ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

EFFECT OF WHEAT GLUTEN ON PROPERTIES OF LDPE/LLDPE/THERMOPLASTIC STARCH FILM

วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร

WILAIRAT TAWEEWONGSONTONR

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL 2010-SC-M-014-042

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

EFFECT OF WHEAT GLUTEN ON PROPERTIES OF LDPE/LLDPE/THERMOPLASTIC STARCH FILM

T117084

วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร

WILAIRAT TAWEEWONGSONTONR

เลขหมู่............
เลขทะเบียน....117084
วัน,เดือน,ปี....23 มี.ค. 2554

b....12332707
i.....................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-014-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF WHEAT GLUTEN ON PROPERTIES OF LDPE/LLDPE/ THERMOPLASTIC STARCH FILM

WILAIRAT TAWEEWONGSONTONR

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSITITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2010

KMITL-2010-SC-M-014-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Effect of wheat gluten on properties of LDPE/LLDPE/thermoplastic starch film)

นักศึกษา นางสาววิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร

รหัสประจำตัว 51067902

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	จุฑารัตน์
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์	[signature]
รศ.ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล	[signature]
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	[signature]

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2553 เวลา 9.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 502/1 ชั้น 5 อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

[signature]

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 21 เดือน ต.ค. พ.ศ. 53
ลงชื่อ [signature]

วันที่ ๑6 **เดือน** ต.ค. **พ.ศ.** 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
นักศึกษา	นางสาววิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร
รหัสประจำตัว	51067902
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) โดยใช้พอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) อัตราส่วน LDPE:LLDPE เท่ากับ 70:30 จากนั้นนำไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (แป้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรอล) ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 70 phr พบว่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้ง ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีสีขาวขุ่น สมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลงตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณแป้งสูงๆพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะมากขึ้นทำให้กระบวนการผลิตไม่ต่อเนื่อง จากการศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อกระบวนการผลิตและสมบัติของฟิล์มที่ปริมาณกลูเตน 3 , 4 , 5 , 6 และ 7 phr พบว่าเมื่อใส่กลูเตนทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งสูงๆมีความหนืดมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณกลูเตนมากเกินไป (7 phr) พบว่าไม่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) ที่ได้มีสีเหลืองของกลูเตน ผลการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน และทางสัณฐานวิทยาพบว่าแป้งกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีได้ดี และมีความเข้ากัน ส่วนกลูเตนกระจายตัวดี แต่มีความไม่เข้ากัน (Immiscible) ทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลง ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าการเติมกลูเตนไม่ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Tm) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (Tc) เปลี่ยนแปลง แต่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) และค่าพลังงานในการหลอมเหลวผลึก (ΔH_f) ลดลงเล็กน้อย รวมทั้งฟิล์มที่ได้มีการดูดซับน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติได้ดี โดยสังเกตเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่เดือนที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบจากความต่อเนื่องในกระบวนการผลิตและสมบัติเชิงกลที่ปริมาณกลูเตนต่างๆพบว่า ที่ปริมาณกลูเตน 5 phr มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายทางแสงโดยใช้เบนโซฟีโนนซึ่งพบว่า ฟิล์มที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่องฉายรังสียูวีมีสีเหลืองเข้มขึ้น และมีความเปราะมากขึ้น ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลง และมีค่าดัชนีคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าเบนโซฟีโนนช่วยให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางแสงได้ดีขึ้น ที่ปริมาณเบนโซฟีโนน 3 phr ฟิล์มเกิดการย่อยสลาย ทางแสงได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Effect of wheat gluten on properties of LDPE/LLDPE /TPS film
Student	Miss Wilairat Taweewongsontonr
Student ID.	51067902
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Somsak Woramongkolchai

Abstract

This research studied the effect of gluten on properties of LDPE/LLDPE/TPS film. Polyethylene blend between low density polyethylene(LDPE) and linear low density polyethylene (LLDPE) was prepared by a twin screw extruder. The results showed suitable weight ratio of LDPE:LLDPE was 70:30. Then LDPE/LLDPE was mixed with thermoplastic starch (the amount of starch was 70 phr). The results showed that the viscosity of LDPE/LLDPE/TPS increased when increasing the amount of starch content. LDPE/LLDPE/TPS film was white color. When the starch content was increased, the mechanical properties of the film decreased. After gluten was added into LDPE/LLDPE/TPS, it was found that the viscosity increased when increasing the amount of gluten content. However, the film excess with gluten (7 phr) could not be prepared by blown film extrusion. LDPE/LLDPE/TPS/WG film was yellow color. SEM micrographs and iodine test indicated the distribution of gluten in LDPE/LLDPE/TPS but they were immiscible. Mechanical properties of LDPE/LLDPE/TPS/WG film were decreased by the amount of gluten content. In addition, the thermal properties of LDPE/LLDPE/TPS/WG film observed by differential scanning calorimetry (DSC) and Thermo gravimetric analysis (TGA). The results showed no effect of gluten on the melt temperature (Tm) , initial crystallization temperature (Tc onset) and decomposed temperature (Td). The percent of crystallinity and ΔH_f were slightly decreased. Water absorption and water vapor permeability of LDPE/LLDPE/TPS/WG film were also decreased. The degradation results showed the color change (light yellow to black and red) of the film, particularly two months the color evidently change. From processing and properties the film with gluten 5 phr indicated the suitable for improved photo-degradation. When benzophenone was added for photo-degradation test, for UV radiation the color of film was changed from light

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

yellow to darker yellow. Mechanical properties was also decreased as the carbonyl index was increased. The results confirm photo-degradation of LDPE/LLDPE/TPS/WG film increased. The film with benzophenone 3 phr had good photo-degradation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณหลายฝ่ายที่ได้ให้การสนับสนุนตลอดจนให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะต่างๆ รวมทั้งความดูแลเอาใจใส่ในเรื่องการทำวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณบริษัท มัลติแบกซ์ จำกัด ที่ให้ทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติก LDPE และ LLDPE สารช่วยผสม(พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์) กลีเซอรอล และกลูเตน ตลอดจนเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผสม (เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่) เครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม และเครื่องทดสอบอเนกประสงค์สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ขอขอบคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ รศ.ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ คุณสุดใจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอนุเคราะห์การทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทุกคนที่มีส่วนในการช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอบคุณพะเยาว์ ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆเรื่อง และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้มาตลอดจนสำเร็จได้

ขอขอบคุณครอบครัว ทวีวงศ์สุนทร-ทองสง ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	V
กิตติกรรมประกาศ	VII
สารบัญ	VIII
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พลาสติกย่อยสลาย	6
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้	6
2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
2.1.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางแสง	13
2.2 พอลิเมอร์ผสม	22
2.2.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากัน	23
2.3 แป้ง	25
2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง	25
2.3.2 องค์ประกอบภายในแป้ง	26
2.3.3 แป้งมันสำปะหลัง	33
2.3.4 การย่อยสลายของแป้ง	37
2.4 พอลิเอทิลีน	40
2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีน	40
2.4.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	41
2.4.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 กลูเตน 45

2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกลูเตน 45

2.5.2 ไกลอะดิน 46

2.5.3 กลูเตนิน 46

2.5.4 กลูเตนข้าวสาลี 47

2.6 เบนโซฟีโนน 47

2.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม 48

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 49

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 55

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 57

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 หาอัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) 58

3.3.2 หาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) 60

3.3.3 ศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) 62

3.3.4 ศึกษาผลของเบนโซฟีโนนที่มีต่อสมบัติการย่อยสลายทางแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) 64

3.4 วิธีการทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์ม 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการหาอัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) 71

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ 72

4.1.2 สมบัติเชิงกล 75

4.2 ผลการหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) 77

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ 78

4.2.2 สมบัติเชิงกล 82

4.3 ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) 84

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพ 84

4.3.2 สัณฐานวิทยา 87

4.3.3 สมบัติทางความร้อน 91

4.3.4 สมบัติเชิงกล 93

4.3.5 การดูดซับน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำ 95

4.3.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน 97

4.4 ผลของเบนโซฟีโนนที่มีต่อสมบัติการย่อยสลายทางแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) 103

4.4.1 ลักษณะทางกายภาพ 103

4.4.2 สมบัติเชิงกล 108

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 115

เอกสารอ้างอิง 117

ภาคผนวก 122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างกันและพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์	14
ตารางที่ 2.2	ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของพอลิเมอร์และความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการเสียคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์	15
ตารางที่ 2.3	ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งชนิดต่างๆ	27
ตารางที่ 2.4	สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	27
ตารางที่ 2.5	สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส	29
ตารางที่ 2.6	ปริมาณอะไมโลสและอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ	33
ตารางที่ 2.7	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป	35
ตารางที่ 2.8	สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง	36
ตารางที่ 2.9	สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	42
ตารางที่ 2.10	สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)	44
ตารางที่ 2.11	สมบัติของเบนโซฟีโนน	48
ตารางที่ 3.1	สมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)	55
ตารางที่ 3.2	สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง	56
ตารางที่ 3.3	สมบัติของกลูเตนข้าวสาลี	56
ตารางที่ 3.4	สมบัติของกลีเซอรอล	56
ตารางที่ 3.5	สมบัติของ Fusabond® MB 226D	57
ตารางที่ 3.6	สมบัติของเบนโซฟีโนน	57
ตารางที่ 3.7	อัตราส่วนระหว่าง LDPE : LLDPE ในแต่ละสูตร	59
ตารางที่ 3.8	สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง LDPE : LLDPE	59
ตารางที่ 3.9	สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม LDPE/LLDPE	59
ตารางที่ 3.10	อัตราส่วนผสมของ LDPE/LLDPE/TPS แต่ละสูตร	61
ตารางที่ 3.11	สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการผสมพอลิเมอร์	61
ตารางที่ 3.12	สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของ LDPE/LLDPE/TPS ในแต่ละสูตร	61
ตารางที่ 3.13	อัตราส่วนผสมต่างๆของ LDPE/LLDPE/TPS/WG แต่ละสูตร	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 3.14	สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ที่ใช้ในกระบวนการผสม LDPE/LLDPE/TPS	63
ตารางที่ 3.15	สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของ LDPE/LLDPE/TPS/WG ในแต่ละสูตร	64
ตารางที่ 3.16	อัตราส่วนผสมต่างๆของ LDPE/LLDPE/TPS/WG/benzophenone แต่ละสูตร	65
ตารางที่ 3.17	สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการผสม LDPE/LLDPE/TPS/WG/benzophenone	65
ตารางที่ 3.18	สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของ LDPE/LLDPE/TPS/WG/benzophenone แต่ละสูตร	66
ตารางที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของเม็ดพลาสติกที่ได้	72
ตารางที่ 4.2	ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Flow Index)	73
ตารางที่ 4.3	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูป	74
ตารางที่ 4.4	ค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index) ของ LDPE/LLDPE/TPS	78
ตารางที่ 4.5	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่างๆ	78
ตารางที่ 4.6	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS	78
ตารางที่ 4.7	ค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index) ของ LDPE/LLDPE/TPS/WG	85
ตารางที่ 4.8	ลักษณะทางกายภาพของ LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่	85
ตารางที่ 4.9	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG	86
ตารางที่ 4.10	ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จากเทคนิค DSC	91
ตารางที่ 4.11	ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จากเทคนิค TGA	92
ตารางที่ 4.12	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable products) 1
รูปที่ 1.2 แสดงแนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลก 2
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆในการย่อยสลายทางชีวภาพ 9
รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพลาสติกชีวภาพ 9
รูปที่ 2.3 ความยาวคลื่นของแสงกับระดับพลังงาน 14
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของฟิวซาบอนด์ 25
รูปที่ 2.5 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน 26
รูปที่ 2.6 โครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดแป้งจากธัญชาติ 26
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส 28
รูปที่ 2.8 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส 29
รูปที่ 2.9 โครงสร้างอะไมโลเพกติน 30
รูปที่ 2.10 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน 30
รูปที่ 2.11 แบบจำลองการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ 32
รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง 33
รูปที่ 2.13 หัวมันสำปะหลังเป็นส่วนของรากและแป้งมันสำปะหลัง 34
รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน 40
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) 42
รูปที่ 2.16 แบบจำลองการอยู่ร่วมกันของไกลอะดินและกลูเตนินในกลูเตน 45
รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างของไกลอะดิน 46
รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างของกลูเตนิน 46
รูปที่ 2.19 ลักษณะทางกายภาพของกลูเตนข้าวสาลี (wheat gluten) 47
รูปที่ 2.20 โครงสร้างทางเคมีของเบนโซฟีโนน 47
รูปที่ 2.21 ลักษณะทางกายภาพของเบนโซฟีโนน 48
รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์ม 49
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง 66
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ 70
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของฟิล์ม LDPE/LLDPE ที่อัตราส่วน LDPE:LLDPE เท่ากับ 70:30 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 74

รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE ในอัตราส่วนต่างๆ 75

รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPEในอัตราส่วนต่างๆ 76

รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPEในอัตราส่วนต่างๆ 76

รูปที่ 4.5 การพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน 80

รูปที่ 4.6 สีของ (ก) ฟิล์ม LDPE/LLDPE , (ข) และ (ค) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS หลังการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน 81

รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของเม็ดแป้งในฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้ง 70 phr 81

รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้งต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) 82

รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้งต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) 82

รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้ง ต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) 83

รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม(ก) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS (ข) ฟิล์มLDPE/LLDPE/TPS/WG3 และ (ค) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 87

รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดแป้งและกลูเตนในฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG (ก) ลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (ข) และ(ค) รูปร่างและขนาดของกลูเตน (ง) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS (จ) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG3 และ (ฉ) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 88

รูปที่ 4.13 สีของ (ก) ฟิล์ม LDPE/LLDPE , (ข) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS , (ค) และ (ง) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG หลังการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน, (จ) และ (ฉ) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีนของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ตามลำดับ 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) 93

รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) 93

รูปที่ 4.16 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) 94

รูปที่ 4.17 น้ำหนักของฟิล์ม PE/TPS และฟิล์ม PE/TPS/gluten ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆ 95

รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์ม PE/TPS และPE/TPS/gluten ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆ 96

รูปที่ 4.19 ขั้นตอนการเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพของแป้ง 97

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยวิธีการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ (ก) LDPE/LLDPE/TPS, (ข) LDPE/LLDPE/TPS/WG3, (ค) LDPE/LLDPE/TPS/WG4, (ง) LDPE/LLDPE/TPS/WG 5 และ(จ) LDPE/LLDPE/TPS/WG6 (ฉ) ภาพการเกิดรอยดำ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และรอยขาดที่เกิดขึ้นกับฟิล์มที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยวิธีการฝังดินที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 103

รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ผ่านการฉายรังสียูวี (UV radiation) เป็นเวลา 16 สัปดาห์ โดยเก็บฟิล์มตัวอย่างทุกๆ 2 สัปดาห์ (ก)-(ฌ) 105

รูปที่ 4.22 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} ก่อนการฉายรังสียูวี จากเทคนิค FTIR 109

รูปที่ 4.23 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 1 เดือน จากเทคนิค FTIR 109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.24 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 2 เดือน จากเทคนิค FTIR 110

รูปที่ 4.25 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน จากเทคนิค FTIR 110

รูปที่ 4.26 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 4 เดือน จากเทคนิค FTIR 111

รูปที่ 4.27 ค่าดัชนีคาร์บอนิล (carbonyl index; CI) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ไม่เติมเบนโซฟีโนน (PE/TPS+WG5) และฟิล์มที่เติมเบนโซฟีโนน (PE/TPS+WG5/B1 และ PE/TPS+WG5/B3) 111

รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ในแนวเครื่องจักร (MD) 112

รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ในแนวขวางเครื่องจักร (TD) 112

รูปที่ 4.30 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ในแนวเครื่องจักร (MD) 113

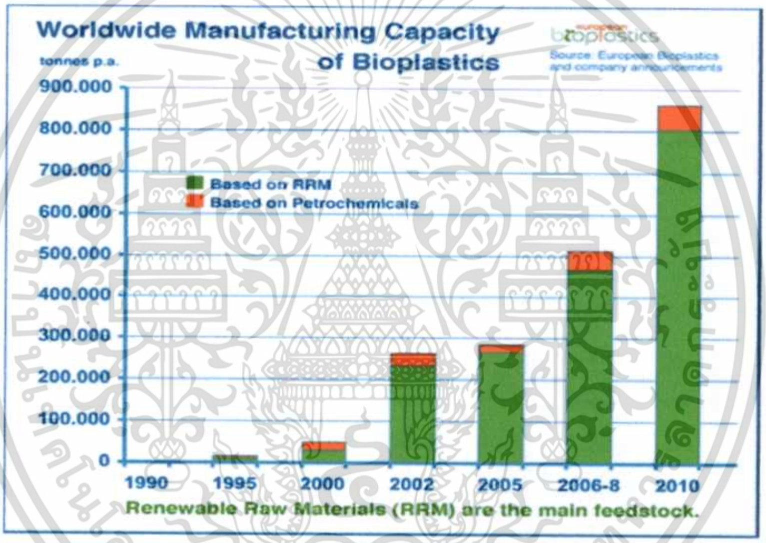
รูปที่ 4.31 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ในแนวขวางเครื่องจักร (TD) 113

รูปที่ 4.32 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ในแนวเครื่องจักร (MD) 114

รูปที่ 4.33 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ในแนวขวางเครื่องจักร (TD) 114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกชีวภาพ 40,000-50,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 20) ส่วนสหรัฐฯมีปริมาณความต้องการใช้ 70,000-80,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 16) และตลาดญี่ปุ่นมีปริมาณความต้องการใช้ 15,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 100) ดังแสดงในรูปที่1.2 [2] และนอกจากนี้ในปัจจุบันแต่ละประเทศต่างมีนโยบายส่งเสริมและรณรงค์เกี่ยวกับการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมมากมายซึ่งนโยบายเหล่านี้ยังส่งผลในแง่ทางเศรษฐกิจด้วยเช่น การลดภาษีสินค้าประเภทผลิตภัณฑ์ย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยมีความพร้อมในด้านวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ยังอยู่ในขั้นบุกเบิก และเริ่มสร้างเทคโนโลยีใหม่โดยให้ความสนใจและศึกษาวิจัยในเรื่องเทคโนโลยีการเตรียมวัตถุดิบทางการเกษตร รวมทั้งงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีทางชีวภาพ และเทคโนโลยีในการผลิตและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์[3]



รูปที่1.2 แสดงแนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลก[2]

การทำผลิตภัณฑ์ย่อยสลายทางชีวภาพนั้นที่นิยมมีสองวิธีคือ วิธีที่หนึ่งใช้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติในการผลิต (Biopolymer) เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid,PLA) ซึ่งผลิตจากแบคทีเรีย เป็นต้น วิธีนี้ค่อนข้างสะดวกในการผลิตเนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยาก แต่พอลิเมอร์ประเภทนี้มีราคาแพงจึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง วิธีที่สองเป็นการนำวัตถุดิบทดแทน (Reneweble) ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติผสมกับพอลิเมอร์ทั่วๆไปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถย่อยสลายได้ วัตถุดิบทดแทนที่นิยมนำมาผสมนั้นได้แก่ แป้งชนิดต่างๆ เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งและสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ นอกจากนี้แป้งยังมีราคาถูกและมีปริมาณมาก ในปัจจุบันนี้มีผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จำนวนมากที่มีแป้งผสมอยู่ แต่การเติมแป้งลงไปนั้นส่งผลต่อกระบวนการผลิตและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ด้วยเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งมีความเปราะและมีความยืดหยุ่นน้อย [3] ทำให้กระบวนการผลิตเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นจึงมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการลดปริมาณของแป้งลงแต่จะทำให้สมบัติการย่อยสลายลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นการใส่สารที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง กลูเตนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่ได้จากการแยกแป้งสาลี กลูเตนนั้นมีสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติก (Visco-elasticity) คือ ทั้งเหนียวหนืด (vicous) เหมือนของเหลวและยืดหยุ่น (elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกัน ทนต่อการซึมผ่านของน้ำและก๊าซ รวมทั้งกลูเตนเป็นวัตถุดิบที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกด้วยจึงเหมาะสมที่จะนำมาช่วยเพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่นให้แก่ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปริมาณแป้งสูงๆได้ นอกจากนี้การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางแสงยังเป็นช่วยให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น โดยเบนโซฟีโนนเป็นสารอินทรีย์ประเภทอะโรมาติกคีโตน (Aromatic ketones) เรียกว่า "สารไวต่อแสง" (photosensitizer) เมื่อเติมลงในพลาสติกจะทำให้พลาสติกสลายตัวด้วยแสง เบนโซฟีโนนจะเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อได้รับแสงยูวีส่งผลให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายได้

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยในตอนที่ 1 เป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ ตอนที่ 2 นำแป้งผสมกับกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารปรับสภาพพลาสติก (plasticizer) จะได้ของผสมที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch ;TPS) แล้วนำไปผสมกับเม็ดพอลิเอทิลีน (LDPE/LLDPE)ที่ได้จากตอนแรกด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้แป้งในอัตราส่วนที่สูงกว่าเม็ดพลาสติกจึงทำให้พบปัญหาในกระบวนการผสมและขึ้นรูปเนื่องจากความเปราะของแป้ง ดังนั้นในตอนที่ 3 จึงเป็นการปรับปรุงให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นโดยการเติมกลูเตนลงไปเพื่อช่วยลดความเปราะและเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้การผสมและขึ้นรูปฟิล์มทำได้ง่ายขึ้น รวมทั้งศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มที่ได้ และในตอนที่ 4 เป็นการปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มที่ได้จากตอนที่ 3 ด้วยเบนโซฟีโนน(Benzophenone)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์ม แล้วนำไปใช้ในการทำฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS)ได้
3. เพื่อศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS)
4. เพื่อหาปริมาณกลูเตนที่เหมาะสมสำหรับทำฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน(LDPE/LLDPE/TPS/WG)
5. เพื่อศึกษาผลของเบนโซฟีโนนซึ่งเป็นตัวเร่งการสลายตัวด้วยแสงที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยศึกษาจากสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้
2. ศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS)
3. ศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อกระบวนการเตรียมฟิล์ม สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการย่อยสลายในดิน และสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่เตรียมได้
4. ศึกษาผลของเบนโซฟีโนนที่มีต่อสมบัติการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ดีขึ้นเนื่องจากมีปริมาณแป้งผสมอยู่มากขึ้น
2. ช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเนื่องจากความเปราะของจากแป้งทำให้มีกระบวนการผลิตที่ดีขึ้น
3. ช่วยลดปัญหาในการกำจัดขยะประเภทพลาสติกเพราะสามารถฝังดินแล้วย่อยสลายได้ง่ายขึ้น
4. เป็นการลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากวัตถุดิบหลักที่ใช้มีปริมาณมากและมีราคาถูก
5. เป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับการทำผลิตภัณฑ์ย่อยสลายทางชีวภาพต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลาย [3-5]

จากปัญหาในการกำจัดขยะพลาสติก ปัญหาสิ่งแวดล้อม และการลดลงของปริมาณปิโตรเลียมสำรองในธรรมชาตินั้น สาเหตุเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยที่ผลักดันให้เกิดการศึกษาค้นคว้าเพื่อผลิตวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพเทียบเคียงกับพลาสติก แต่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ไม่ได้มาจากปิโตรเลียม กล่าวคือ ใช้วัตถุดิบทดแทน (renewable) ที่มีวงจรการผลิตค่อนข้างสั้น เช่น ผลิตผลทางการเกษตร เป็นต้น และสมบัติที่สำคัญคือ สามารถย่อยสลายได้ โดยเรียกพอลิเมอร์หรือพลาสติกเพื่อวัตถุประสงค์นี้ว่า พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หรือ พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) ซึ่งในปัจจุบันมีการผลิตได้หลายชนิด[4]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ[3]
ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้แบ่งประเภทของการย่อยสลายออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงใน พลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองขยะหรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการใช้โดยทั่วไป ในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อนหรือแสงยูวี และแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stablilizing Additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้น ในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชันซึ่งทำหน้าที่เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxpide, ROOH) เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดรายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่ง (Catalytic Hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่ง (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองเพื่อเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal Catalytic Degradation) โดยตัวเร่งจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ(Enzyme) เช่น Depolymerase Lipase Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-Enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline Metal) เบส และกรดที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายนั้นจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอ็นไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate Biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สมีเทน (CH_4) น้ำ (H_2O) เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[5]

คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ที่หลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานขึ้นไว้นั้นมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยดังนี้

ASTM D6400-99 : พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

DIN 103.2 : การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุ ลินทรีย์ ถ้าสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์โดยที่สภาพแวดล้อมและอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (composting)

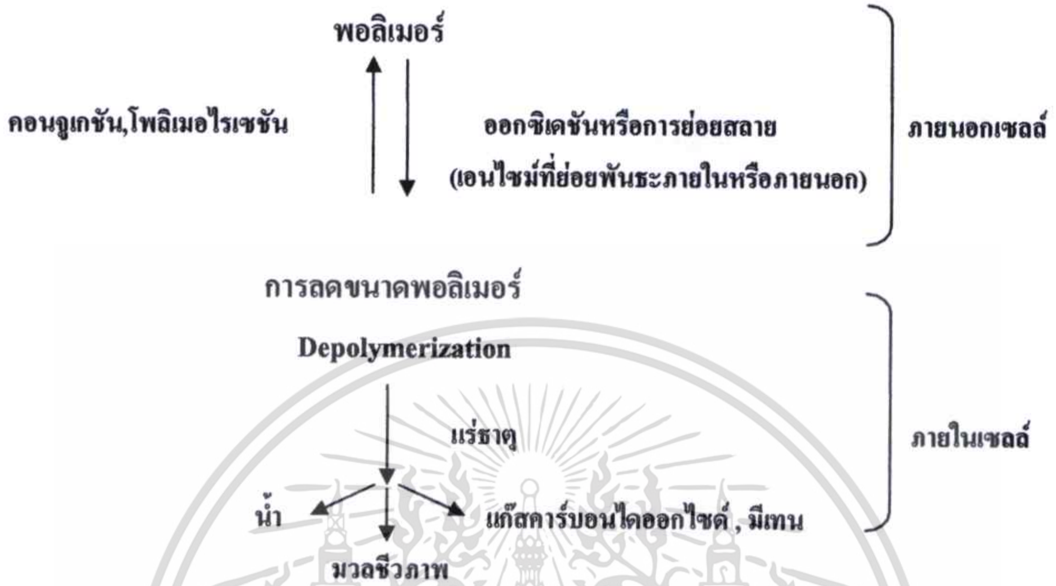
ISO 472:1998 : พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะเป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

BPS Japan(1994) : พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

CEN (1993) : วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) สามารถเขียนเป็นขั้นตอนต่างๆได้แสดงดังรูปที่ 2.1 หรือสามารถสรุปเป็นวัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพได้แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลายทางชีวภาพ [6]

รูปที่2.2 วัฏจักรของพลาสติกชีวภาพ [7]

ตัวอย่างพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Biodegradable starch-based polymers) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทพอลิเอสเทอร์ (Biodegradable polyester) เช่น PHA- polyhydroxyalkanoate, PHB-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

polyhydroxybutylate, PHH-polyhydroxyhexanoate, PHV-polyhydroxyvalerate, PLA-polylactic acid และ PCL-polycaprolactone

2.1.2.1 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้ [8]

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐานASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิดจะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60%โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอนินทรีย์ สารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานและมีสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่น OK compost ของประเทศเบลเยียม compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ PBS GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น

2.1.2.2 มาตรฐานในการตรวจสอบการย่อยสลาย [9]

ตามมาตรฐานASTM (American Society for Testing and Materials) ได้กำหนดวิธีการวิเคราะห์การย่อยสลาย 5 วิธี คือ

- วิธีการวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มี Municipal sewage sludge (D5209-91)
- วิธีการวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในขณะที่มี Municipal sewage sludge (D5210-91)
- วิธีการวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge (D5271-92)
- วิธีการวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบที่มีการควบคุมสภาวะการหมัก (D5338-93)
- วิธีการวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มีจุลินทรีย์ที่ได้รับการคัดเลือกมา (D5271-92)

สองวิธีแรกจะจำลองสภาพแวดล้อมของระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งก็คือสภาวะการหมักและระบบบำบัดน้ำเสีย ทำให้ทราบว่าการย่อยสลายควรใช้ระบบใด ส่วนวิธีสุดท้ายไม่ได้ทดลองกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบจริงแต่เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่ทราบชนิดแน่นอนที่พบทั่วไปตามสิ่งแวดล้อม

วิธีวัดผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่เหลือภายหลังการย่อยของมาตรฐาน ASTM คือการสกัดของแข็งที่เหลือจากการย่อยด้วยน้ำ (D5247-92) แล้วนำไปทดสอบความเป็นพิษตามมาตรฐาน ASTM อื่นๆต่อไปเช่น D4229, E1192, E1295 เป็นต้น

