิจารณาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม PBAT พบว่าก๊าซ N_2 และ CH_4 ไม่สามารถซึมผ่านได้ ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซ CH_4 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่จึงไม่สามารถซึมผ่านฟิล์ม PBAT ได้ ส่วนก๊าซ N_2 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่รองลงมาจากก๊าซ CH_4 และจัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซเฉื่อย ในขณะที่ก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 สามารถซึมผ่านฟิล์ม PBAT ได้ เนื่องจากก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 มีขนาดเล็กที่สุด จึงเกิดการซึมผ่านของได้ โดยมีค่าการซึมผ่านก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์เอทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิวพบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซใดๆ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับก๊าซของซีโอไลต์เอทำหน้าที่ดูดซับก๊าซไว้ในโครงสร้างรูพรุนเช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE

ตารางที่ 4.27 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

Gas	Gas permeability (cc·mm/m ² ·10 min·atm)											
	Plastic bag				LDPE				PBAT			
	1	3	5	8	1	3	5	8	1	3	5	8
CO ₂	0.000201	0.000331	0.000383	0.000417	-	-	-	-	-	-	0.000107	0.000149
O ₂	0.000289	0.000323	0.000480	0.000581	0.000922	0.001040	0.001730	0.001660	-	0.000470	0.000658	0.000749
N ₂	0.000070	0.000083	0.000095	0.000079	0.000679	0.000586	0.000767	0.000896	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(ทดสอบที่ความดัน 1 - 8 bar, - หมายถึง ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซ)

4.4.4 สมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.28 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm ถูกระบุแสดงค่า T_m เท่ากับ 117.0 °C ฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T แสดงค่า T_m เท่ากับ 110.8°C, 111.9°C และ 113.2°C ตามลำดับ และ ฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T แสดงค่า T_m เท่ากับ 111.2°C, 115.1°C และ 115.5°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_m นั้นมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 110 – 115 °C ส่วนค่า T_c ของถุกระบุ เท่ากับ 106.9°C ฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T แสดงค่า T_c เท่ากับ 98.2°C, 97.7°C และ 97.5°C ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T แสดงค่า T_c เท่ากับ 82.2°C, 105.7°C และ 103.2°C ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ ถุกระบุและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 38.0, 39.3, 37.0 และ 41.0% ตามลำดับ พบว่าระดับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอยู่ในช่วง $39 \pm 2^\circ\text{C}$ ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ มีค่าเท่ากับ 14.7, 13.3 และ 15.0% ตามลำดับ สามารถสังเกตได้ว่าซีโอไลต์เอนไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.28 เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของ ฟิล์มต่างๆ ความหนา 0.05-0.06 mm

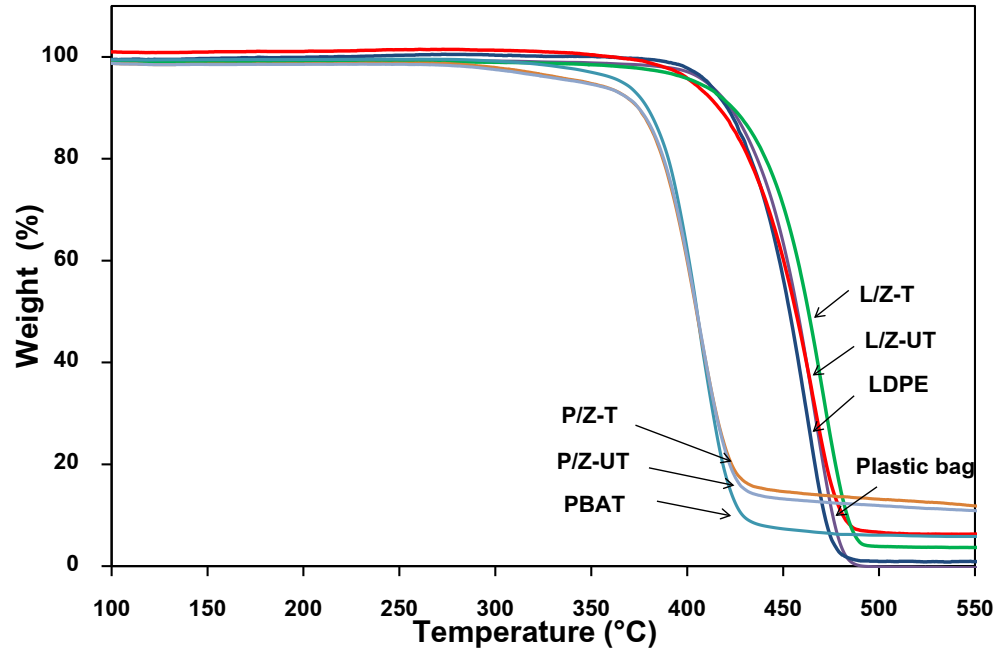
Samples	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
Plastic bag	117.0	106.9	111.3	38.0
LDPE	110.8	98.2	115.0	39.3
L/Z-UT	111.9	97.7	108.0	37.0
L/Z-T	113.2	97.5	120.1	41.0
PBAT	111.2	82.2	16.8	14.7
P/Z-UT	115.1	105.7	15.1	13.3
P/Z-T	115.5	103.2	17.1	15.0

4.5.5 การสลายตัวทางความร้อน

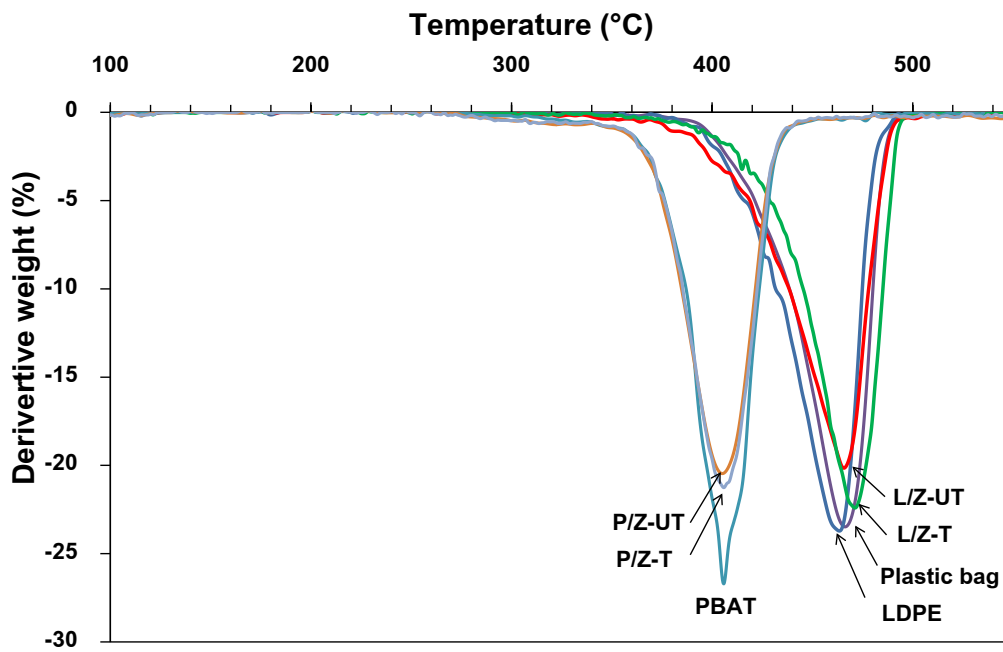
จากรูปที่ 4.47 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 250°C ถึง 450°C ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าถุงเย็นมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด เท่ากับ 467°C ฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 464°C, 465°C และ 467°C ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 405°C, 405°C และ 406°C ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิการสลายตัวของถุงเย็นและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ และเพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นสามารถดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนกลับของน้ำหนักที่สูญเสียไปที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.48

ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนาระหว่าง 0.05-0.06 mm

Samples	0.05-0.06 mm		
	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
Plastic bag	406	420	457
LDPE	408	420	453
L/Z-UT	400	414	456
L/Z-T	399	421	463
PBAT	360	333	329
P/Z-UT	378	372	372
P/Z-T	405	405	404



รูปที่ 4.47 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm



รูปที่ 4.48 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm

4.5 Colostomy bag ทางการค้ากับ พลาสติก LDPE และ พลาสติก PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมซีโอไซด์และความหนา 0.09-0.10 mm

4.5.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

ผลการศึกษาศสมบัติการทนต่อแรงดึงของ colostomy bag ทางการค้า จำนวน 3 ยี่ห้อ ได้แก่ B-Braun (BB), Coloplast (CL) และ Convatec (CN) กับพลาสติก LDPE และพลาสติก PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไซด์ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักร แสดงในตารางที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ พบว่า E , σ_y , σ_b และ ϵ_b ของ colostomy bag และพลาสติก LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไซด์ แสดงค่าใกล้เคียงกัน ทั้งผลการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักร ในขณะที่สมบัติการทนต่อแรงดึงของพลาสติก PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไซด์ แสดงแนวโน้มของ E และ σ_b ที่ต่ำกว่า colostomy bag และพลาสติก LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไซด์ สำหรับการทดสอบทั้งสองทิศทาง สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อนำ colostomy bag ซึ่งเป็นพลาสติกทางการค้าที่มีการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับสมบัติการทนต่อแรงดึงกับพลาสติกที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ สำหรับพลาสติก LDPE และพลาสติก PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไซด์ แสดงสมบัติที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทนต่อแรงดึงดังกล่าว จึงเป็นการยืนยันความสามารถการนำไปใช้งานจริงของพลาสติกที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.30 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่างๆ ทดสอบตามแนวเครื่องจักร ที่มี ความหนา 0.09-0.10 mm