2.1.2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [9]

- **การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน**

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์และในสภาวะแก๊ส ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ spectrophotometer หรือใช้การคำนวณน้ำหนักแห้ง สมดุลมวลคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสภาวะแก๊ส

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายพอลิเมอร์(%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (C_d/C_i) \times 100$$

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

- **การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป**

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปจะทำให้ทราบถึงระดับการย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น

- **การวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์**

- การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

นำพอลิเมอร์ย่อยสลายที่ฝังดินไว้ขึ้นมาแล้วสังเกตจะพบว่ามีเส้นใยของเชื้อราเจริญเติบโตอยู่บนพอลิเมอร์ จากนั้นนำพอลิเมอร์มาล้างแล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) จะพบรูเล็กๆในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งที่อยู่ในพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ;SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก จะพบว่าพอลิเมอร์ย่อยสลายที่ฝังดินไว้มีสีเปลี่ยนไปและมีขนาดเล็กลงเนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนของแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดจุดสีดำและเส้นสีขาวบนชิ้นพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งถูกย่อยสลายแล้วเหลือส่วนของพอลิเอทิลีน

- **การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy)**

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วน infrared ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดสเปกตรัมซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวไม่ขึ้นกับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ในขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูที่พื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งที่รูนี้จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยสามารถตรวจวัดได้จากอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีด้วย

- **การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis)**

การวิเคราะห์ทางความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ Differential Thermal Analysis (DTA) และ Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melt Temperature; T_m) ส่วน Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไป

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลายส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยสลายได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายของแป้งในพอลิเมอร์โดยวิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

- **การวิเคราะห์การฝังดิน (Burial Test)**

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตร หลายๆตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างขึ้นมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง [10]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสงเป็นพลาสติกที่จะเกิดการแตกหักของสายโซ่หลักเมื่อได้รับพลังงานแสงหรือรังสีอัลตราไวโอเลต พลาสติกประเภทนี้ได้จากการสังเคราะห์โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่มีความว่องไวต่อแสงในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น หมู่คาร์บอนิลในรูปไวนิลคีโตน (Vinyl ketone) หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) เป็นต้น เข้าไปในโมเลกุล ดังนั้นเมื่อได้รับแสงแดดโมเลกุลของพลาสติกจะดูดกลืนพลังงานทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ส่งผลให้สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้นด้วย เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงและมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น [10]

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพด้วยแสงมี 3 วิธี

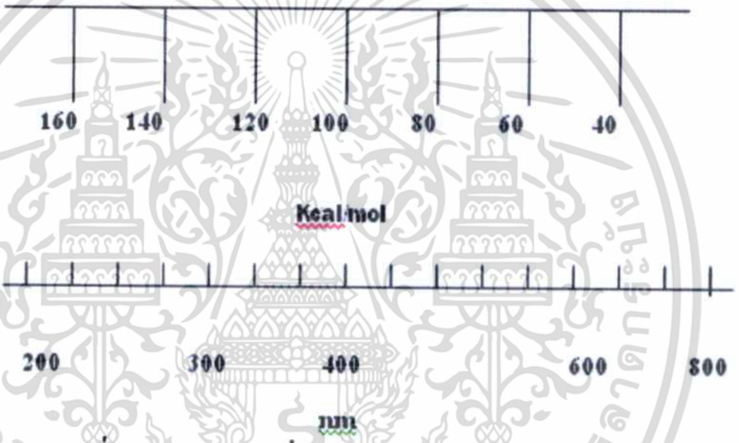
1. เตรียมฟิล์มจาก Poly-1-butene หรือมี Polyisobutylene oxide และ Polybutadiene เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสง โดยเพิ่มหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้าง แต่เป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง เมื่อหมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิด ปฏิกิริยา Norrish type I สลายให้อนุมูลอิสระ และ Norrish type II จะเกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ขาด
3. การเติมสารไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสงลงในพอลิเมอร์ ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิชัน (Transition metal) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเม็ดสี เป็นต้น ปัจจุบันมีการพัฒนาสารไวแสงจาก Dialkyldithiocarbamates ซึ่งเมื่อเติมลงไปในพลาสติกจะทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะสลายตัว พลาสติกระบบนี้มีประโยชน์มากโดยเฉพาะใช้ทำฟิล์มทางการเกษตร เช่น เบนโซฟีโนน (Benzophenone) ไทโอแซนโทน (Thioxamtone) ไอรอนไดอัลคิลไดไทโอคาร์บาเมท (Iron (III) dialkyldithio carbamate) เป็นต้น

2.1.3.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเลตของพอลิเมอร์ (Ultraviolet Stabilization) [11]

โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์จะมีพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ที่มีความเสถียรโดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตและพอลิเมอร์ ซึ่งการสังเคราะห์สารอินทรีย์ในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้จากการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์ของสารอินทรีย์ที่นำมาสังเคราะห์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมมีความจำเป็นที่จะศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโคเวลนต์ เพื่อใช้ปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาของพันธะโคเวลนต์บางประเภทยังมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์และการนำไปใช้เป็นเวลานานอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพันธะโคเวเลนต์ที่ได้รับพลังงานจนอิเล็กตรอนหลุดจากสถานะเสถียรไปอยู่ในสถานะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามีผลทำให้พันธะโคเวเลนต์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ในสภาวะแวดล้อมโดยทั่วไปพลังงานกระตุ้นได้จากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.3 ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ เมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์แพร่เข้ามายังบรรยากาศโลกจะถูก กรองผ่านโดยชั้นบรรยากาศโอโซนซึ่งจำกัดความยาวคลื่นแสงที่สั้นกว่า 290 นาโนเมตร (nm) ด้วยเหตุนี้การแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตจาก 290 ถึง 400 นาโนเมตร จึงเกิดขึ้นได้แค่ประมาณร้อยละ 5 ของการแผ่รังสีทั้งหมดมายังโลก ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า 400 นาโนเมตร จะเป็นแสงที่มองได้ด้วยตาเปล่าและความร้อนอินฟราเรด โดยการเสียคุณภาพของพลาสติกในสภาพบรรยากาศภายนอกเริ่มต้นพลังงานอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์ รวมถึงออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและในบางครั้งรวมถึงความชื้นในบรรยากาศและฝุ่นที่เกิดจากลมพัด เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ความยาวคลื่นของแสงกับระดับพลังงาน [11]

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างกันและพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์[11]

ความยาวคลื่น (nm)	พลังงาน		ชนิดของพันธะ	พลังงานพันธะ
	kcal	kJ.		
290	100	419	C-H	380-420
300	95	398	C-C	340-350
320	90	375	C-O	320-380
350	81	339	C-Cl	300-340
400	71	297	C-N	320-330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของพอลิเมอร์และความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการเสียคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์ [11]

พอลิเมอร์	ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (nm)	ความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด(nm)
พอลิเอทิลีน	< 150	300
พอลิพรอพิลีน	< 200	310
พอลิไวนิลคลอไรด์	< 210	310
พอลิเมทิลเมทธาอะคริเลท	< 240	290-315
พอลิไวนิลอะซีเตท	< 250	< 280
พอลิสไตรีน	< 260	318
พอลิคาร์บอเนต	260	295
พอลิเทิลีนเทอเรฟทาเลท	~ 290	290-320

การเสียคุณภาพของพลาสติกด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเริ่มต้นเมื่อพลาสติกดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรคาร์บอนประเภทอะลิฟาติกบริสุทธิ์ดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 220 นาโนเมตร พอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนดูดกลืนแสงได้ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร เป็นต้น แต่ตามความเป็นจริงแล้วพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งหมดดูดกลืนแสงได้ต่ำกว่า 300 นาโนเมตรเท่านั้นซึ่งจะไม่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตที่มาถึงยังโลก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่ต้องตั้งสมมติฐานว่าเกิดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างของพอลิเมอร์เองหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์และสิ่งเหล่านี้จะดูดกลืนแสงอัตราไวโอเลตในตอนเริ่มแรกและเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเสียสภาพ

โครงสร้างแบบวงแหวนอะโรมาติกอาจจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงถึง 350 นาโนเมต และจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงขึ้นเมื่อสร้างพันธะแบบคอนจูเกทกับหมู่ไม่อิ่มตัวอื่นๆ

ในทางทฤษฎีพบว่าการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มแรกของพอลิเมอร์นั้นส่วนใหญ่คล้ายกับการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตของหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการออกซิเดชันซึ่งจะดูดกลืนแสงได้ประมาณ 320 นาโนเมตร และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันจะดูดกลืนแสงมากกว่า 300 นาโนเมตร โดยจะอธิบายได้ว่าการเสียสภาพขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างในโมเลกุลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตยังขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งและสิ่งเจือปนอื่นๆซึ่งอาจเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างพอลิเมอร์และออกซิเจนได้ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในตอนเริ่มต้นได้อีกทางหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อระบบของพอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเลตจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานและออร์บิทอลที่สูงขึ้นทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสถานะพื้น (Ground state) จะถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิทอลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจึงมีผลทำให้ระดับพลังงานเกิดการสั่นสะเทือนสูงขึ้น และในขณะที่อิเล็กตรอนเกิดการหมุน (Spin electron) จะมีลักษณะเป็นคู่ในสถานะเดี่ยว (Single state) และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเปลี่ยนการหมุนได้ทำให้เกิดระบบการแลกเปลี่ยนข้าม (Inter-system crossing) ไปอยู่ในสถานะสาม (Triplet state) สถานะที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไม่เสถียรอิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากระดับพลังงานสูงกลับมายังสถานะพื้นที่ระดับพลังงานต่ำได้ด้วยเส้นทางการเคลื่อนที่ต่างๆกัน โดยเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการกายภาพทางแสง (Photophysical process) และถ้ากระบวนการที่เกิดมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรจนเกิดการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเคมีทางแสง (Photochemical process)

2.1.3.2 กระบวนการกายภาพทางแสง [11]

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นอาจจะกลับมายังสถานะพื้นได้ 3 แบบ ได้แก่ การถ่ายโอนพลังงาน (Energy transfer) การแผ่รังสี (Radiation) และความร้อน (Heat)

- การถ่ายโอนพลังงาน

พลังงานของการกระตุ้นอาจถูกถ่ายโอนไปภายในโมเลกุล (Intramolecular) หรือระหว่างโมเลกุล (Inter-molecular) ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน

- ภายในโมเลกุล

พลังงานแสงอัลตราไวโอเลตอาจถูกดูดกลืน โดยหมู่โครโมฟอร(Chromophoric group)ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเคลื่อนย้ายไปตามโมเลกุลไปยังจุดอื่นๆที่ไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้โดยตรง

- ระหว่างโมเลกุล

โดยปกติโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มต้น และถูกกระตุ้นโดยทันที จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง เมื่อได้รับปฏิกิริยาสูงสุด (Ultimate reaction) ในบางกรณีสิ่งเจือปนหรือสารปรับแต่งที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต เริ่มแรกจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้เองแต่สามารถกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการ 2.1 และ 2.2

$$\text{Impurity} \longrightarrow \text{Impurity*} \qquad (2.1)$$

$$\text{Impurity*} + \text{Polymer} \longrightarrow \text{Impurity} + \text{Polymer*} \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งจะเร่งการเสียสภาพของพอลิเมอร์โดยแสงอัลตราไวโอเลต เช่น เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างเดียว หรือการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับพอลิเมอร์เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตมากจนเกินไปจะทำให้เกิดความไม่เสถียรที่จะใช้กับงานภายนอกได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสถียรได้โดยการเติมสารระงับพลังงาน (Quencher) ลงไปเพื่อถ่ายโอนพลังงานที่มากเกินไปดังสมการ 2.3 และ 2.4 เทคนิคนี้มีประโยชน์ทำให้พอลิโอลิฟินสามารถนำไปใช้ในงานภายนอกได้โดยมีสารเสถียรภาพเป็นตัวช่วย

$$\text{Polymer} \xrightarrow{\text{UV}} \text{Polymer*} \qquad (2.3)$$

$$\text{Polymer*} + \text{Quencher} \longrightarrow \text{Polymer} + \text{Quencher*} \qquad (2.4)$$

- การแผ่รังสี

โดยทั่วไปกระบวนการกายภาพทางแสงจะสิ้นสุดลงเมื่อปล่อยพลังงานในสถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นสูงกลับไปยังระดับพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำโดยระดับพลังงานในสถานะเดี่ยวที่ถูกกระตุ้น (S_1) จะปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเพียง10^{-9} ถึง 10^{-6} วินาที เรียกว่าช่วงคลื่นแสงฟลูออเรสเซ็นต์ (Fluorescence) ส่วนในสถานะสามที่ถูกกระตุ้น (T_1) อาจจะปล่อยพลังงานกลับมาช้ากว่าซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 10^{-3} ถึง 20 วินาที ซึ่งเรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบรามาน (Raman vibrations) ของอิเล็กตรอนอะตอมหรือโมเลกุล

- ความร้อน

พลังงานที่ปล่อยออกมาจากสถานะกระตุ้นจะกระจายผ่านชั้นของระดับพลังงานซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจนกลายเป็นความร้อน ในบางกรณีพลังงานกระตุ้นที่ปล่อยออกมามีผลทำให้เกิดการจัดเรียงทางโครงสร้างของโมเลกุลใหม่เป็นแบบทาวโทเมอริค (Tautomeric) ที่สามารถผันกลับเป็นโครงสร้างรูปแบบเดิมก่อนการถูกระตุ้นได้ชั่วคราว แล้วจะกลายเป็นความร้อนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นในรูปของพลังงานสั่นสะเทือนและความร้อน ในบางครั้งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อน (Hot ground State reaction) ซึ่งจัดเป็นการเสียสภาพโดยความร้อนแบบธรรมดาที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเริ่มต้นด้วยการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต ปฏิกิริยาแบบนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางกายภาพของแสง และกระบวนการทางเคมีของแสงได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
117084
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 กระบวนการทางเคมีของแสง [11]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงอัลตราไวโอเลตทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารอินทรีย์มีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกแยกของพันธะโคเวเลนต์ นำไปสู่กระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวรจึงทำให้สารอินทรีย์เกิดการเสียคุณภาพ โดยทั่วไปพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสงอัลตราไวโอเลตได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจะทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลงซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ต่อกับพันธะโคเวเลนต์ได้ ตัวอย่างเช่น พันธะ C–H ที่ถูกกระตุ้นที่ตำแหน่งที่สามในสายโซ่พอลิเมอร์จะมีพลังงานน้อยกว่าถ้าเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์แทน เช่น พันธะ C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์อาจจะเพียงพอที่จะทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกออกจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มต้นที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.5 โดยจะส่งผลต่อกระบวนการทางเคมีของแสงที่จะนำไปสู่การเสียสภาพในที่สุด ซึ่งกระบวนการทางเคมีของแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกแยก (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small molecule) ความไม่อิ่มตัว (Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization) การเชื่อมโยงโครงร่างตาข่าย (Cross–linking) การออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรลิซิส (Photohydrolysis) เป็นต้น

$$R:R \rightleftharpoons \dot{R} + \dot{R} \qquad (2.5)$$

- การแตกแยก (Cleavage)

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการแตกแยกของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Hemolytic cleavage) โดยเริ่มจากโมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดใหญ่เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดเล็กกว่า 2 โมเลกุลดังสมการ 2.6

$$R_2 \rightleftharpoons 2R \qquad (2.6)$$

การเกิดโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolysis) ทำให้เกิดผลแบบแยกออกจากกัน (Cage effect) คืออนุมูลทั้งสองจะต้องมีการเคลื่อนที่มากพอที่จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันและกันอย่างถาวร ไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิและการแพร่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญ ได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 (Norrish type I + II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Depolymerization) หรือปฏิกิริยาการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์หลังการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมีผลทำให้เกิดกระบวนการแตกออก (Unzipping process) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชันของไวนิล ดังสมการ 2.10

$$P_n \longrightarrow M + P_{n-1} \longrightarrow nM \qquad (2.10)$$

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่เสถียรมากต้องการพลังงานสลายพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรน้อยแสดงว่าโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์และพลังงานในรูปแบบอื่นๆได้แก่พลังงานความร้อนจะมีผลต่อความเสถียรของพอลิเมอร์ เช่นที่อุณหภูมิต่ำจะมีผลทำให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพดีกว่าที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่ขาดอะตอมของเทอเชียริไฮโดรเจนจะมีอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นซึ่งจะเสถียรมากกว่าโครงสร้างโมเลกุลแบบอื่น ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์จะทำให้เกิดโมเลกุลเล็กๆ เช่น มีเทน (Methane) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide) สารโมเลกุลเล็กๆเหล่านี้อาจใช้ในการวิเคราะห์หากลไกของการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์ได้

บางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจไม่มีการสลายพันธะในโมเลกุลพอลิเมอร์ แต่เกิดปฏิกิริยาร่วมทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลเปลี่ยนเป็นโครงร่างตาข่ายจนปฏิกิริยาออกซิเดชันและเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวได้แก่ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Dehydrochlorination) ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรแฮโลเจน (Dehydrohalogenation) และปฏิกิริยาการกำจัดแฮโลเจน (Dehalogenation) ออกจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามการเกิดออกซิเดชันโดยแสงจะเกิดช้ามากและไม่สมบูรณ์ เว้นเสียแต่ว่าจะเกิดการเสียคุณภาพทางชีวภาพควบคู่กันไป

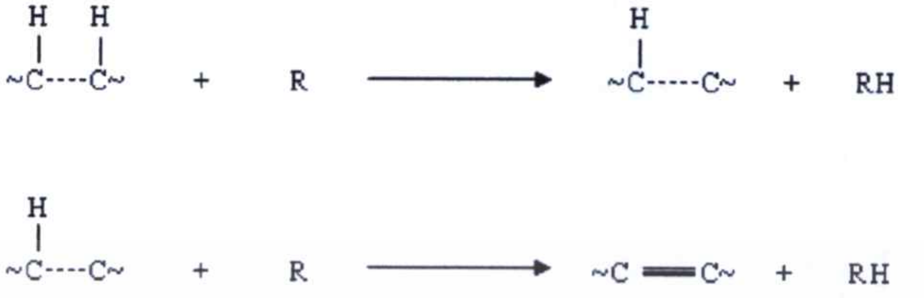
- ความไม่อิ่มตัว (Unsaturation)

ปฏิกิริยาการเสียคุณภาพทางแสงมากมายเกิดจากการเกิดพันธะคู่ของ C=C ที่ไม่อิ่มตัว ปฏิกิริยาที่ควรกล่าวถึงได้แก่ ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 ทำให้เกิดการแตกแยกโดยดิสพรอพอชันเนชันโดยตรงได้เป็นพันธะคู่ C=C ปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันระหว่างอนุมูลที่สลายตัว 2 ชนิดที่ทำให้เกิดการสิ้นสุดและเกิดความเสถียรผ่านทางปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันแบบเดียวกันกับที่พบเห็นกันโดยทั่วไปได้แก่ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชันของไวนิล ดังสมการ 2.11

$$RCH_2^{\bullet} + {}^{\bullet}CH_2\text{-}R' \longrightarrow R\text{-}CH_3 + CH_2 = CH\text{-}R' \qquad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้อะตอมในโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหดตัวส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดังสมการ 2.12



(2.12)

- การออกซิเดชัน (Oxidation)

ปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดมีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีและทางการทดลองโดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน แต่ในการทดลองสภาวะของอากาศปกติและแสงอัลตราไวโอเลตในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นในบรรยากาศที่มีออกซิเจนซึ่งกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงอัลตราไวโอเลตได้มีการศึกษาแล้วว่ามีการออกซิเดชันรวมอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันเป็นดังสมการ 2.15

$$
\begin{aligned}
R-H + O_2 &\longrightarrow R + HO_2 \\
R + O_2 &\longrightarrow RO_2 \\
RO_2 + R'H &\longrightarrow ROOH + R' \\
ROOH &\longrightarrow RO + OH \\
RO + R'H &\longrightarrow ROH + R' \\
HO + R'H &\longrightarrow HOH + R' \\
H + O_2 &\longrightarrow H_2O \\
HO_2 + RH &\longrightarrow H_2O_2 + R \\
2HO_2 &\longrightarrow O_2 + H_2O_2 \\
2H_2O_2 &\longrightarrow O_2 + 2H_2O_2 \\
O_3 &\longrightarrow O_2^* + O^*
\end{aligned}
\qquad (2.15)
$$

กระบวนการเสียคุณภาพอาจเกิดเป็นแบบผสมระหว่างแสงอัลตราไวโอเลตและการออกซิเดชันได้ด้วย (RH + O_2 + UV) โดยสามารถเกิดการกระตุ้นการถ่ายโอนของประจุ (Change Transfer Excitation) และการกระตุ้นที่เกิดการก่อกวนของออกซิเจนได้เป็นแบบเดี่ยว (Singlet) และแบบสาม (Triplet) และสามารถเกิดการออกซิเดชันด้วยแสงได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โฟโตไฮโดรลิซิส (Photohydrolysis)

พอลิเอสเทอร์และพอลิเอไมด์และโครงสร้างพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น พอลิยูริเทน (Polyuretane) เกิดการกระตุ้นด้วยแสง (Photoactivation) และความชื้นในบรรยากาศซึ่งเป็นผลมาจากกลไกของการไฮโดรลิซิส ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการแตกแยกได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจนได้เป็นพวกมอนอเมอร์และพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

เมื่อศึกษาโดยใช้แถบแสงอัลตราไวโอเลตและการแผ่รังสีทำให้ทราบว่ากลุ่มโครโมฟอร์จะดูดกลืนคลื่นแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมเฉพาะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์เท่านั้น อย่างไรก็ตามกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงในสภาพอากาศทั่วไป พบว่าในสภาพอากาศปกติจะมีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่กว้างโดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายแบบและซับซ้อนซึ่งทำให้วิเคราะห์และทำความเข้าใจได้ยากนอกจากการเกิดเสถียรภาพหรือไม่เกิดเสถียรภาพขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends) [18]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends) ซึ่งหมายถึง การนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม ทั้งนี้การผสมกันของพอลิเมอร์มีประโยชน์หลายประการ เช่น

- เพื่อทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้น แต่มีราคาถูกลง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานต่อแรงกระแทกได้สูงกับอิลาสโตเมอร์ (Elastomer) ซึ่งไม่เปราะแต่มีความแข็ง (Stiffness) ต่ำเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติรวมแตกต่างจากสมบัติพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาวะในการผสม สมบัติการไหล สัณฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ
- หลีกเลี่ยงความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผสมของอุตสาหกรรมการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น นำเศษพลาสติกหลายๆชนิดกลับมาขึ้นรูปใหม่

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [12] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) พอลิเมอร์ประเภทนี้เป็นการนำพอลิเมอร์ที่มีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกันมาผสมกันแล้วทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะแยกออกจากกันเป็น 2 วัฏภาคอย่างชัดเจน โดยที่พอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น พอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน เป็นต้น

3. พอลิเมอร์ที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้บางส่วน (Partially miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้บางส่วนเท่านั้น และส่วนที่เหลือจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งถ้าจะทำให้พอลิเมอร์รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมดต้องใช้ปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสมไม่เท่ากันโดยต้องมีพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งน้อยกว่า (ถ้าอัตราส่วนเท่ากันจะแยกออกเป็น 2 วัฏภาค) พอลิเมอร์อาจจะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างผิวของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งซึ่งจะช่วยให้วัฏ-ภาคมีแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีสมบัติดี

2.2.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility) [11]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวคือ เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (Homo generous single-phase) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ในทางการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุล
- ความเป็นผลึกมีค่าเป็นศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ในระดับโมเลกุล อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ไม่ละลาย (Immiscible)ในระดับโมเลกุลและแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (Strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้ จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการผสมให้เข้ากันได้ (Compatibility) นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์มีสัณฐานวิทยาที่มีความเสถียรมากขึ้นในขณะที่ผ่านกระบวนการแปรรูป และทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น คือ การเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

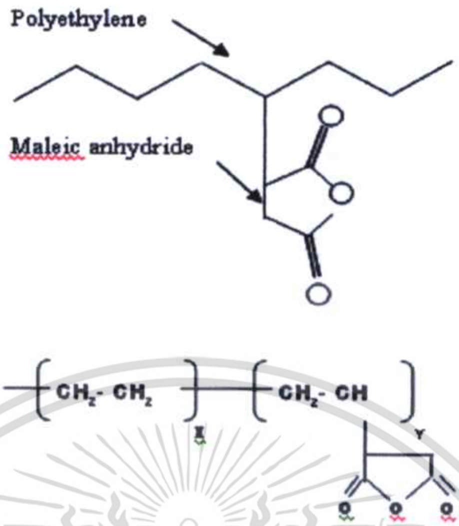
1. Non–reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบไม่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ ดังนั้น สารช่วยผสมที่ใช้จะต้องเป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีหลากหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (graft copolymer) พอลิเมอร์ร่วมแบบไดบล็อก (diblock copolymer) พอลิเมอร์ร่วมแบบไตรบล็อก (triblock copolymer) หรือ พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymer)
2. Reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงไปในพอลิเมอร์แบบเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีในขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดการต่อกิ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

สารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือต่อกิ่ง ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้มีการแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างพื้นผิวต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไปจะทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมก็จะต่ำเช่นเดียวกัน

สำหรับในการวิจัยนี้จะใช้ฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226 ดี (Fusabond MB 226D) เป็นสารช่วยผสมซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮดราย (MAPE : Maleic anhydride Grafted Polyethylene) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติต้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพเมื่อได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มสภาพความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีนทำให้สภาพความเป็นขั้ว (Hydrophilicity) เพิ่มขึ้น และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้นพบว่าแอนไฮดรายด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น [18]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของฟิวซาบอนด์ [18]

2.3 แป้ง [6]

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง [6]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์แต่จากสมบัติเฉพาะตัวของแป้งจึงได้นำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

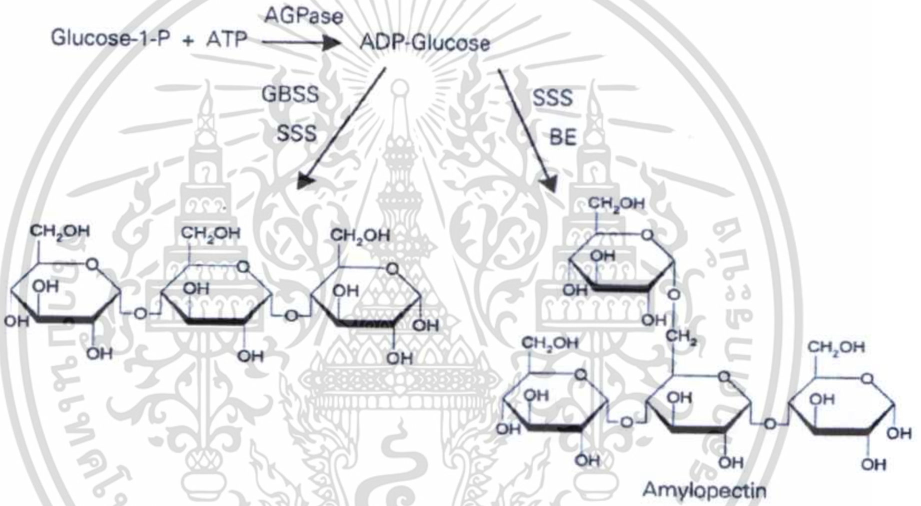
แป้งเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสและไม่ละลายในน้ำเย็น ถ้าส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นแป้งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆซึ่งโดยทั่วไปแป้งจะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบมากที่สุด รองลงมาคือ โปรตีน นอกจากนี้ยังมีไขมัน เถ้า วิตามิน สารสี เอนไซม์และความชื้น

แป้งในการผลิตหมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่น้อยมาก แต่เมื่อสิ่งเจือปนถูกขจัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่า แป้ง (Starch) เนื่องจากแป้งมีความบริสุทธิ์สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีเพื่อการทำปฏิกิริยามากมาย

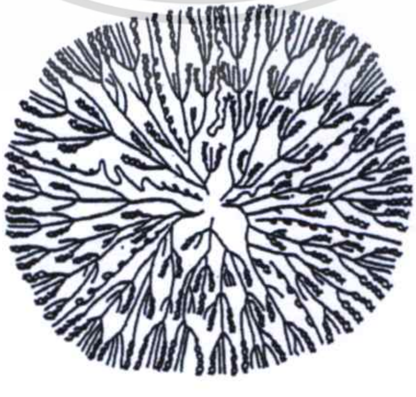
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกติน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดแป้งจากธัญชาติ ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 โดยแป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.3) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.4)