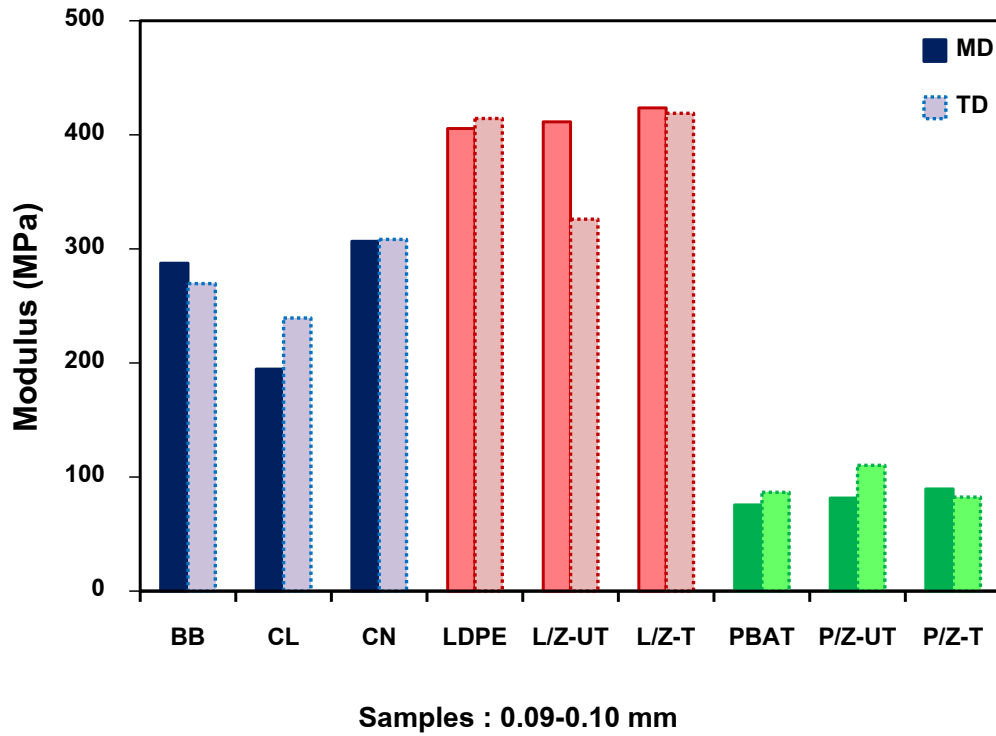
Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
BB	0.089±0.005	259±36	12.3±1.3	8±0	20.4±1.6	391±20
CL	0.097±0.007	216±35	11.9±0.3	7±0	12.0±0.1	468±9
CN	0.093±0.004	343±38	12.9±3.2	8±0	25.1±1.9	515±7
LDPE	0.096±0.009	399±55	5.7±1.0	10±1	13.3±2.3	339±62
L/Z-UT	0.103±0.005	421±5	9.5±1.5	12±0	13.3±0.9	296±21
L/Z-T	0.086±0.006	396±76	7.0±0.9	11±1	13.1±1.8	298±27
PBAT	0.087±0.010	76±6	21.0±2.3	7±1	11.1±1.1	394±26
P/Z-UT	0.096±0.006	82±10	20.0±2.1	6±1	9.5±1.4	391±6
P/Z-T	0.091±0.006	90±13	21.1±1.3	7±1	10.2±0.9	343±32

ตารางที่ 4.31 สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มต่างๆ ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ที่มี ความหนา 0.09-0.10 mm

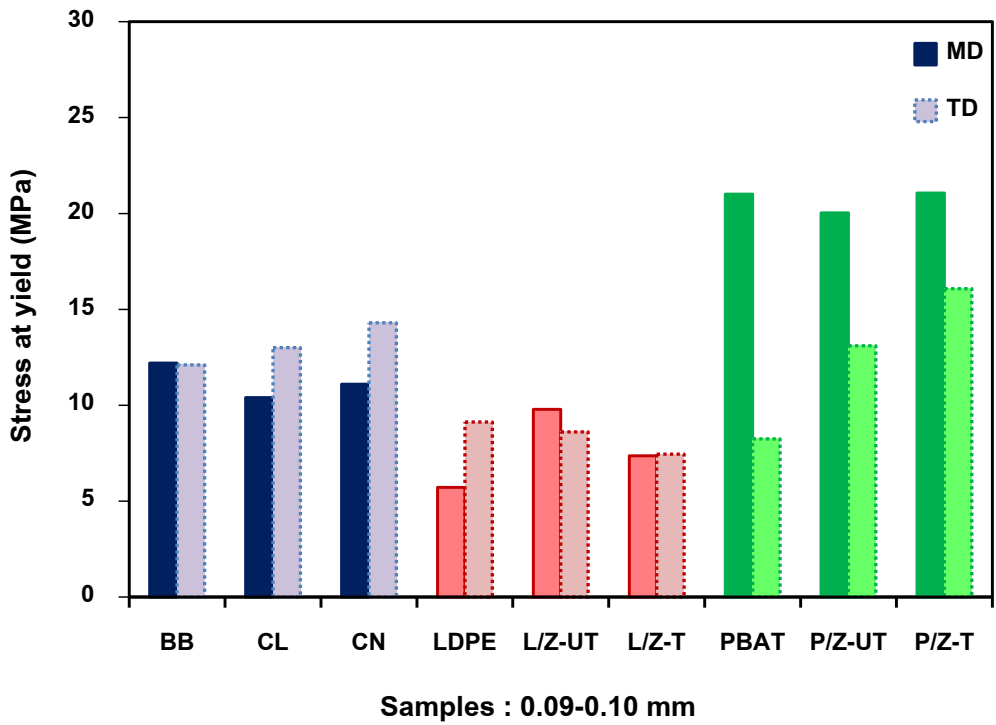
Samples	Thickness (mm)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_b (MPa)	ϵ_b (%)
BB	0.090±0.004	276 ± 27	10.9±0.5	9±1	20.7±1.4	553±5
CL	0.095±0.006	223 ± 30	11.7±0.5	7±1	16.4±1.7	352±35
CN	0.091±0.004	317 ± 26	11.0±1.4	9±0	22.9±1.9	344±14
LDPE	0.099±0.004	396±60	8.8±1.2	11±1	10.2±1.0	100±26
L/Z-UT	0.087±0.004	307±44	9.0±1.1	10±1	9.7±0.8	153±52
L/Z-T	0.094±0.007	414±29	7.7±0.6	11±0	10.1±0.6	144±38
PBAT	0.074±0.003	87±6	8.24±1.0	5±0	9.1±0.2	286±11
P/Z-UT	0.104±0.004	110±7	13.1±1.1	9±0	12.6±0.3	334±22
P/Z-T	0.084±0.003	82±6	16.1±1.0	6±0	8.5±0.5	277±14

พิจารณาค่า E ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักร และแนวขวางเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 4.49 พบว่าค่า E สำหรับ colostomy bag มีค่าอยู่ในช่วง 200-300 MPa และฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ มีค่าอยู่ในช่วง 300-400 MPa ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ มีค่าประมาณ 100 MPa พบว่าค่า E ของ colostomy bag และฟิล์ม LDPE มีค่าใกล้เคียงกัน และฟิล์ม LDPE แสดงแนวโน้มมากกว่า colostomy bag ค่า σ_y ของฟิล์มต่างๆ สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงในรูปที่ 4.50 พบว่าค่า σ_y ของ colostomy bag และฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์เอ มีค่าใกล้เคียงกันส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 9-12 MPa ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ มีค่าประมาณ 10-20 MPa และเมื่อเปรียบเทียบค่า σ_y colostomy bag และฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งจากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร

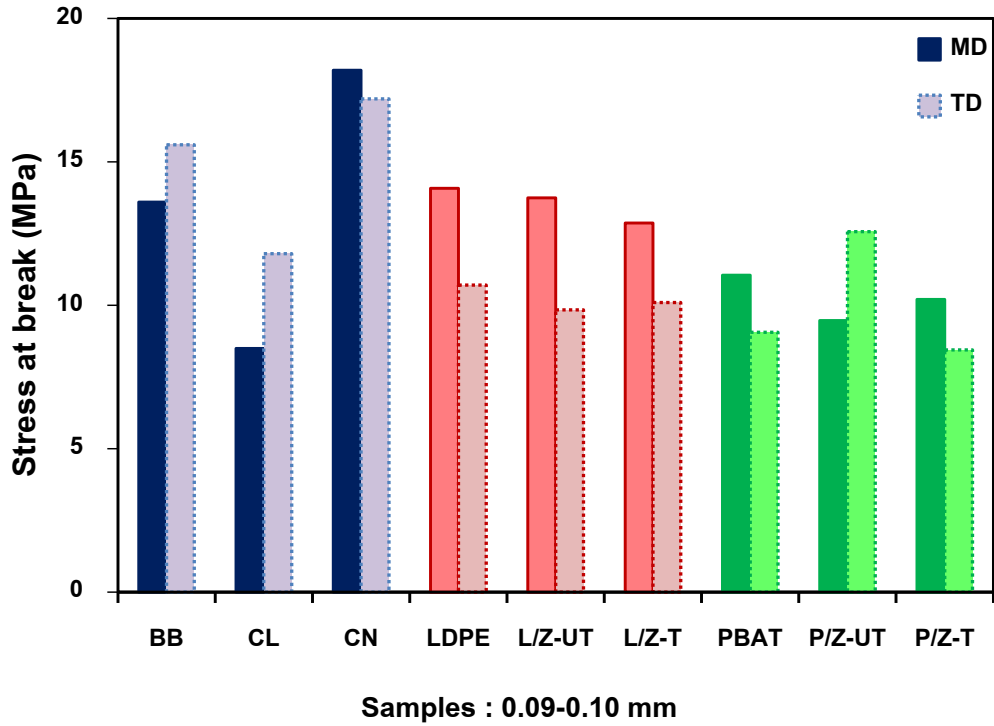
พิจารณาค่า σ_b ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงและแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.51 พบว่า σ_b ของ colostomy bag ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่เติมซีโอไลต์ มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง คือ 9-15 MPa และเมื่อเปรียบเทียบค่า σ_b จากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร พบว่าการทดสอบตามแนวเครื่องจักรส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าแนวตามขวางเครื่องจักร ค่า ϵ_b ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบตามแนวเครื่องจักรแสดงและแนวขวางเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 4.52 พบว่า ϵ_b ตามแนวเครื่องจักรส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 200-300% ในขณะที่ ϵ_b ตามแนวขวางเครื่องจักรมีค่าน้อยกว่า คือ มีค่าอยู่ในช่วง 100-300%



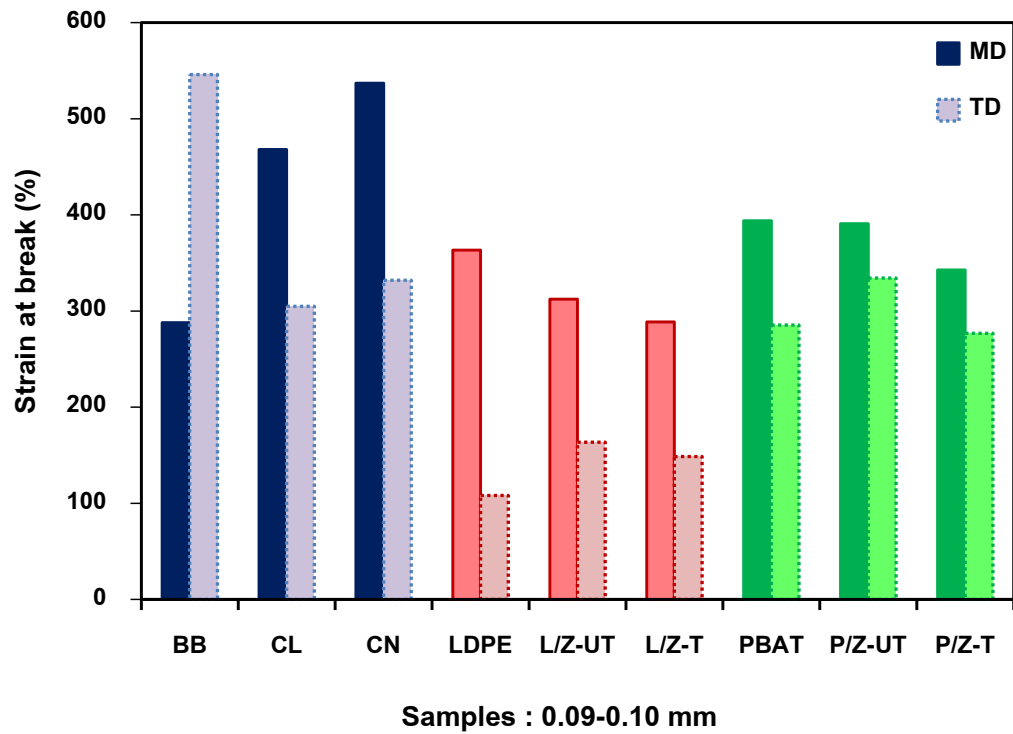
รูปที่ 4.49 มอดุลัสของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm



รูปที่ 4.50 ความเค้น ณ จุดครากของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm



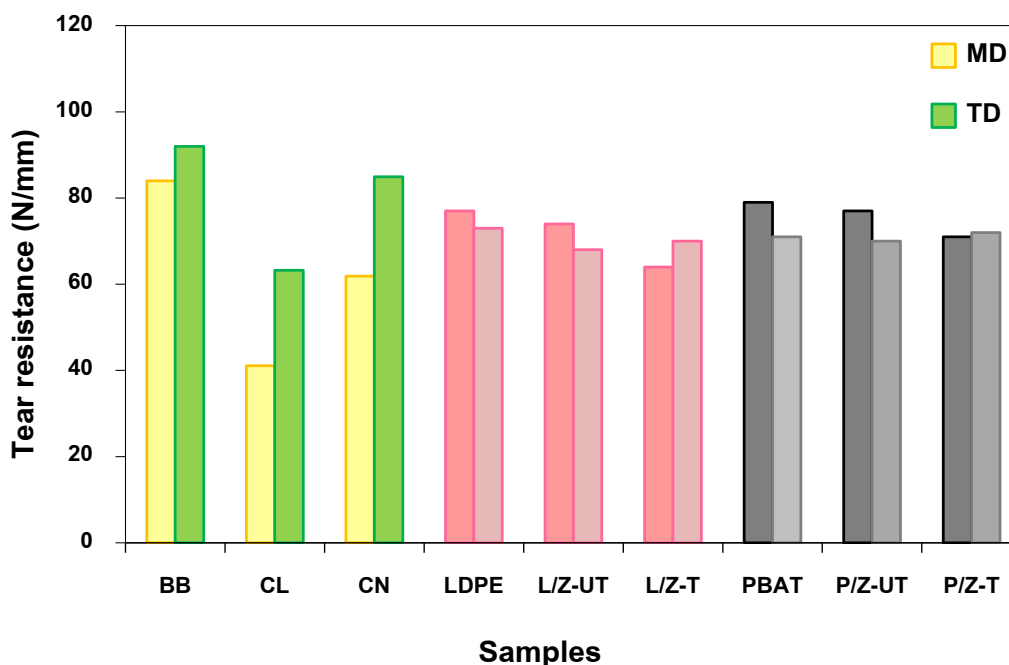
รูปที่ 4.51 ความเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm



รูปที่ 4.52 ความเครียด ณ จุดขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

4.5.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงรูปที่ 4.53 และตารางที่ 4.32 พบว่า colostomy bag (BB, CL, CN) จากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแตกต่างกันออกไป คือ BB มีค่าระหว่าง 80-90 N/mm CL มีค่าระหว่าง 40-60 N/mm และ CN มีค่าระหว่าง 60-80 N/mm ส่วนฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมซีโอโลไซด์และไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ จากการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ระหว่าง 70 – 80 N/mm สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนได้ว่า colostomy bag และฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรแสดงค่าในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.53 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

ตารางที่ 4.32 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

Samples	Tear strength (N/mm)	
	MD	TD
B-Braun	84 ± 1	92 ± 19
Coloplast	41 ± 2	63 ± 1
Convatec	62 ± 3	85 ± 2
LDPE	77 ± 4	73 ± 0
L/Z-UT	74 ± 5	66 ± 1
L/Z-T	64 ± 3	70 ± 1
PBAT	79 ± 6	71 ± 4
P/Z-UT	77 ± 9	70 ± 4
P/Z-T	71 ± 2	72 ± 1

4.5.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ทดสอบโดยการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ เท่ากับ 1 cc ที่ความดันของก๊าซระดับต่างๆ ของ colostomy bag ฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีและไม่มี การเติมซีโอไลต์ และ ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีและไม่มี การเติมซีโอไลต์ พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซใดๆ ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มตัวอย่างมีความหนาเพิ่มมากขึ้น นั้นหมายความว่าโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มตัวอย่างเป็นไปได้ยากขึ้น ในขณะที่ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์คาดว่าอาจ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับก๊าซของซีโอไลต์เอทำหน้าที่ดูดซับก๊าซไว้ในโครงสร้างรูพรุน