รูปที่2.5 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน [6]



รูปที่2.6 โครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเม็ดแป้งจากธัญชาติ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งชนิดต่างๆ[6]

ชนิดของแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	ปริมาณอะไมโลเพกติน (ร้อยละ)	ขนาดโมเลกุล(DP)เฉลี่ยของ	
			อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ข้าวเจ้าชนิด	17	83		
อินดิคา (Indica)			1,000	4,700
จาโปนิกา			1,100	12,800
(Japonica)	1	99	-	-
ข้าวเหนียว	28	72	930	8,200
ข้าวโพด	17	83	2,600	-
มันสำปะหลัง	21	79	4,900	9,800
มันฝรั่ง	28	72	1,300	4,800
ข้าวสาลี				

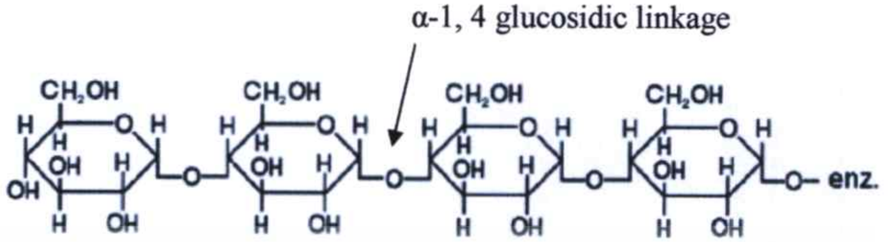
ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [6]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็น
พันธะที่จับ	α-1,4	α-1,4 และ α-1,6
ขนาด	200 – 2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 อะไมโลส (Amylase)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1, 4 glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส [13]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวเช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคู มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% Waxy starch ไม่มีอะไมโลสเลย และแป้งจาก Amylomaize มีอะไมโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 คาลตัน (Da) ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกันแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1000 ถึง 6000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดการคืนตัว (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส [6]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (%)	β–Amylase Limit (%)	DP เฉลี่ย	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
Indica	-	73	1000	4.0	250	49
Japonica	-	81	1100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4900	9.5	240	-

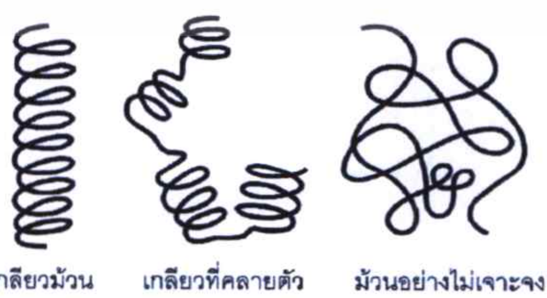
หมายเหตุ β– amylolysis = %การย่อยแป้งโดย β– amylase

DP = Degree of polymerization

NC = Number of chain

CL = Chain length

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียว (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือ ม้วนอิสระ (Random coil) ดังรูปที่ 2.8 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6500 ถึง 160000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลายสำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง

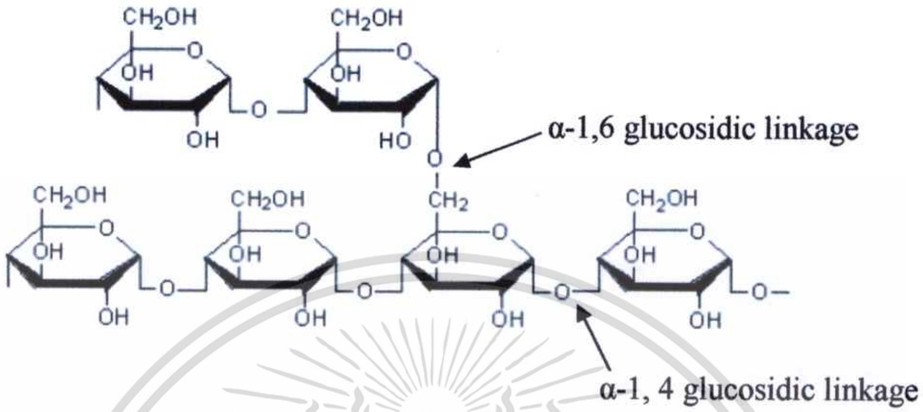


รูปที่ 2.8 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

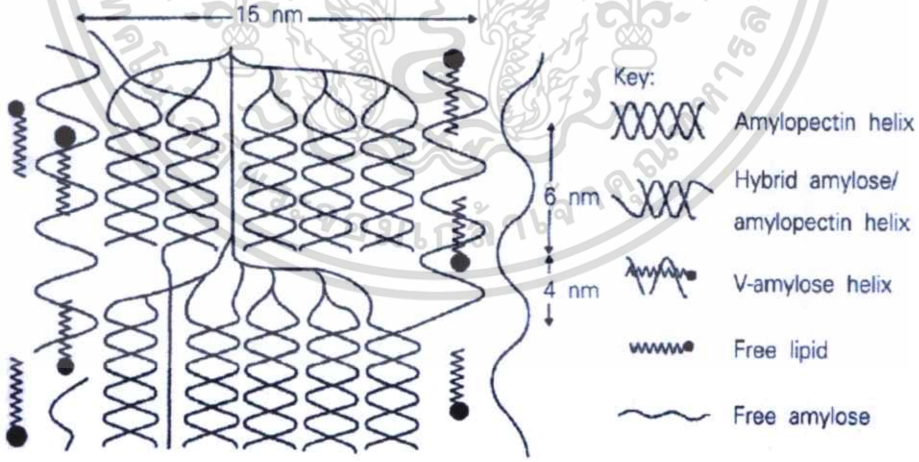
2.3.2.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างอะไมโลเพกติน [13]

ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองของโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและ Monoacyl lipid ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.10 โดยอะไมโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (Double helix) [6]



รูปที่ 2.10 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

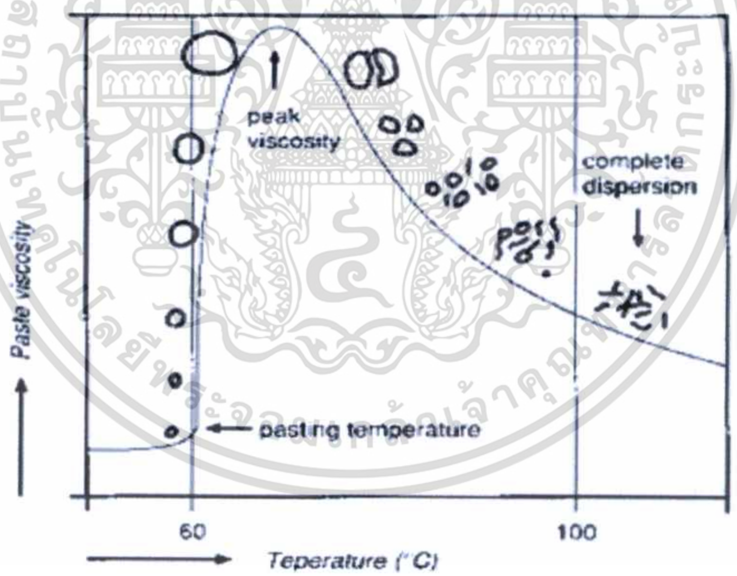
2.3.2.3 สมบัติของแป้งและการใช้ประโยชน์ [27]

เม็ดแป้งมีการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อยโดยทั่วไปจะพบว่าหากเติมน้ำลงในแป้งความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12-14 เป็นร้อยละ 30-50 แต่เมื่อนำไปต้มเม็ดแป้งจะค่อยๆดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นและพองตัวซึ่งเมื่อนำไปวัดความหนืดจะพบว่ามีความหนืดเพิ่มขึ้นจึงมีการทำแบบจำลองการพองตัวของเม็ดแป้งตามที่ได้จากการวัดความหนืดดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงถึงการพองตัวของเม็ดแป้งในสภาวะที่มีน้ำมาก โดยจะพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และขณะที่เม็ดแป้งพองตัว บางส่วนของแป้งที่มีขนาดเล็กจะละลายออกมา ช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงสุด เรียกว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิเฉพาะของแป้งแต่ละชนิด ซึ่งเป็นสมบัติของแป้งชนิดนั้นๆ ซึ่งมักจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอะไมโลส ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และหากต้มต่อไปเม็ดแป้งจะแตกและโมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอะไมโลเพกตินจะกระจัดกระจายออกมา และเมื่อปล่อยให้เย็นลงโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นร่างแหสามมิติสามารถอุ้มน้ำไว้ในร่างแหทำให้มีความหนืดมากขึ้นจนเกิดเป็นเจลเหนียวเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เกิดรีโทรเกรเดชัน (retrodradation) หรือการคืนตัว (set back) เมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีกการเรียงตัวจะเอื้อต่อการยึดเหนี่ยวกันมากขึ้นจะทำให้โครงสร้างของเจลแน่นขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระภายในเจลจะถูกขับออกมาเรียกว่า เกิดการขับน้ำ (synerasis) ซึ่งจะมีผลทำให้เจลมีลักษณะเหนียวขึ้นมีสีขุ่นเพิ่มขึ้นหากปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นอย่างช้าๆจะเกิดการตกตะกอนของสตาร์ช ดังรูปที่ 2.12 ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง อัตราในการคืนตัวสูงสุดเมื่อขนาดโมเลกุลของอะไมโลส (degree of polymerization) อยู่ในช่วง 100 ถึง 200 DP ถ้า มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่านี้หรือเล็กกว่านี้อัตราการคืนตัวจะลดลง อะไมโลเพกตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมากดังที่กล่าวมาแล้วจึงทำให้แป้งชนิดต่างๆ มีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน เช่น แป้งข้าวเจ้าจะคืนตัวและเกิดเจลได้ดีกว่าแป้งข้าวเหนียวจึงมีการนำแป้งข้าวเจ้ามาผลิตเป็นเจลเพื่อทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น การทำเส้นก๋วยเตี๋ยว ขนมจีน ข้าวเกรียบปากหม้อ และขนมชั้น เป็นต้น ซึ่งจะต้องมีการเลือกพันธุ์ข้าวให้ได้ระดับปริมาณอะไมโลสที่เหมาะสม แต่ข้าวบางพันธุ์มีปริมาณอะไมโลสในระดับเหมาะสมแต่ก็ได้เจลที่ไม่เหนียวนัก แผ่นก๋วยเตี๋ยวขาดง่ายน่าจะเนื่องจากขนาดโมเลกุลของอะมิโลสไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดเจล นอกจากนั้นยังพบว่าข้าวที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ๆหรือที่เรียกว่า ข้าวใหม่ เมื่อนำมาทำก๋วยเตี๋ยวหรือขนมจีนเส้นจะขาดง่ายสันนิษฐานว่าเนื่องจากเอ็นไซม์ที่ย่อยแป้งในแป้งยังมีศักยภาพในการกระตุ้นการย่อยแป้งได้ หากเก็บไว้เกิน 3 เดือน จนกลายเป็นข้าวเก่าจะใช้งานได้ดีขึ้น ส่วนแป้งข้าวเหนียวเมื่อต้มกับน้ำจนมีลักษณะคล้ายแป้งเปียกจะคงความข้นหนืดได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้จะอยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำจึงนิยมนำไปใช้ในการเป็นส่วนผสมของซอสข้นและครีมต่าง ๆ เนื่องจากมีความข้นหนืดคงที่

นอกจากการใช้แป้งในอุตสาหกรรมอาหารซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในรูปแป้งเพราะไม่ได้สกัดเอาโปรตีนและใยอาหารออกยังมีการใช้แป้งในผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีก เช่น การใช้แป้งจากข้าวทำเป็นเครื่องสำอางเช่น ทำแป้งแข็ง แป้งฝุ่น แป้งรองพื้น เป็นต้น รวมทั้งใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยผ้า เพื่อเคลือบเนื้อเส้นใยให้คงรูป เนื่องจากเม็ดแป้งมีขนาดเล็กสามารถแทรกหรือผสมกับส่วนอื่นๆได้ดี ในอุตสาหกรรมกระดาษมีการใช้แป้งเป็นฟิลม์เคลือบเส้นใยเซลลูโลสเพื่อให้เกิดความเรียบเนียน พบว่า แป้งจากข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่งใช้ได้ดีเพราะให้ความใสเป็นมันเงา และมีความยืดหยุ่นไม่เปราะแตกได้ง่าย อุตสาหกรรมกาว เช่น กาวซองจดหมาย แสตมป์ และกระดาษกาวก็นิยมใช้แป้ง รวมทั้งในอุตสาหกรรมยาก็นิยมใช้แป้งเพื่อผสมกับตัวยาเพราะสามารถตอกเป็นเม็ดยาได้ดีไม่เปราะแตกง่าย และยังดูดจับความชื้นไว้ไม่ให้ความชื้นไปทำตัวยาเสื่อมคุณภาพเป็นต้น และพบว่าปัจจุบันมีการนำแป้งมาใช้ทำเป็นฟิลม์บรรจุภัณฑ์หรือกล่องโฟมเพื่อให้เกิดการย่อยสลายได้ ลดจำนวนขยะพลาสติกหรือโฟมที่เสื่อมสลายได้ยากด้วยเพื่อลดมลพิษจากกล่องโฟมหรือถุงพลาสติกที่ย่อยสลายยาก[27]

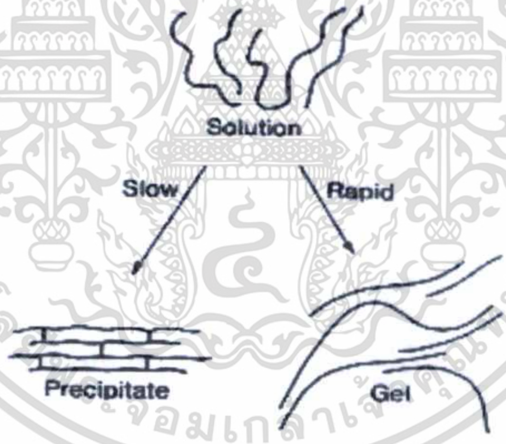


รูปที่ 2.11 แบบจำลองการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ[27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ปริมาณอะไมโลสและอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ [27]

ชนิดของแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน (องศาเซลเซียส)
ข้าวเหนียว	1	55 – 65
ข้าวเจ้า	18	61 – 78
ข้าวโพด	22	62 – 70
มันสำปะหลัง	16	52 – 64
ข้าวสาลี	26	53 – 65
ข้าวบาร์เลย์	22	56 – 62
มันฝรั่ง	23	58 – 66
ข้าวฟ่าง	25	69 – 75
ข้าวโอ๊ต	27	56 – 62



รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง[27]

2.3.3 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดแถบอเมริกากลางและอเมริกาใต้ มันสำปะหลังได้แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดไปสู่ทวีปอัฟริกาในราวปี คศ. ที่ 15 เรื่อยมาจนถึง คศ. ที่ 18 สำหรับในทวีปเอเซียนั้นพบว่ามีการแพร่กระจายของมันสำปะหลังเข้ามาสู่ประเทศอินเดียในราวต้น คศ. ที่ 18 จากนั้นราวปลาย คศ. ที่ 18 ก็ได้มีการแพร่กระจายเข้าสู่ประเทศฟิลิปปินส์และอินโดนีเซีย แล้วแพร่มายังประเทศมาเลเซียและไทยในที่สุด ทั้งนี้เป็นไปตามการขยายอาณานิคมของชนชาติยุโรป [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยผลิตมันสำปะหลังสดได้ทั้งหมด 16.94 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 8 ของผลผลิตมันสำปะหลังโลกและจัดเป็นผู้ผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นอันดับที่ 4 รองจากไนจีเรีย บราซิล และอินโดนีเซีย มันสำปะหลังสดร้อยละ 73.5 ถูกส่งออกในรูปของมันอัดเม็ด มันเส้น และแป้งดิบ และเป็นประเทศผู้ส่งออกผลิตผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.6 ล้านตันหรือคิดเป็นสัดส่วนตลาดร้อยละ 85.5 คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากกว่า 30000 ล้านบาท โดยส่งออกให้ประเทศจีน และ ไต้หวัน เป็นต้น ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มันสำปะหลังส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 26.5 นั้นใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบและนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน [14]

หัวมันสำปะหลังมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า Manihot utilisisma (ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Topioca starch, Cassava starch หรือ Monioc starch) เป็นส่วนของรากที่โตขึ้นสำหรับสะสมแป้ง หัวมันสำปะหลังสดมีน้ำอยู่ประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ และส่วนประกอบส่วนใหญ่คือแป้งหรือคาร์โบไฮเดรต ประมาณ 20-35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหัวมันสำปะหลังจึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานในอาหารของคน และสัตว์ แต่มีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยมากไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งของโปรตีนและ ไขมัน การนำหัวมันสำปะหลังไปใช้มักจะทำให้แห้ง เพื่อลดความชื้นลงเสียก่อน เช่น มันเส้น มันอัดเม็ดหรือสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากหัวมันสำปะหลัง [28]

รูปที่ 2.13 หัวมันสำปะหลังเป็นส่วนของราก (ซ้าย) และแป้งมันสำปะหลัง (ขวา) [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [15]

องค์ประกอบ	ปริมาณ(ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.00
ไขมัน	0.10
โปรตีน	0.10
เถ้า	0.20
ฟอสฟอรัส	0.01

2.3.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วย เม็ดแป้งตั้งแต่ 2 – 8 เม็ดมารวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 4 – 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกจะมีลักษณะเว้าเข้าข้าง ในบางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้งอีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอกัน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลส และอะไมโลเพกตินซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกตินและยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สองโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดีและพองตัวได้ง่าย[15]

สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญในการนำแป้งไปใช้ประโยชน์ เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้รับความร้อน พลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้งทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวขึ้นเนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสต่ำจึงมีการพองตัวที่ดี และมีค่าความสามารถในการละลายประมาณ 35 % ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ลักษณะการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างๆจะเป็นขั้นตอนเดียว (Single stage swelling) ในระหว่างที่ให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนกับเม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำและเม็ดแป้งเริ่มดูดซึมน้ำจากภายนอกนั้น เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวพร้อมๆกับที่เม็ดแป้งสูญเสียความสามารถในการเบี่ยงเบนแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ลักษณะเช่นนี้ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งเป็นแบบผันกลับไม่ได้ โดยปกติเม็ดแป้งที่พองตัวเมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแป้งเปียก (Paste) ที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลจะอยู่ในช่วง 58-70 องศาเซลเซียส แป้งเปียกที่เกิดขึ้นจะไม่คงตัวมากนักซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังจึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้งเพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียกทำให้เมื่อเย็นตัวลงความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจากเกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะไมโลสต่ำ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวต่ำและให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใสและไม่ทึบแสง [51]

ตารางที่ 2.8 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง [15]

สมบัติ	แป้งข้าวโพด	แป้งมันสำปะหลัง
ขนาด (μm)	3 - 26	4 – 35
เฉลี่ย	15	20
ไขมัน (%w/w)	0.60	0.10
โปรตีน (%w/w)	0.35	0.10
อะไมโลส (%)	28	17
Degree of polymerisation		
อะไมโลส	800	3000
อะไมโลเพกติน × 10^6	2	2
Pesting temp (°C)	75 – 80	65 – 70
Peak viscosity	600	1000
Swelling power ที่ 95 °C	24	71
Paste viscosity	ปานกลาง	สูง
Paste and film clarity	ทึบแสง	ใส
Retrogradration rate	สูง	ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การย่อยสลายของแป้ง [6,16,17]

- **การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by fungi)**

เชื้อราสามารถเข้าทำลายหรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวกซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุรศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหน้าและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Alfatoxin ที่ผลิตมาจาก Aspergillus flavus หรือรอยด่างดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยด่างดำซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบหรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆเช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหน้าของแก้วโดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อราสืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะจากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

- แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo-enzyme ซึ่งไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลคอซิดิกของอะไมโลเพกติน
- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลคอซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่นอนรีดิวซิงและสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 6 ไกลคอซิดิกของอะไมโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป้งและเดกซ์ทรินไปเป็นกลูโคส
- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลคอซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลายนอนรีดิวซิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatical hydrolysis)**

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยใช้ Direct steam injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยระดับถึงที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งดัดแปรที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ไซโคลเดกซ์ทริน เมื่อพิจารณาตามลักษณะของการทำงานของเอนไซม์จะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

- **เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo-enzyme)**

เบต้าอะไมเลส พบเอมไซม์นี้ในพืชชั้นสูง เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี และพบได้ในถั่วหรือมันฝรั่งหวานจัดเป็น Extracellular enzyme ในเชื้อจุลินทรีย์ เช่น Bacillus cereus เป็นต้น เบต้าอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะจากด้านนอกเข้ามาด้านใน โดยเริ่มจากปลายของอะไมเลสหรืออะไมโลเพคตินจากปลายด้านที่ไม่มีสมบัติรีดิวซ์ เอนไซม์จะตัดพันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิกของโมเลกุลกลูโคสเป็นคู่ๆ ไปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลมอลโตส ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50 กิโลดาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{++}) ร่วมทำกิจกรรม เอนไซม์ชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 125-150 กิโลดาลตัน มีความเสถียรภาพที่พีเอช 4-9 และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส

เอนไซม์กลูโคสอะไมเลส สามารถผลิตได้จากเชื้อราในสกุล Aspergillus, Penicllium และ Rhizopus ยีสต์และแบคทีเรีย กลูโคสอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดน้ำตาลกูลโคสที่จับกันด้วยพันธะ

- **เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo-enzyme)**

แอลฟาอะไมเลส จัดเป็น extracellular enzyme คือเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตและถูกขับออกมานอกเซลล์ พบได้ในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์หลายชนิด เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายในโมเลกุลแป้ง โดยจะย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิก ดังแสดงในรูปแต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา 1,6 ไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งกิ่งก้านของแป้งได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง คือ มอลโตส (Maltose) กลูโคส (Glucose) และลิมิตเดกซ์ตริน (Limit dextrin) เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50 กิโลดาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนร่วมทำกิจกรรม เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 5.5-9 และที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในทางอุตสาหกรรมจะใช้เอนไซม์ที่ได้จากเชื้อราและแบคทีเรีย เมื่อใช้แอลฟาอะไมเลสในการย่อยแป้งจะทำให้ความหนืดและความสามารถในการย้อมติดสีไอโอดีนลดลงอย่างรวดเร็วและทำให้ Reducing power เพิ่มขึ้นด้วย [17]

เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง เช่น ไอโซอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ย่อยจุดที่เป็นกิ่งก้านของไกลโคเจนและอะไมโลเพคตินได้ดี ไอโซอะไมเลสไม่ต้องการโคแฟคเตอร์ในการทำงาน สามารถดำเนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิจกรรมได้ดีในช่วงพีเอช 3-4 และมีความเสถียรที่อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถแยกได้จากพืชสัตว์ และจุลินทรีย์

พูลูลาเนส เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา 1,6 ไกลโคซิดิกของพูลูแลนและอะไมโลเพคติน แต่การทำกิจกรรมไม่สมบูรณ์เท่ากับการย่อยโดยไอโซอะไมเลส และทำกิจกรรมกับไกลเจนได้ยากสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2-3 หน่วย ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย เอนไซม์ชนิดนี้พบได้ในพืช สัตว์และแบคทีเรีย เอนไซม์มีความเสถียรที่พีเอช 4.5-5.5 และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [17]

2.3.5 การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ [6]

การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเลือกใช้แป้งให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด ซึ่งในการใช้งานในลักษณะดังกล่าวสามารถทำการแบ่งได้ออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

- **การใช้แป้งเป็นวัสดุโดยตรง**

การใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักในการผลิตเป็นวัสดุจะทำได้โดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยแป้งมีเป็นลักษณะแป้งผสมน้ำ (Dough) จะถูกอัดรีดผ่านรูทางออก

- **การใช้แป้งเป็นสารตัวเติม**

การใช้แป้งเป็นสารตัวเติมผสมลงไปในพลาสติกจะทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแป้งซึ่งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพลาสติก (ซึ่งอาจจะเกิดการย่อยสลายได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกนั้นๆ) โดยแป้งที่ใช้ผสมลงไปในที่นี้อาจจะมีได้ 2 ลักษณะคือ ในรูปของเม็ดแป้งและในรูปของเจล ในกรณีที่ใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิเอทิลีนชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายจะไม่เกิดการย่อยสลายโดยสมบูรณ์ จากนั้นส่วนที่เหลือจะถูกทำลายด้วยวิธีต่างๆเช่น แรงทางกล การย่อยสลายทางเคมี เป็นต้น

- **การใช้งานในรูปของเม็ดแป้ง**

การใช้งานในรูปของเม็ดแป้งจะทำการผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของแป้งในเนื้อพลาสติก จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งเกิดการแตกตัวออก โดยก่อนการทำการผสมแป้งจะถูกทำให้แห้งจนความชื้นที่เหลืออยู่น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีดหรือบางครั้งอาจมีการให้เม็ดแป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผิวของเม็ดแป้งเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างแป้งกับพลาสติก และนอกจากนี้อาจมีการเติมสารเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated ester) เช่น น้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Soybean) หรือน้ำมันข้าวโพด (Corn oil) ซึ่งเป็นสารเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Auto oxidant) ซึ่งจะช่วยทำให้การย่อยสลายของพลาสติกดีขึ้น โดยสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะ (Metal salt) ภายในดินจากสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะไปย่อยสลายสารพอลิเมอร์ให้เป็นสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่เล็กลง

- **การใช้งานในรูปของแป้งเจล**

การใช้งานในรูปของแป้งเจล (Gelatinized starch) จะต้องทำให้แป้งผ่านกระบวนการเจลาติไนท์ก่อนแล้วจึงนำแป้งเจลไปผสมกับพลาสติกและขึ้นรูปต่อไป จากการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิคาโปแลคโทนซึ่งเลือกใช้รูปแบบต่างกัน จากการตรวจสอบเมื่อปริมาณของเม็ดแป้งและแป้งเจลต่ำกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทั้งประเภทเม็ดแป้งและแป้งเจลจะไม่แตกต่างกันมากนัก

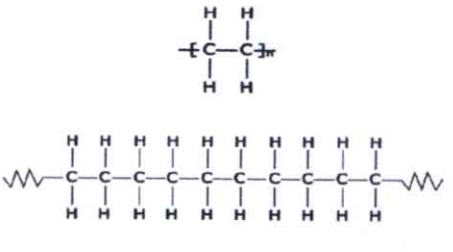
- **การใช้แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติก**

การเติมแป้งในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณมากมักทำให้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากความหนืดสูงและชิ้นงานที่ได้มีความเปราะ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวโดยการเติมน้ำลงไปผสมซึ่งในที่นี่น้ำจะทำหน้าที่เป็นคล้ายสารเพิ่มสภาพพลาสติกช่วยให้ความหนืดลดลงและแป้งกลายเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous) โดยเรียกแป้งที่อยู่ในรูปนี้ว่า แป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) ในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกจะทำการดัดแปรโครงสร้างทางกายภาพโดยทำให้เม็ดแป้งเกิดการแตกออกทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นผลึก จากนั้นจึงนำแป้งที่ได้มาผ่านเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิสูงจะได้เทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีความเป็นผลึกของแป้งเหลืออยู่เลย

2.4 พอลิเอทิลีน (Polyethylene ,PE)[19,20]

2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิโอเลฟินชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic hydrocarbon) สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนคือ



รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ(Low Density Polyethylene : LDPE) ค้นพบครั้งแรกโดยเฟาเซตต์และกิบสัน (Fawcett andGibson) ที่บริษัท ไอซีไอ (Imperial Chemical Industries Ltd. : ICI) ประเทศอังกฤษ โดยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ความดันสูง และได้ค้นพบพอลิเอทิลีนโดยบังเอิญจากปฏิกิริยาของเอทิลีนกับเบนซาลดีไฮด์ ปัจจุบันมีการผลิตพอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับการใช้งาน มีทั้ง LLDPE (Linear Low Density Polyethylene) MDPE (Medium Density Polyethylene) HDPE (High Density Polyethylene) และ UMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene)

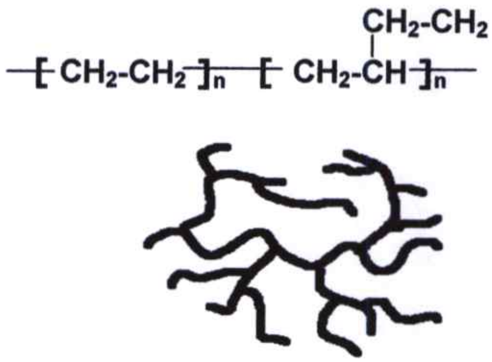
พอลิเอทิลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g) ประมาณ -130 ถึง 60 องศาเซลเซียส ทำให้พอลิเอทิลีนมีลักษณะทั้งยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature: T_m) ของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ 108 ถึง 133 องศาเซลเซียส

2.4.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่นำมาใช้ในการค้า เริ่มผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอังกฤษ โดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) โดยมีกระบวนการผลิตและลักษณะ โดยทั่วไปของ LDPE ดังนี้ คือ

- เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระ โดยมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก ซึ่งโซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก Intramolecular backbiting
- ความดันที่ใช้ในการผลิตสูงมาก ประมาณ 1,000 – 3,000 บรรยากาศ (15,000 – 45,000 psi)
- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือ 200 – 400°C
- มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง และมีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก
- โมเลกุลของ LDPE มีสายโซ่หลักเป็นคาร์บอนที่มีหมู่ข้างเคียงของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับสายโซ่หลักอย่างสุ่มๆ มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.15 และมีสมบัติดังตารางที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [23]

ตารางที่ 2.9 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [19]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0-120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0-800.0
ความแข็งแรงกระแทก	$J.m^{-1}$	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

2.4.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีดังต่อไปนี้

1. มีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
2. มีความเป็นผลึกต่ำ ประมาณ 50 – 70%
3. มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt Flow Index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10 นาที
4. มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
5. มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
6. ฟิล์มที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High Gloss)และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low Haze)
7. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good Dielectric property)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะว่าราคาไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมาก และทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้อย่างดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ

2.4.2.2 การใช้งานของ LDPE แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

กลุ่มของ Homopolymer ได้แก่ เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั่วไป แบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก เช่น ถุงน้ำแข็ง ถุงบรรจุอาหารแช่เย็น ใช้ทำวัสดุกันกระแทกได้แก่ Air Bubble Sheet นอกจากนี้ แผ่นฟิล์มยังใช้งานในการรัดสินค้าให้อยู่ในสภาพทรงตัว เช่น ฟิล์มรัดกล่อง ฟิล์มรัดสินค้าบนไม้พาเลทเพื่อการขนส่ง ไปจนกระทั่งแผ่นฟิล์มขนาดใหญ่มากๆ ใช้ในด้านการเกษตรกรรม เช่น แผ่นฟิล์มรองพื้นบ่อน้ำเพื่อการเก็บกักน้ำ เรือนเพาะชำ
2. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่มและเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง
3. งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นิ่มเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถังชามอ่าง
4. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์มบนผิวแผ่นอลูมิเนียมฟอยส์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ซึ่งต้องการสมบัติการป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ
5. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลวดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของตะกร้า รถจักรยาน ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

กลุ่มของ Copolymer มีสมบัติพิเศษกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดธรรมดา คือ มีความอ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ผลิตหนังเทียมแทน PVC ชนิดอ่อน พื้นรองเท้า และ รองเท้ากีฬา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (Linear low density polyethylene ; LLDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรงเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีโซ่กิ่ง แต่ต่างจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเนื่องจากมีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่าและลักษณะของกิ่งจะสั้น สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วมระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์กับสายโซ่ยาวๆ ของโอลิฟิน เช่น บิวทีน (butene) เฮกซีน (hexene) และออกทีน (octene) โดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรงที่จะได้มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [31] สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรงจะอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE แต่จะนิ่มและเหนียวมากกว่า LDPE และ HDPE ดังตารางที่ 2.10 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรงได้รับการแปรรูปเป็นฟิล์มถึง 65% เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการหีบห่อ เช่น ใช้ทำเป็นฟิล์มหดรัด (shrink film) , ฟิล์มยืดรัดรูป (streth film) ถุงบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักสูง ถุงบรรจุเสื้อผ้า , ถุงบรรจุอาหารแช่แข็ง การแปรรูปนอกจากในรูปของฟิล์มแล้วก็ยังมีการนำ LLDPE มาทำท่อน้ำ , เคลือบสายไฟ และสายเคเบิ้ล และของเด็กเล่นอีกด้วย [32]

ตารางที่ 2.10 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) [31]

สมบัติ	หน่วย	LLDPE
ความหนาแน่น	g/cm^3	0.92
ความแข็งแรงดึง	MPa	20
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	500
ค่ามอดุลัส	GPa	0.35
ความแข็งแรงกระแทก	kJ/m	1.06
อุณหภูมิการหลอมเหลว	^0C	120 - 160

ในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป (LD 1905F) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (LLDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูป คือ มีความลื่น ไม่ติดสกรู (Slip and Antiblocking) มีความสามารถในการผลิตสูง มีความใส และสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารได้ โดยในงานวิจัยนี้จะหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ที่สามารถนำไปผลิตฟิล์มที่มีปริมาณแป้งสูงๆได้

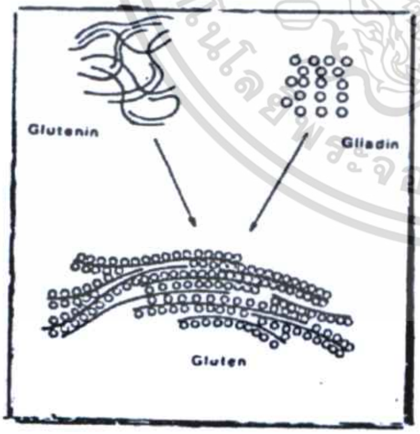
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

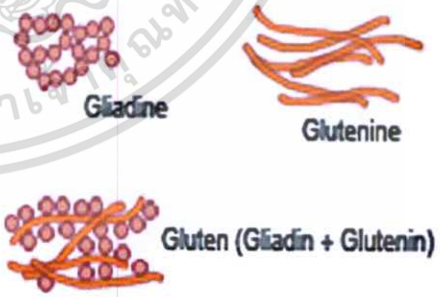
2.5 กลูเตน [24]

2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกลูเตน

กลูเตน (gluten) เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งได้จากการสกัดออกจากเม็ดแป้ง กลูเตนจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายแก้ว ซึ่งค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) จะขึ้นอยู่กับปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ด้วย กลูเตนเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติน่าสนใจอย่างมากโดยเฉพาะสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติก (Visco-elasticity) คือ ทั้งเหนียวหนืด (vicous) เหมือนของเหลว และยืดหยุ่น (elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกัน ทนต่อการซึมผ่านของน้ำและก๊าซ ส่วนสมบัติเชิงกลจะสัมพันธ์กับการกระจายตัวและการรวมตัวกันของกลูเตนซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในอุณหภูมิที่ใช้ซึ่งจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) แต่ต้องไม่สูงมากเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของโปรตีน โดยมักจะใช้อุณหภูมิในการผลิตระหว่าง 80 และ 130 องศาเซลเซียส [24]

กลูเตนประกอบด้วย ไกลอะดิน(gliadin) ซึ่งเป็นไกลโคโปรตีน และกลูเตนิน(glutenin)ในอัตราส่วนประมาณ 65/45 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยสารเหล่านี้อยู่ติดกันกับแป้งในเอนโดสเปิร์มของเมล็ด ยอดข้าวสาลี, ข้าวไรและบาร์เลย์ (โปรตีนที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวสาลีนั้นประมาณ 80% ประกอบด้วยไกลอะดินและกลูเตนิน) โปรตีนทั้งสองชนิดนี้จะทำหน้าที่ต่างกัน โดยไกลอะดินจะช่วยในด้านความหนืด ในขณะที่กลูเตนินจะช่วยในด้านสมบัติความยืดหยุ่น โปรตีนทั้งสองชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำลงไปในแป้ง (ใช้น้ำร้อยละ 60-65 ของปริมาณแป้ง) โปรตีนเหล่านี้จะดูดน้ำไว้จำนวนมาก เมื่อนวดสักพักจะได้เส้นใยกลูเตน (gluten) ออกมา [25]



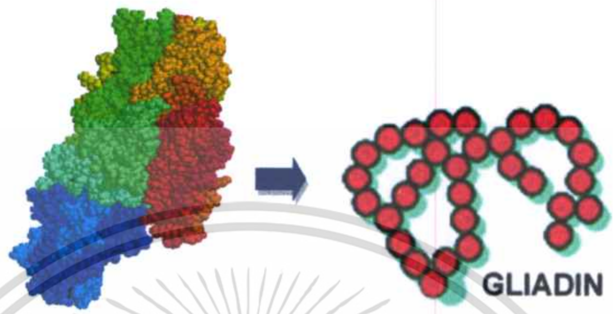


รูปที่ 2.16 แบบจำลองการอยู่ร่วมกันของไกลอะดินและกลูเตนินในกลูเตน [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ไกลอะดิน (gliadin)

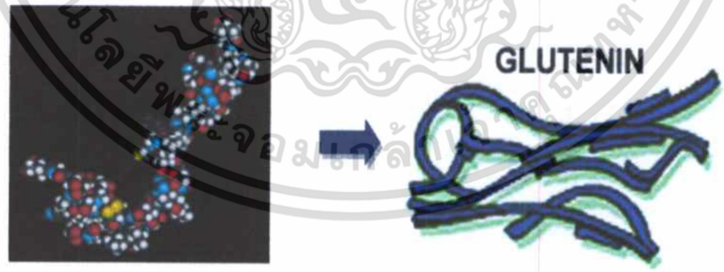
ไกลอะดินเป็นโปรตีนที่มีขนาดเล็กและโครงสร้างเป็นแบบก้อนกลมดังแสดงในรูปที่ 2.17 หากแบ่งชนิดของโปรตีนตามหน้าที่ ไกลอะดินจัดเป็นโปรตีนสะสมจึงทำให้ขนาดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยอยู่ระหว่าง 11.4-78.1 กิโลดาลตัน (kDa) และมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 36 กิโลดาลตัน (kDa) [34]



รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างของไกลอะดิน [34]

2.5.3 กลูเตนิน (Glutenin)

กลูเตนินเป็นโปรตีนที่มีขนาดใหญ่และโครงสร้างเป็นแบบเส้นใยยาวดังแสดงในรูปที่ 2.18 กลูเตนินจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้กลูเตนมีสมบัติความยืดหยุ่น (elasticity) ขนาดของกลูเตนินมีหลาก หลายตั้งแต่ 40 ถึง หลายล้าน กิโลดาลตัน (kDa) เนื่องจากกลูเตนินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าไกล อะดินดังนั้นจึงไม่สามารถระบุลำดับของกรดอะมิโนได้



รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างของกลูเตนิน [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 กลูเตนข้าวสาลี (Wheat gluten)

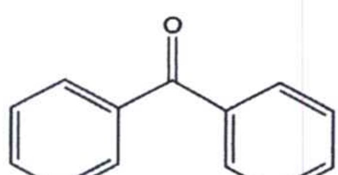
กลูเตนชนิดนี้ได้จากการแยกโปรตีนออกจากแป้งสาลี กลูเตนที่ได้มีสีเหลืองอ่อนและมีกลิ่นหอมคล้ายขนมปังดังแสดงในรูปที่ 2.19 มีสมบัติไม่ละลายน้ำและจับตัวเป็นก้อน

รูปที่ 2.19 ลักษณะทางกายภาพของกลูเตนข้าวสาลี (wheat gluten) [35]

กลูเตนถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากมายเช่น ทำอาหารประเภทขนมปัง ใช้ทำเป็นสารเคลือบกระดาษ ทำสี เป็นต้น และเนื่องจากกลูเตนสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้จึงมีการนำกลูเตนมาใช้ในงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์มากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้นำสมบัติเด่นของกลูเตนคือ มีความยืดหยุ่นสูง มาช่วยในกระบวนการผลิตฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากการใส่แป้งในปริมาณสูงนั้นจะทำให้มีความเปราะเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อกระบวนการผลิตดังนั้นการเติมกลูเตนจึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและช่วยลดปัญหาในการผลิตได้

2.6 เบนโซฟีโนน

เบนโซฟีโนนเป็นสารอินทรีย์ประเภทอะโรมาติกคีโตน (Aromatic ketones) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_5)_2CO$ หรือ Ph_2CO เบนโซฟีโนนสังเคราะห์ได้โดยใช้สารตั้งต้นคือ เบนซีน (Benzene) กับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือเตรียมจากปฏิกิริยา (Friedel-Crafts acylation) ระหว่างเบนซีนกับเบนโซอิลคลอไรด์ (Benzoyl chloride) ใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โครงสร้างทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเบนโซฟีโนนแสดงดังรูปที่ 2.20 , 2.21 และ ตารางที่ 2.11



รูปที่ 2.20 โครงสร้างทางเคมีของเบนโซฟีโนน [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 ลักษณะทางกายภาพของเบนโซฟีโนน [38]

ตารางที่ 2.11 สมบัติของเบนโซฟีโนน [37]

สมบัติ	หน่วย	เบนโซฟีโนน
ความหนาแน่น	g/cm^3	1.11
น้ำหนักโมเลกุล	g/mol	182.217
จุดหลอมเหลว	^0C	47.9
จุดเดือด	^0C	305.4
การละลายน้ำ	-	ไม่ละลายน้ำ
การละลายในตัวทำละลายอินทรีย์	-	ละลายในเบนซีน, เอทานอล , พรอพิลีนไกลคอล
ลักษณะทางกายภาพ	-	ของแข็งสีขาว

เบนโซฟีโนนเป็นสารที่เติมลงในพลาสติกเพื่อช่วยให้พลาสติกสลายตัวด้วยแสง มักเรียกว่า "สารไวต่อแสง" (photosensitizer) โดยเบนโซฟีโนนจะเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อได้รับแสงยูวีส่งผลให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายได้