4.5.4 สมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.33 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm colostomy bag (BB, CL, CN) แสดงค่า T_m เท่ากับ 131.7 °C, 113.4°C และ 102.1°C ตามลำดับ ฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T แสดงค่า T_m เท่ากับ 111.3°C, 110.2°C และ 112.3°C ตามลำดับ และ ฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T แสดงค่า T_m เท่ากับ 115.2°C, 115.1°C และ 111.6°C ตามลำดับ พบว่าค่า T_m นั้น มีค่าอยู่ในช่วง 110 – 115 °C

ส่วนค่า T_c ของ colostomy bag (BB, CL, CN) เท่ากับ 117.1°C, 95.2°C และ 82.6°C ตามลำดับ พิล์ม LDPE พิล์ม L/Z-UT และพิล์ม L/Z-T แสดงค่า T_c เท่ากับ 97.9°C, 97.9°C และ 98.0°C ตามลำดับ ในขณะที่พิล์ม PBAT พิล์ม P/Z-UT และพิล์ม P/Z-T แสดงค่า T_c เท่ากับ 87.3°C, 104.7°C และ 103.3°C ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ colostomy bag ยี่ห้อ BB และพิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 35.0, 43.5, 41.1 และ 43.3% ตามลำดับ ในขณะที่ colostomy bag ยี่ห้อ CL และ CN ไม่สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้ เนื่องจากไม่ทราบว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิดใด ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ มีค่าเท่ากับ 20.6, 20.6 และ 19.6% ตามลำดับ สามารถสังเกตได้ว่าซีโอโลไซด์ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพิล์ม LDPE และพิล์ม PBAT อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.33 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของพิล์มต่าง ๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

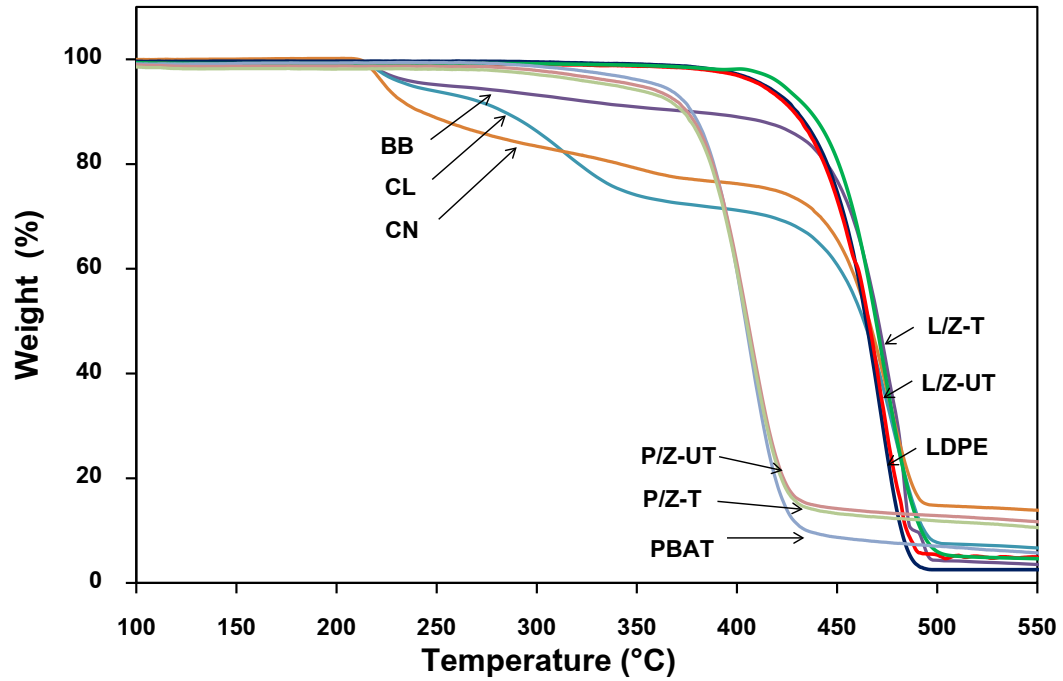
Samples	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g)	Degree of crystallinity (%)
BB	131.7	117.1	102.6	35.0
CL	113.4	95.2	120.3	-
CN	102.1	82.6	118.7	-
LDPE	111.3	97.9	127.3	43.5
L/Z-UT	110.2	97.9	120.4	41.1
L/Z-T	112.3	98.0	127.0	43.3
PBAT	115.2	87.3	23.5	20.6
P/Z-UT	115.1	104.7	23.4	20.6
P/Z-T	111.6	103.3	22.3	19.6

4.5.5 การสลายตัวทางความร้อน

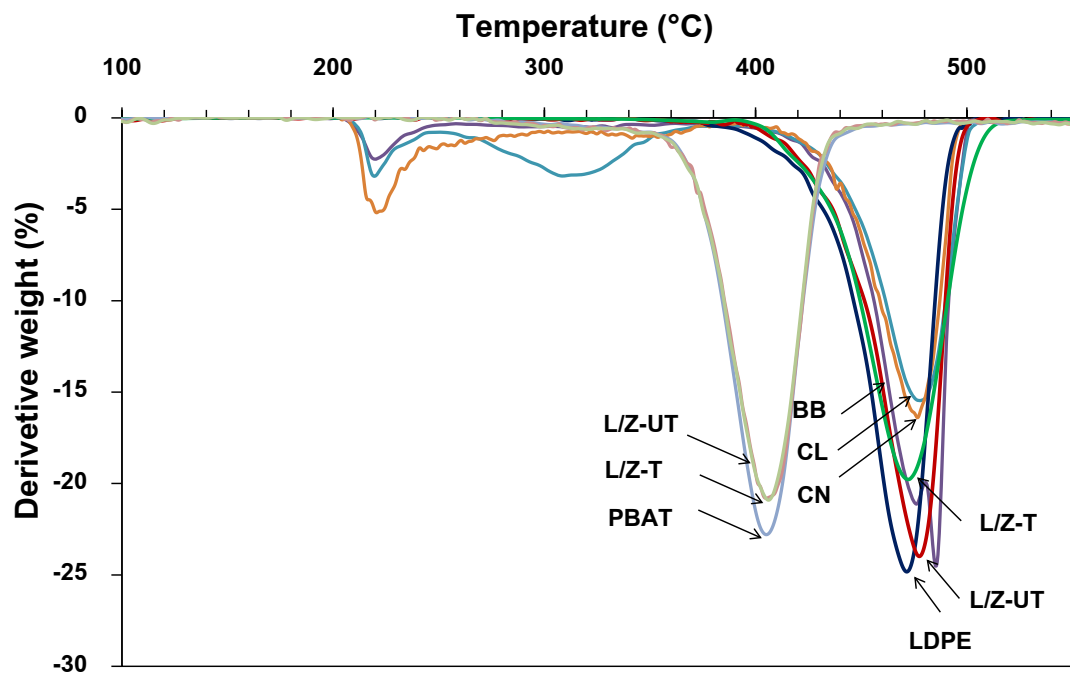
จากรูปที่ 4.47 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 220°C ถึง 490°C ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า colostomy bag (BB, CL, CN) มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด เท่ากับ 478°C, 480°C และ 476°C ตามลำดับ ฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 472°C ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 404°C, 405°C และ 404°C ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า อุณหภูมิการสลายตัวของ colostomy bag และฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ และเพื่อให้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นสามารถดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนกลับของน้ำหนักที่สูญเสียไปที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.55

ตารางที่ 4.34 เปรียบเทียบอุณหภูมิ T_5 , T_{10} และ T_{50} ของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนาระหว่าง 0.09-0.10 mm

Samples	0.09-0.10 mm		
	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
BB	238	352	471
CL	233	278	461
CN	222	237	465
LDPE	409	427	464
L/Z-UT	385	423	431
L/Z-T	402	431	469
PBAT	352	336	322
P/Z-UT	376	373	370
P/Z-T	404	405	404



รูปที่ 4.54 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm



รูปที่ 4.55 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มต่างๆ ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การตัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วย PEG

เมื่อพิจารณาสเปกตรัม FTIR ของการตัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์เอ สามารถยืนยันผลการตัดแปรพื้นผิวซีโอไลต์เอด้วย PEG ได้ว่าประสบผลสำเร็จ เนื่องจากการปรากฏพีคของ PEG ในสเปกตรัมของซีโอไลต์เอตัดแปรพื้นผิว ทำให้ทราบว่ามีความหนาแน่นของ PEG บนอนุภาคซีโอไลต์เอตัดแปรพื้นผิว

5.2 फिल्म LDPE และ फिल्म LDPE ผสมซีโอไลต์เอ

5.2.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงของ फिल्म LDPE फिल्म L/Z-UT และ फिल्म L/Z-T ตามแนวเครื่องจักร โดยที่สมบัติตามแนวเครื่องจักรมีค่าสูงกว่า फिल्मที่ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ค่ามอดุลัส ความเค้น ณ จุดคราก ความเค้น ณ จุดขาด และความเครียด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ फिल्म LDPE ทั้ง फिल्मที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm

5.2.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของ फिल्म LDPE फिल्म L/Z-UT และ फिल्म L/Z-T ตามแนวเครื่องจักร ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่า फिल्मที่มีการเติมซีโอไลต์เอมีค่าสูงกว่า फिल्म LDPE फिल्मที่มีความหนา 0.09-0.10 mm แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของ फिल्म L/Z-UT มากกว่า फिल्म LDPE และ फिल्म L/Z-T มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับ फिल्म LDPE โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของ फिल्मส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 60-80 N/mm และผลการทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร พบว่า फिल्मส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 65-75 N/mm ทั้งที่ความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm

5.2.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

फिल्मที่มีความหนา 0.05-0.06 mm มีการซึมผ่านของก๊าซ O_2 และ N_2 โดยก๊าซ O_2 มีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้นและมีค่าการซึมผ่านมากกว่าก๊าซ N_2 ในขณะที่ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซ CO_2 และ CH_4 สำหรับ फिल्मที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซเกิดขึ้น เนื่องจากฟิล์มตัวอย่างมีความหนาเพิ่มมากขึ้น คาดว่าโอกาสที่โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มตัวอย่างเป็นไปได้ยากขึ้น

5.2.4 สมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเติมซีโอไลต์เอ ไม่มีอิทธิพลต่อจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกของ LDPE ปริมาณผลึกของฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm อยู่ในช่วง $39\pm 2\%$ และ $41\pm 3\%$ ตามลำดับ

5.2.5 การสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์ม LDPE ฟิล์ม L/Z-UT และฟิล์ม L/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm ด้วยเทคนิค TGA พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว โดยมีการสลายตัวระหว่างช่วงอุณหภูมิ 400°C ถึง 500°C ซึ่งฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดเท่ากับ 453°C , 456°C และ 463°C ส่วนฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm มีค่าเท่ากับ 464°C , 431°C และ 469°C โดยอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอลงในฟิล์ม LDPE ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องมาจากผลของโครงสร้างคาร์บอนที่อยู่บนชั้นซิลิเกต ช่วยทำให้มีการทนทานต่อความร้อนมากยิ่งขึ้น

5.3 ฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสมซีโอไลต์เอ

5.3.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T พบว่าการเติมซีโอไลต์เอ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ค่ามอดุลัส ความเค้น ณ จุดคราก ความเค้น ณ จุดขาด และความเครียด ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม PBAT โดยที่สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มที่ทดสอบตามแนวเครื่องจักรส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร ทั้งฟิล์มที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm

5.3.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm พบว่าฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มทั้งสองทิศทาง โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 70-80 N/mm

5.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

ฟิล์ม PBAT ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm มีการซึมผ่านของก๊าซ CO₂ และ O₂ โดยก๊าซทั้งสองมีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้นก๊าซ ในขณะที่ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซ N₂ และ CH₄ สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm ไม่มีการซึมผ่านของก๊าซเกิดขึ้น เนื่องจากฟิล์มตัวอย่างมีความหนาเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE ที่มีความหนา 0.09-0.10 mm

5.3.4 สมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึก เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติมซีโอไลต์เอ คาดว่าอาจเนื่องมาจากการเติมซีโอไลต์จึงส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำลงเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกเกิดได้เร็วขึ้น และปริมาณผลึกของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงและมีค่าอยู่ในช่วง 13±2% ส่วนสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่มีความหนา 0.09-0.10 mm พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าการเติมซีโอไลต์เอไม่มีผลต่อปริมาณผลึกของฟิล์ม PBAT เช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE และมีค่าอยู่ในช่วง 19±1%

5.3.5 การสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์ม PBAT ฟิล์ม P/Z-UT และฟิล์ม P/Z-T ที่มีความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว เช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE โดยมีการสลายตัวระหว่างช่วงอุณหภูมิ 250°C ถึง 450°C ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 404°C, 405°C และ 406°C ทั้งที่ความหนา 0.05-0.06 mm และ 0.09-0.10 mm แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของน้ำหนักพบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปของฟิล์ม PBAT มีค่าประมาณ 95% ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปของฟิล์มที่มีการเติมซีโอไลต์เอ มีค่าประมาณ 90% ซึ่งอาจคาดการณ์ได้ว่าเป็นผลมาจากการเติมซีโอไลต์เอ จึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าฟิล์ม PBAT

5.4 ถุงเย็นทางการค้า (plastic bag) กับ พลาสติก LDPE และ พลาสติก PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ ความหนา 0.05-0.06 mm

5.4.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

พิจารณาสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงเย็นเทียบกับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าส่วนใหญ่แสดงสมบัติการทนต่อแรงดึงเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5.4.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

พิจารณาความต้านทานต่อการฉีกขาดของถุงเย็นเทียบกับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร

5.4.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

ถุงเย็น มีการซึมผ่านของก๊าซ CO₂ O₂ และ N₂ ส่วนฟิล์ม LDPE มีการซึมผ่านของก๊าซ O₂ และ N₂ และฟิล์ม PBAT มีการซึมผ่านของก๊าซ CO₂ และ O₂ โดยก๊าซทั้งสองมีการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการทดสอบเพิ่มขึ้นก๊าซ สำหรับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ชนิดที่มีการเติมซีโอโลไซด์ทั้งชนิดดัดแปรและไม่ดัดแปรพื้นผิว พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซใดๆ

5.4.4 สมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของถุงเย็น ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน และปริมาณผลึกของถุงเย็น ฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ มีค่าอยู่ในช่วง 39±2% ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ มีค่าอยู่ในช่วง 13±2%

5.4.5 การสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของถุงเย็น ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว โดยมีการสลายตัวระหว่างช่วงอุณหภูมิ 200°C ถึง 500°C โดยถุงเย็นและฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลไซด์ มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดประมาณ

460°C ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइटที่มีอนุกรมมีการสลายตัวสูงสุดประมาณ 405°C

5.5 Colostomy bag ทางการค้ากับ ฟิล์ม LDPE และ ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีและไม่มีการเติมซีโอโลइटเอ ความหนา 0.09-0.10 mm

5.5.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง

พิจารณาสมบัติการทนต่อแรงดึงของ colostomy bag เทียบกับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइटเอที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าส่วนใหญ่แสดงสมบัติการทนต่อแรงดึงเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5.5.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

พิจารณาความต้านทานต่อการฉีกขาดของ colostomy bag เทียบกับฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइटเอ ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งการทดสอบตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร

5.5.3 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

พิจารณาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของ colostomy bag ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइटเอที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าไม่มีการซึมผ่านของก๊าซเกิดขึ้น เนื่องจากฟิล์มตัวอย่างมีความหนาเพิ่มมากขึ้น

5.5.4 สมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ colostomy bag ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइटเอที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ปริมาณผลึกมีค่าแตกต่างกันออกไป คือ ปริมาณผลึกของ colostomy bag มีค่า 35% ฟิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइट มีค่าอยู่ในช่วง $40 \pm 2\%$ ในขณะที่ฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइट มีค่าอยู่ในช่วง $19 \pm 1\%$

5.5.5 การสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของ colostomy bag ฟิล์ม LDPE และฟิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอโลइटเอที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ พบว่า colostomy

bag มีการสลายตัวเกิดขึ้นสองช่วง ได้แก่ 230°C และ 480°C พิล์ม LDPE และพิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ มีการสลายตัวเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียว โดยมีการสลายตัวระหว่างช่วงอุณหภูมิ 200°C ถึง 450°C พิล์ม LDPE ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์ มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดประมาณ 460°C ในขณะที่ พิล์ม PBAT ทั้งชนิดที่มีการเติมและไม่มีการเติมซีโอไลต์มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดประมาณ 405°C

บรรณานุกรม

- กัญญาวิรี สุวรรณชัย. 2548. การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านน้ำของฟิล์มอัดรีดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหา - บัณฑิต, เทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
- ธีระพงศ์ จันทะมาตร์. สุนันทา เลาว์ฉัยศิริ และ เรวดี อนุวัฒนา. 2553. การเปรียบเทียบ จลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียไนโตรเจนโดยซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จาก ถ้ำชายอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 4A. การประชุมวิชาการแห่งชาติครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. หน้า1928-1936.
- นุดา พิสุทธิธีร. 2554. การเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- เนตรนภา ลามอ. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์. และ อภิตา บุญศิริ. 2552. การพัฒนาฟิล์มบรรจุ ภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซีโอไลต์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะนาว. การ ประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. กรุงเทพฯ, 17-20 มีนาคม 2552. หน้า 175-182.
- วราภรณ์ พุทธิสสะ. 2549. การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสม ด้วยซีโอไลต์เอโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, เทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2554. เคมี่พื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. สำนักพิมพ์ท็อป:กรุงเทพฯ.
- อุษา อันทอง. 2549. การวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้ในการ บำบัด. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน. หน้า 44-50.
- อุษา อันทอง และ วิภาณดา ทองเนื้อแข็ง. 2552. การดูดซับสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำด้วยซี โอไลต์. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- อุษา อันทอง และ ศุภโชค ชินพงษ์. 2548. การดูดซับร่วมแอมโมเนียและฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยซี โอไลต์. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- Alcantar N., Aydil E., Israelachvili J. 2000. Polyethylene glycol-coated biocompatible surfaces. Journal of Biomedical Materials Research: Part A Volume 51 (3):343-351.

- Arunvisut, S., Phummanee, S. and Somwangthanaroj, A. 2007. Effect of clay on mechanical and gas barrier properties of blown film LDPE/clay nanocomposites. *Journal of applied polymer science* 106:2210-2217.
- Auerbach, S.M. and Nelson, P.H. 1999. *Chemical Engineering Journal*. 74:43-56.
- Booncharoen, W., Apisittinet, S., Sirikittikul, D., Loykulnant, S., Fuongfuchat, A., Rutvirulh, C., Sooknoi, T. 2007. Structure and Gas Selectivity of PE/Zeolite Composite Film.
- Brule, B. and Flat, J. 2006. High barrier polyamide/polyolefin/ organoclay nanocomposites. *Macromolecular Symposia*, 233:210-216.
- B. H. Gregory. 2009. *Polyethylene Film Extrusion*. Trafford. Victoria, BC, Canada.
- Cardinud, R. and McNally, T. 2013. Localization of MWCNTs in PET/LDPE blends. *European Polymer Journal*. 49:1287-1297.
- Chang, B., Akil, H., Nasir, R. 2013. Mechanical and Tribological Properties of Zeolite-reinforced UHMWPE composite for Implant Application. *Procedia Engineering* 68:88-94. The Malaysian International Tribology Conference 2013, MITC 2013.
- Chen, J., Chen, C., Yang, M. 2011. Characterization of nanocomposites of poly(butylene adipate-co-terephthalate) blending with Organoclay. *Journal of polym research* 18:2151–2159.
- Coulson, J. and Richardson. 1991. *Particle Technology and Separation Processes: Chemical volume 2*, 4th ed., Butterworth-Heinemann.
- Dirim, S., ESIN A. and BAYINDIRLI A. 2001. A New Protective Polyethylene Based Film Containing Zeolites for the Packaging of Fruits and Vegetables: Film Preparation. *Turkish Journal Engineering and Environmental Sciences* 27:1-9.
- Gu, J., Lai, A., Zhang, J., Bai, Y., Zhang, C. and Sun, Y. 2012. Effects of 4A Zeolite Additions on the Structure and Performance of LDPE Blend Microfiltration Membrane through Thermally Induced Phase Separation Method. *Journal of Membrane and Separation Technology*, 1:52-59.
- Guichon, O., Seguela, R., David, L., Vigier, G. 2003. Influence of the Molecular Architecture of Low-Density Polyethylene on the Texture and Mechanical Properties of Blown Films. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol.41, 327-340.

- Guisnet, M. and Gilson, J. 2002. Zeolites for cleaner technologies. Imperial Collage Press: London.
- Harper, C.A. (2002). Handbook of plastics, elastomers and compoites. 4th ed.; Mcgraw-Hill: United states of America, pp. 38-40.
- Hong, S. and Krochta, J. 2004. Whey Protein Isolate Coating on LDPE Film as a Novel Oxygen Barrier in the Composite Structure. Packaging Technology and Science; 17:13.21.
- Kolhe, P., and Kannan, R.M. 2003. Improvement in Ductility of Chitosan through Blending and Copolymerization with PEG: FTIR Investigation of Molecular Interactions. Biomacromolecules,4:173-180.
- Krohn, J., Tate R. and Donnie J.1997. Factors affecting the permeability of PE blown films.Proceedings of the SPE 55th Annual Technical Conference & Exhibits, ANTEC.pp.1654-1658.
- Kurek, M., Ščetar, M., Voilley, A., Galić, K., Debeaufort, F. 2012. Barrier properties of chitosan coated polyethylene. Journal of Membrane Science 403-404:162-168.
- Metin, D., Tihminlioğlu, F., Balköse, D., Ülkü, S. 2004. The effect of interfacial interaction on the mechanical properties of polypropylene/natural zeolite composites. Composites: Part A 35:23-32.
- Mohanty, S. and Nayak, S. 2012. Biodegradable Nanocomposites of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and Organically Modified Layered Silicates. Journal of Polymer Environment, 20:195-207.
- Nampitch, T. and Magaraphan. 2012. Mechanical and Thermal Properties of Biodegradable Films from Blends of Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Polylactic acid and Epoxidized Natural Rubber. Naresuan University Journal; 20(2).
- Sungkhsee, N. 2009. Overcome PLA limitations by compounding with modified additive. A thesis for the degree of master of science. The Petroluem and Petrochemical College, Chulalongkorn University in Academic Partnership with The University of Michigan, The University of Okalahoma, and Case Western Reserve University. Bangkok.
- Pehlivan, H., Balköse, D., Ülkü, S., Tihminlioğlu, F. 2005. Characterazation of pure and silver exchanged natural zeolite filled polypropylene composite films. Composites Science and Technology 65:2049-2058.

- Pisutthian, N., Laokijcharoen, P., Tanrattanakul, V. 2011. Mechanical properties of PBAT/NR Tubular blown film, the 3rd International Conference on Biodegradable and Biobased Polymers (BIOPOL-2011), Strasbourg, France, 29-31 August 2011.
- Rahmati, M. and Modarress, H. 2009. Nitrogen adsorption on nanoporous zeolite studied by Grand Canonical Monte Carlo simulation. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM* 901: 110-116.
- Ruthven, D.M. 1984. *Principles of Adsorption and Adsorption Process*. John Wiley & Sons, Inc.
- Sadeghi, M., Semsarzadeh, M., Moadel, H. 2009. Enhancement of the gas separation properties of polybenzimidazole (PBI) membrane by incorporation of silica nano particles. *Journal of Membrane Science*:21-30.
- Siriwardane, R., Shen, M. and Fisher, E. 2003. Adsorption of CO₂, N₂ and O₂ on Natural Zeolites. *Energy & Fuels*, 17:571-576.
- Wang, Y., Easteal, A. and Chen, X. D. 1998. Ethylene and Oxygen Permeability Through Polyethylene Packaging Films. *Packaging Technology and Science* 11:169-178.
- Yamamoto, M., Witt, U., Skupin, G., Beimborn, D., Muller, J. 2005. Biodegradable Aliphatic-Aromatic Polyester: "Ecoflex®". Wiley-VCH:Weinheim.:299-305.
- Yampolskii, Y., Pinnau, I., Freeman, B D. 2006. *Materials Science of Membranes for Gas and Vapor Separation*. John wiley & sons, Ltd., New York, p.6.
- Yoshioka, T., Kanezashi, M., Tsuru, T. 2013. Micropore Size Estimation on Gas Separation Membranes: A Study in Experimental and Molecular Dynamics. *AIChE J*:59:2179-2194.
- Zhong, Y., Janes, D., Zheng, Y., Hetzer, M. and Kee, D. 2007. Mechanical and Oxygen Barrier Properties of Organoclay-Polyethylene Nanocomposite Films. *Polymer Engineering and Science*, 47:1101-1107. Society of Plastics Engineers.
- Zhang, N., Wang, Q., Ren, J., Wang, L. 2009. Preparation and properties of biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylenes adipate-co-terephthalate) blend with glycidyl methacrylate as reactive processing agent. *J. Mater. Sci.* 44, 250-256.

ภาคผนวก

เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Section D - Polymer & Materials Science / Nanotechnology

355

D_D0047: EFFECT OF NATURAL ZEOLITE ON MECHANICAL PROPERTIES AND GAS PERMEATION OF LOW DENSITY POLYETHYLENE FILM

Nantaya Junsook,¹ Worravit Wanitsuwan,² Thawat Chittrakarn,³ Varaporn Tanrattanakul^{1*}

¹Medical Product Innovation from Polymers Research Unit, Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand

²Medical Product Innovation from Polymers Research Unit, Department of Surgery, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand

³Membrane Science and Technology Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand

*e-mail: varaporn.t@psu.ac.th

Abstract: The objective of this study was to determine the effect of natural zeolite on the mechanical properties and gas permeation of low density polyethylene (LDPE) film. LDPE film was expected to use in the medical application and the zeolite was acted as a gas adsorbent and reinforcing agent. A tubular blown film was processed in a laboratory and the film thickness was 0.04-0.06 mm, similarly to the conventional plastic bag for food packaging. The zeolite was surface treated with poly(ethylene glycol) for reduction of polarity and enhancement of compatibility between LDPE and zeolite. The addition of zeolite (6 wt%) increased the tensile properties and tear strength of the LDPE film. Gas permeability test was carried out with the following gases: O₂, N₂, CO₂ and CH₄. These gases are generally found in the excrement. LDPE films with and without zeolite were a good barrier for CO₂ and CH₄. O₂ and N₂ were able to permeate through LDPE film without zeolite and the permeability of O₂ significantly increased when a testing pressure increased. In contrast, O₂ and N₂ permeation were not found in the LDPE film containing zeolite. The zeolite showed no effect on the crystallization behavior and little effect on the thermal degradation of the LDPE film as characterized by DSC and TGA, respectively.

Introduction: Low density polyethylene (LDPE) is a conventional plastic that has various applications in view of commodity products such as packaging film, plastic bag, shopping bag, shrink film, wrap film, greenhouse film, electrical cable, and general purpose containers.¹ Due to the low cost and simple film processing, LDPE could be applied to medical applications such as a plastic bag in the ostomy pouching system. It is used for the collection of the excrement which is a waste from a biological system in the human body. Nowadays there are many types of this bag based on a plastic type, brand, and price. The requirements of the bag are strength/toughness and gas permeation. This bag has to carry ~ 500 g of waste and it has to be a good barrier for some gases that are generated in the biological system of the body, e.g., O₂, N₂, CO₂ and CH₄. Generally the toughness, the strength, and gas permeation of the plastic film are strongly dependent on the film thickness. The target of this preliminary study was to produce LDPE film that has a similar thickness to the conventional LDPE bag for food packaging which the thickness is ~ 0.04-0.06 mm. In this case the LDPE film was thinner than the commercial medical plastic bag which the thickness is ~ 0.08-0.1 mm. As a result, the additives may be necessary for increasing the mechanical properties and gas barrier property of the LDPE film. Natural zeolite was selected as the additive in the present study. Natural zeolite is a microporous aluminosilicate mineral and generally used as an adsorbents or catalyst.²⁻³ We expected that the zeolite should increase the tensile properties and decrease gas permeation of the LDPE film because of the inorganic and microporous structure. However, the significant difference in polarity between LDPE and zeolite may cause phase segregation in the film which will minimize the efficiency of the film. Therefore, the surface treatment of the zeolite was applied. Common chemicals

that used for surface treatment of zeolite included stearic acid, xylane coupling agent, and poly(ethylene glycol).^{4,5} Poly(ethylene glycol) was employed in the present study. The effect of zeolite on the crystallization behavior and thermal degradation of the LDPE film was also investigated.

Methodology

Materials

Low density polyethylene (Polene[®]LD2426K) was produced by PTT Co. Ltd. The melt index was 4 g/10 min and the density was 0.924 g/cm³. Natural zeolite (zeolite A) was derived from PQ Chemicals (Thailand) Co. Ltd. The average particle diameter was 3.9 μm and density was 366 g/L. Polyethylene glycol (PEG) was produced by Fluka and the molecular weight was 400. The commercial grade ethanol was used as received.

Surface treatment of zeolite

3 g of PEG was mixed with 97 g of ethanol (50% aqueous solution) before adding 300 g of zeolite at room temperature ($\sim 27^\circ\text{C}$). The mixture was stirred with a mechanical stirrer for 2 h at 40°C , then kept at room temperature for 1 h to cool down before drying in a vacuum at 110°C for 3 h.

Polymer compounding and blown film processing

LDPE was compounded with 6 wt% of zeolite by melt blending in a twin screw extruder (PRISM[®]TSE16TC). The temperature of screw and die was 140 and 150°C , respectively, and the screw speed was 100 rpm. Tubular blown films of LDPE and LDPE compounds were prepared by using a Brabender[®] single screw extruder 19/25D under different processing conditions based on the polymer compositions (Table 1).

Table 1. Processing conditions for tubular blown film of LDPE with and without zeolite

Code	Screw temperature ($^\circ\text{C}$)			Die Temp. ($^\circ\text{C}$)	Screw speed (rpm)	Blowing pressure (psi)	Take off speed (m/min)
	Zone 1	Zone 2	Zone 3				
LDPE	140	150	160	155	40	10	2
L/Z-UT ^a	155	165	175	170	30	5	1
L/Z-T ^b	135	145	155	150	35	5	1

^aLDPE + 6 wt% untreated Zeolite

^bLDPE + 6 wt% Zeolite treated with PEG

Mechanical properties testing

The tensile properties and tear strength were determined by using a universal testing machine (Lloyd[®] LRX-Plus). The specimens were die cut according to ASTM D638 type IV and ASTM D642 die C, respectively. The testing speed was 200 mm/min. Six specimens were tested for every sample.

Gas permeation testing

Gas permeation of films was tested by a homemade gas permeation test system produced by Universite Teknologi Malaysia. Four gases were selected including oxygen (O_2), carbon dioxide (CO_2), nitrogen (N_2) and methane (CH_4), and each gas was tested at various pressures: 1, 3, 5 and 8 bar. Five tests were performed for every sample.

Thermal properties testing

Effect of zeolite on crystallization of LDPE was evaluated by a differential scanning calorimeter (DSC200 F3, Netzsch Co. Ltd.). The heating rate was $10^\circ\text{C}/\text{min}$ at the temperature of 20 - 200°C . The thermal stability of the films was evaluated by a thermal

gravimetric analyzer (STA449 F3, Netzsch Co. Ltd.). The samples were heated from 30°C to 700°C under a nitrogen atmosphere with a heating rate of 10°C/min.

Results and Discussion: The mechanical properties of the tubular blown films were determined on the machine direction. The tensile properties of films are shown in Figure 1. Zeolite acted as the reinforcing filler because it increased the Young's modulus, yield stress and tensile strength of LDPE. Surprisingly, the addition of zeolite also increased the strain at break of the film. These results indicate the high compatibility between LDPE and natural zeolite. The effect of surface treatment in zeolite was well observed in all tensile properties, except the modulus which was similar to the untreated sample. The results indicated that the L/Z-T sample had the highest toughness. It should be noted that there was a limitation in the processing of the tubular blown film in the present study. The length of the bubble was ~ 60 cm, and the bubble diameter was ~ 8-10 cm whereas the diameter of the annular die was 2.54 cm. Thus the orientation in the both directions was relatively low when compared with the commercial blown film, leading to a relatively low strength and strain at break. The tear strength of the LDPE film is exhibited in Figure 2. Zeolite increased the tear strength of LDPE, especially the treated zeolite showed the highest value. This result substantiated the advantages of zeolite in the LDPE film. Zeolite is an inorganic material and the chemical structure consisted of aluminasilicate. It is stronger than the LDPE which is an organic plastic material. As a result, the addition of zeolite increased the mechanical properties and tear strength.

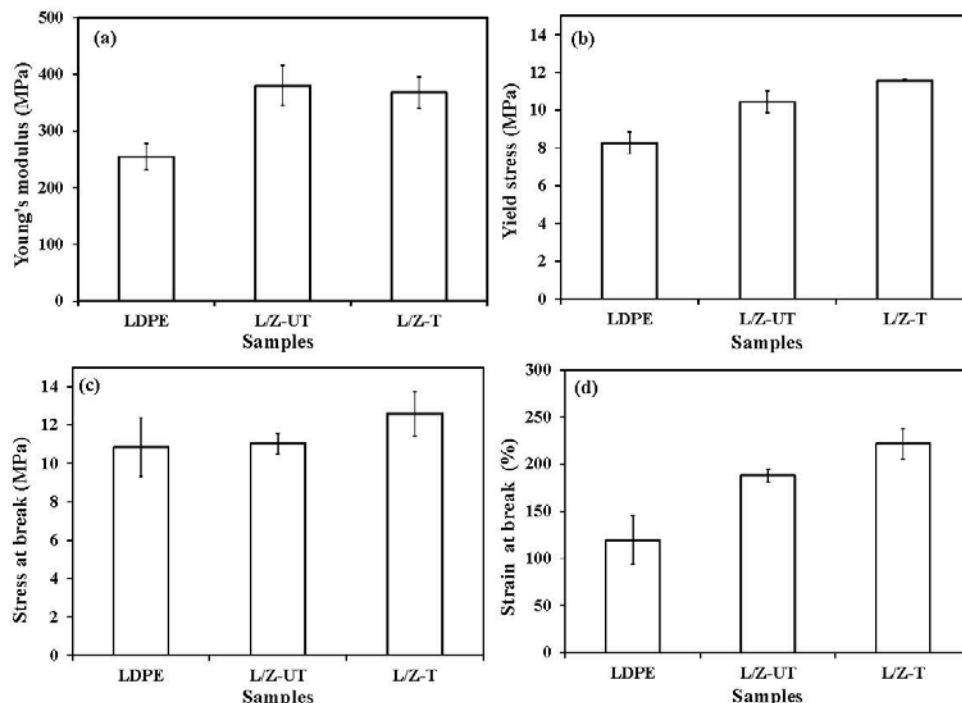


Figure 1. Tensile properties of LDPE films with and without zeolite: (a) Young's modulus, (b) yield stress, (c) stress at break, and (d) strain at break.

The testing results of gas permeation were listed in Table 2. These 4 gases are common gases found in the excrement as stated earlier. Their diameter was ranked in the following

order: CO_2 (0.33 nm) < O_2 (0.346 nm) < N_2 (0.364 nm) < CH_4 (0.38 nm).⁶⁻⁷ LDPE films with and without zeolite were a good barrier for CO_2 and CH_4 . CH_4 was relatively large molecule that might not be able to penetrate thru the LDPE film. Although CO_2 was the smallest molecule, it could not diffuse thru the LDPE film. This was because CO_2 favored the polar polymer⁸ whereas LDPE was non-polar. Penetration of O_2 and N_2 was observed in the LDPE film without zeolite and the gas permeability increased with increasing pressure. O_2 had a relatively small diameter and the higher pressure caused more mobility; therefore, the permeability increased with pressure. The higher permeability of O_2 than N_2 has been found in many polymers.⁹ N_2 is an inert gas and it is not sensitive to the pressure, thus the permeability did not increase with pressure as much as O_2 . The addition of zeolite inhibited the permeability of O_2 and N_2 . No gas permeation was observed in the LDPE film containing zeolite.

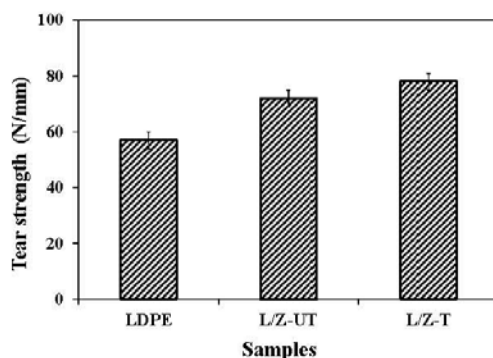


Figure 2. Tear strength of LDPE films with and without zeolite.

Table 2. Gas permeability of LDPE films with and without zeolite

Gas	Gas permeability ($\text{cc}\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{bar}$)											
	LDPE ^a				L/Z-UT				L/Z-T			
	1	3	5	8	1	3	5	8	1	3	5	8
CO_2	- ^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O_2	47200	52700	90800	113500	-	-	-	-	-	-	-	-
N_2	30060	34600	39600	46490	-	-	-	-	-	-	-	-
CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(^a at pressure of 1-8 bar; ^b no permeation)

Zeolite did not affect the crystallization behavior of LDPE as shown in Figure 3. The melting temperature (T_m) slightly increased and the crystallization temperature (T_c) slightly decreased after the addition of zeolite. The degree of crystallinity of LDPE, L/Z-UT and L/Z-T was 39.3, 37.0 and 41.0%, respectively. The heat of fusion (ΔH_f) of LDPE is 293 J/g.¹⁰ It seemed that their degree of crystallinity was in the range of $39\pm 2^\circ\text{C}$. This behavior was also found in the polypropylene containing zeolite.¹¹ The addition of zeolite did not change degree of crystallinity of LDPE; therefore, the presence of zeolite increased the gas absorption due to the microporous structure resulting in the lower gas permeation in the LDPE containing zeolite. TGA and DTG thermograms of LDPE films are represented in Figure 4. The degradation temperature of LDPE was slightly increased with the addition of zeolite.

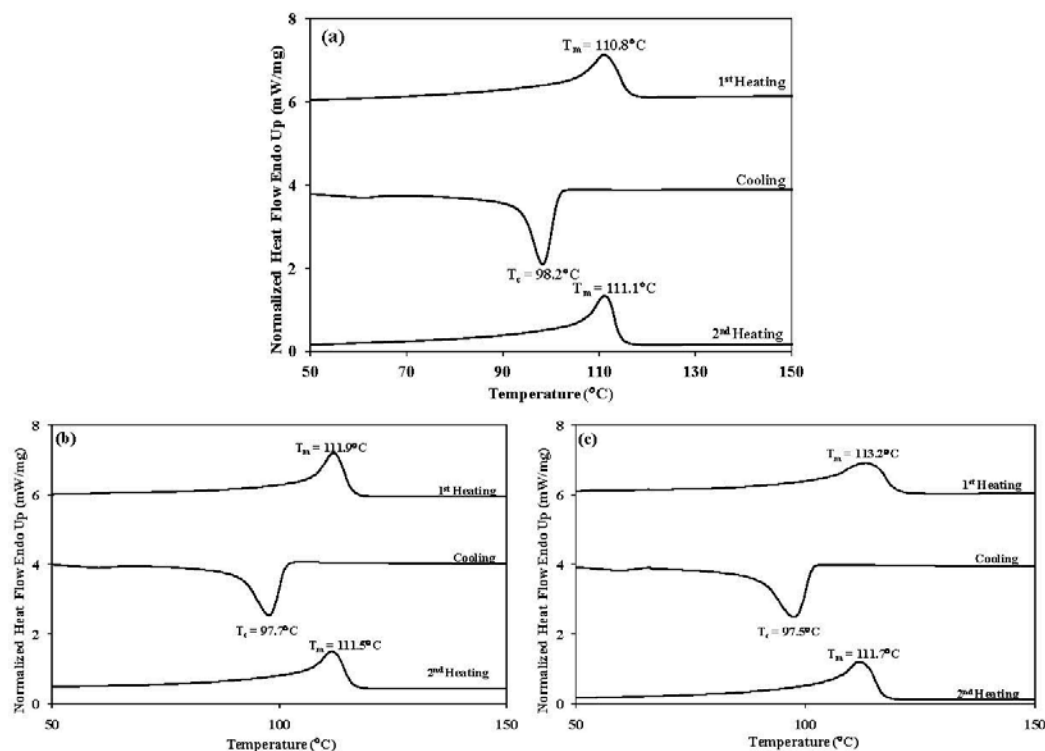


Figure 3. DSC thermograms: (a) LDPE film, (b) L/Z-UT film, and (c) L/Z-T film.

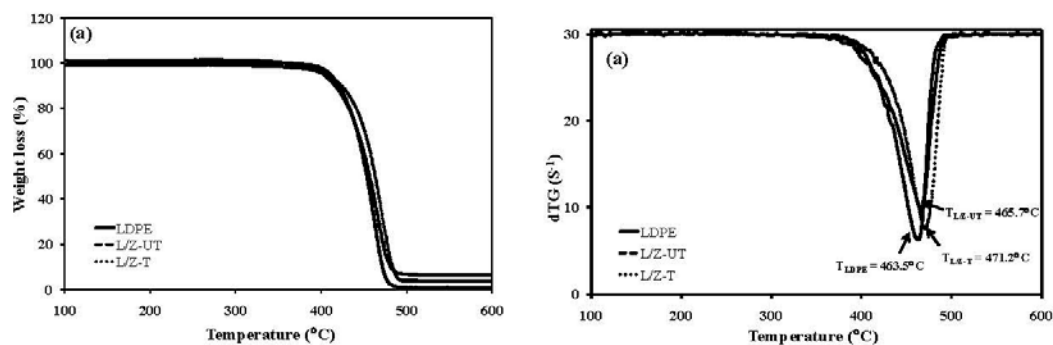


Figure 4. TGA and DTG thermograms of LDPE films with and without zeolite.

Conclusion: The addition of zeolite in the LDPE film increased the tensile properties and the tear strength and inhibited the gas permeability. The effect of surface treatment in zeolite was prominent in the mechanical properties, and a little effect was observed in the melting temperature and thermal degradation temperature. This preliminary study indicated that the common LDPE film could be applied to be a colostomy bag when it consisted of zeolite, particularly the surface treated one, and the conventional tubular blown film process that produces the plastic bag for food packaging could be employed.

References:

1. Wang K, Koo C, Chung I. *J Appl Polym Sci*. 2002;89:2131-2136.
2. Cavenati S, Grande C, Rodrigues A. *J Chem Eng Data*. 2004;49:1095-1101.

3. Rios R, Stragliotto F, Peixoto H, Torres A, Bastos-Neto M. *Braz J Chem Eng.* 2013;30:939-951.
4. Kim H, Biswas J, Choe S. *Polymers.* 2006;47:3981-3992.
5. Metin D, Tihminlioglu F, Balköse D, ÜlküS. *Compos Part A-Appl S.* 2004;35:23-32.
6. Yampolskii Y, Pinnau I, Freeman BD. *Materials Science of Membranes for Gas and Vapor Separation*, John Wiley & Sons, Ltd., New York. 2006, p.6.
7. Yoshioka T, Kanezashi M, Tsuru T. *AIChE J.* 2013;59:2179-2194.
8. Sadeghi M, Semsarzadeh M, Moadel H. *J Membrane Sci.* 2009;21-30.
9. Haraya K, Hwang S. *J Membrane. Sci.* 1992;7:13-27.
10. Cardinaud R, McNally T. *Eur Polym J.* 2013;49:1287-1297.
11. Pehlivan H, Balköse D, Ülkü S, Tihminlioglu F. *Compos Sci Technol.* 2005;65:2049-2058.

Acknowledgements: This work was financial supported by the Faculty of Medicine, Prince of Songkla University. Thanks to Membrane Science and Technology Research Center for gas permeation equipment and PQ Chemicals (Thailand) Co. Ltd. for zeolite.

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 40



The 40th CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THAILAND
(STT40)

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สู่วิถึพัฒนาอาเซียน

“Science and Technology towards ASEAN Development”

December 2-4, 2014

Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid

Proceedings