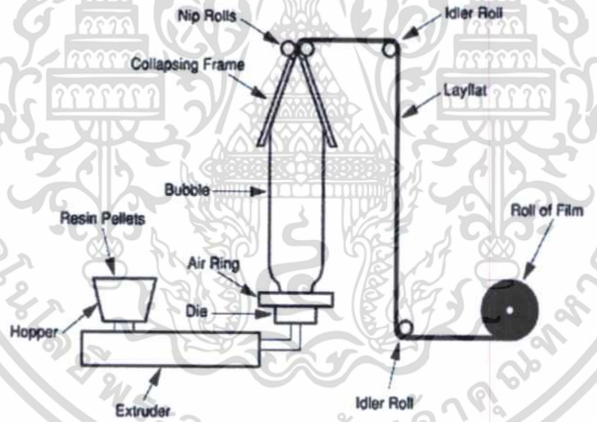
2.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเอ็กทรูเดอร์ (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อทำให้พลาสติกหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวดาย (Die head) รูปวงแหวนไหลผ่านด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวนี้จะถูกบังคับให้อยู่ในรอบแกนหมุนที่อยู่ในดายและไหลออกผ่านดายเปิดรูปวงกลมในลักษณะที่มีผนังค่อนข้างหนาเป็นลักษณะท่อที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัวและพองออก ซึ่งหัวดายหรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขับนี้ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบหัวไขว้ (Cross head) คือ อยู่ในแนวดิ่งลงข้างล่าง พลาสติกเหลวที่ออกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นท่อกลวงโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เย็นเพื่อไม่ให้ผิวฟิล์มติดกันและลดแรงดึงกันภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมเย็นที่ผิวด้านนอกและผิวด้านใน ทำให้พลาสติกเย็นตัวลงแล้ว จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดกับท่อพลาสติกให้แบนแล้วม้วนเก็บ เพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้ผลิตถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรูและดาย รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดดาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในดายจะต้องมีการปรับให้ดีด้วย เพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราการหล่อเย็นตรงที่ฟองถูกทำให้เย็นก็จัดว่ามีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกั้น (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up roll) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำมากกว่าอากาศที่มีความดันสูง นอกจากนี้ปริมาณการควบคุมและทิศทางของอากาศก็จัดว่ามีความสำคัญเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนา [39]



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์ม [40]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม LDPE และ LLDPE ภายใต้สภาวะการฉีด โดยอัตราส่วนของLDPE : LLDPE เท่ากับ 75:25, 50:50, และ 25:75 ตามลำดับ แล้วฉีดขึ้นรูปเป็นตัวอย่างใน 3 สภาวะเรียกชื่อว่าสภาวะอ้างอิง สภาวะความดันต้านกลับที่สูงขึ้น และสภาวะอุณหภูมิพลาสติกเหลวที่ลดต่ำลง สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่ขึ้นรูปศึกษาด้วย DSC และสมบัติเชิงกลได้ศึกษาตาม ASTM D638 จากผลการทดลอง DSC ชี้ให้เห็นว่า LLDPE และ LDPE แยกออกจากกันเป็น 2 เฟสระหว่างการเกิดเป็นผลึกในแม่พิมพ์ ผลึกของ LLDPE เกิดขึ้นก่อนเนื่องจากมีอุณหภูมิในการตกผลึกต่ำกว่า LDPE และผลึกเหล่านี้ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รบกวนการเกิดผลึกของ LDPE ทำให้อุณหภูมิการหลอมผลึกของ LDPE กว้างมากขึ้น การเพิ่มความดันต้านกลับทำให้การแยกเฟสเกิดมากขึ้น ในขณะที่การลดอุณหภูมิการขึ้นรูปไม่ได้มีผลต่อการแยกเฟสที่ชัดเจน

Ji-Zhao Liang [42] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยืดหยุ่นในระหว่างการอัดรีดผ่านหลอดขนาดเล็กของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ขณะหลอมเหลว โดยนำพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่มีค่าดัชนีหลอมไหลต่างกันผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน (extruder screw) พฤติกรรมการยืดหยุ่น เช่น การสูญเสียความดัน การบวมตัว และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อตัวอย่าง จากการตรวจสอบโดย capillary rheometer ที่อัตราเฉือนในช่วง 10 ถึง 10^3 s^{-1} และช่วงอุณหภูมิ 240 ถึง 260 ^{0}C ที่แรงเฉือน (t_w) ต่ำๆ และค่า pressure drop (ΔP_{en}) เริ่มต้น สำหรับ LDPE เมื่อเกิดการผสมและหลอมเหลวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าแรงเฉือน (t_w) จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ LLDPE เกิดการหลอมเหลวผลที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับค่า pressure drop (ΔP_{en}) ซึ่งมีผลต่อแรงเฉือน (t_w) เพียงเล็กน้อย อัตราการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่หัว die (B) เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงกับแรงเฉือน (t_w) และ pressure drop (ΔP_{en}) แต่การบวมตัวจะลดลง เมื่ออัตราส่วนความยาวของ die ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งมีการลดอุณหภูมิลง พบว่าอัตราการบวมตัวของพอลิเมอร์ (B) มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็น 50:50 ปรากฏการณ์นี้สามารถบันทึกปริมาณการเปลี่ยนรูปพลังงานยืดหยุ่นที่เก็บไว้ (elastic deformation energy stored) ในการหลอมไหลและการเปลี่ยนแปลงความเหนียวและยืดหยุ่น (viscoelastic) เนื่องจากความแตกต่างของ 2 วัฏภาค

R. Pe´rez และคณะ **[43]** ได้ศึกษาความหนืดเชิงเส้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง m-LLDPE/LDPE จะมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบปริมาตรอิสระเพื่อให้การผสมเข้ากันได้ดีขึ้น การเบี่ยงเบนจากรูปแบบสังเกตได้จากที่อัตราส่วนของระหว่าง m-LLDPE/LDPE เป็น 52.5% ต่อ 47.5% ซึ่งจะเห็นจากความไม่เข้ากันขององค์ประกอบนี้ในสภาพหลอมเหลว วิธี Time – temperature superposition ใช้เพื่อยืนยันการเข้ากันได้ และการไม่เข้ากันขององค์ประกอบ ผลของความเข้ากันได้ที่มีต่อสมบัติการไหลสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ extrusion rheometry ผลการทดลองแสดงให้เห็นลักษณะของแผ่นหลักของส่วนอสัณฐานในของผสมที่ไม่เข้ากัน โดยส่วนของ LDPE ซึ่งมีความหนืดน้อยกว่าจะล้อมรอบวัฏภาคของ m - LLDPE ไว้ พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้เมื่อมีปริมาณ LDPE สูงๆและพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน (47.5% LDPE% m-LLDPE/52.5) แสดงให้เห็นการเกิดการเสียรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt fracture) แต่ไม่มีการเกิดเป็นรอยฟันฉลามบนผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (shark skin) ในภายหลังสังเกตพบว่าเมื่อผสม m - LLDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอัตราส่วนสูงๆเกิดเป็นรอยฟันฉลามบนผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ ในช่วงอัตราส่วนผสมเท่ากับ 87.5% m-LLDPE/12.5 %LDPE ผลที่ได้เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของความหนืดและการดึงยืด เนื่องจากการมีโซ่ที่มีกิ่งยาวๆมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการปั่นขณะหลอมเหลว (melt spinning) และกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (blown film extrusion) ผลแสดงให้เห็นหลักฐานเกี่ยวกับข้อจำกัดทางเทคนิคที่เกิดจากความไม่เข้ากัน

Nakamura E.M. และคณะ [44] ได้ศึกษาการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)โดยทำการผสมแป้งชนิดต่างๆกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อเป็นสารประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยการนำแป้งมันสำปะหลัง แป้งดัดแปร ปริมาณ 5, 10 และ 20 %w/w ผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้ง แต่สมบัติอื่นๆเช่น เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความแข็งแรงโค้งงอลดลง สารประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งในอัตราส่วน 20 %w/w มีค่ามอดุลัส (Modulus) มากที่สุดและจากการทดลองพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อใส่ปริมาณ 5 และ 10 %w/w

วรวิทย์ โพชนิกร [45] ศึกษาผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม ผลการทดลองพบว่า เมื่อพอลิเมอร์มีปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลี 30% หลังการฝังกลบมีค่าลดลงมากที่สุด ส่วนสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และพอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่า T_m และ T_c มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงผลึกโดย XRD พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงผลึก และผลจากการศึกษาโดย SEM หลังการฝังกลบ สรุปได้ว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลีเกิดการย่อยสลายได้เร็วที่สุด

Mats Thunwall และคณะ [46] วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเกิดจากการรวมกันของแป้ง กลีเซอรอล และน้ำ ในการศึกษาปัจจุบันแป้งมันฝรั่งที่นิยมนำใช้ทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมี 2 แบบคือ แป้งมันฝรั่งพื้นเมืองและแป้งดัดแปรจำพวกแป้งออกซิไดซ์ จุดประสงค์หลักของการศึกษานี้เพื่อหาแนวทางในการเป่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสม รวมทั้งปริมาณกลีเซอรอลและความชื้นที่เหมาะสมด้วย จากการทดลองพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากแป้งดัดแปรสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากแป้งพื้นเมืองนั้นค่อนข้างยาก ปัญหาที่พบส่วนใหญ่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์กับความเหนียวพื้นผิวของฟิล์มโดยมีความเหนียวหรือแรงยึดแน่นไม่เพียงพอและเกิดฟองขึ้น

วิไลวรรณ โพล้งมี [21] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยทำการผสมอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการหน่วงติดไฟให้กับฟิล์มย่อยสลายโดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดรายเป็นสารช่วยผสมและกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ นำมาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง โดยทำการศึกษาหาปริมาณพลาสติไซเซอร์และปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม ที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช จากนั้นทำการศึกษาถึงปริมาณของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ที่มีต่อสมบัติการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL 94V-0 Test สมบัติการย่อยสลายในดิน และสมบัติอื่นๆได้แก่ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณกลีเซอรอล 18% และปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลและค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงที่สุด ผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสม ผลการศึกษาสมบัติการเผาไหม้และสมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้พบว่า ฟิล์มมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลงจนไม่เกิดการลุกติดไฟในขณะทำการทดสอบ และฟิล์มมีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในดินได้เร็วขึ้น เมื่อมีปริมาณของอะลูมิเนียมไตรไฮเดรท และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าอะลูมิเนียมไตรไฮเดรทและแอนติโมนีออกไซด์มีผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีความสามารถในการต้านทานความร้อนดีขึ้น ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา

Agnes Hochstetter และคณะ [47] แผ่นกลูเตนข้าวสาลีที่มีกลีเซอรอลเป็นสารปรับสภาพพลาสติกนั้นสามารถผลิตได้สำเร็จโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (twin-screw extruder) และรูปแบบของแผ่นโปร่งแสงพบว่าเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิการหลอมเหลวประมาณ 137 ^{o}C การศึกษาการดูดซับน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและการซึมผ่านของก๊าซของแผ่นกลูเตนข้าวสาลีที่ได้จะสัมพันธ์กับความชื้น การดูดซับน้ำหาได้จากการผสมกลีเซอรอลกับโปรตีนปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง และสามารถอธิบายโดยใช้สมการของ Guggenheim Anderson de Boer (GAB) และ Brunauer Emmett Teller (BET) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของแผ่นกลูเตนข้าวสาลีที่ปริมาณน้ำต่างๆวัดได้โดยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) เทคนิค dynamic mechanical analysis (DMA) และเทคนิค dielectric analysis (DEA) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของแผ่นกลูเตนที่ไม่มีน้ำจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและพบว่าค่าจะยิ่งลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัส (Young's modulus) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (tensile strength at break) และค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น การซึมผ่านของไอน้ำของแผ่น กลูเตนเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเมอร์สังเคราะห์ แต่ในการทดลองเทียบกับแผ่นฟิล์มกลูเตนที่ได้จากการหล่อแบบ การซึมผ่านของออกซิเจนของแผ่นกลูเตนมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มกลูเตนที่ได้จากการหล่อแบบ

Ottenhof และ Farhat [48] การคืนตัวของอะไมโลเพกตินในแป้งข้าวสาลีและในของผสมระหว่างแป้งข้าวสาลี/กลูเตน (10:1) ซึ่งผสมด้วยเครื่องอัดรีด และมีน้ำอยู่ด้วย 34% (ตามน้ำหนักเปียก) ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค X - ray differential เทคนิค differential scanning calorimetry และเทคนิค NMR relaxometry โดยเก็บรักษาที่ปริมาณน้ำและอุณหภูมิ (25 ^{0}C) คงที่ พบว่าอะไมโลเพกตินเกิดการคืนตัวอย่างสมบูรณ์ในเวลาเพียง 2-3 วันระหว่างการเก็บรักษา การตรวจสอบความแตกต่างของตัวแปรกับเวลาในการเกิดการคืนตัวจนถึงค่าสูงสุด และการตกผลึกเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์เห็นได้อย่างชัดเจน ภายใต้สภาวะการทดลองที่ใช้ไม่มีหลักฐานที่แสดงถึงผลของปริมาณกลูเตนที่มีต่อจลนศาสตร์การคืนตัวของอะไมโลเพกติน

Dintcheva และ La Mantia[49] ได้ศึกษาผลของแสงที่มีต่อพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ฟิล์มที่สังเคราะห์จากแป้งข้าวโพด และใช้สาร UV-stabilizer ได้แก่ Benzophenone, Benzotriazoles, Triazine และ Hindered amine จากนั้นทดสอบการเกิดปฏิกิริยา Photo-oxidation และ Photo-stabilization สำหรับใช้ทางการเกษตร ภายหลังการย่อยสลายโดยแสงผ่านปฏิกิริยา Photo-oxidation ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ ความความทนแรงดึง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด หลังการฉายแสงยูวีทำให้ค่าร้อยละการดึงยืดลดลงอย่างรวดเร็ว แต่สาร UVstabilizer สามารถช่วยฟิล์มมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อได้รับแสง UV ดังนั้น UV- stabilizer จึงไม่เหมาะที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้ง และสาร Benzophenone มีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสงมากที่สุด เนื่องจากเป็นตัวช่วยดูดกลืนรังสี UV ในช่วงที่กว้างขึ้น ทำให้ดูดกลืนรังสี UV ได้มากขึ้นเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้มากขึ้น ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kacznarrek และคณะ [50] ได้ศึกษาผลการย่อยสลายทางแสงต่อพอลิสไตรีน โดยใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ ได้แก่ Benzophenone, Anthraquinone และ Benzoyl peroxide ศึกษาสมบัติการไหลและความถ่วงจำเพาะ โดยใช้ FTIR และ UV-Vis spectroscopy พบว่าสารทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายโดยการเกิดออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุลเมื่อได้รับแสงยูวี แต่ทำให้เกิดพันธะคู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งสาร Benzophenone มีประสิทธิภาพในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสงมากที่สุด

อัณรพ รักรัตน์ [12] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวทางแสงที่มีต่อการสลายตัวของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้สารเบนโซฟีโนนเป็นสารเร่งการสลายตัวทางแสง มีพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม และกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ นำสารมาผสมในเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องผสมเกลียวหนอนคู่ หลังจากนั้นนำสารผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยศึกษาหาประสิทธิภาพของเบนโซฟีโนนที่มีผลต่อการสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน ปริมาณการออกซิเดชัน สัณฐานวิทยา จากนั้นนำฟิล์มไปฉายแสงยูวีและฝังดิน แล้วติดตามผลการสลายตัวจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึงและมอดุลัส) การเกิดหมู่คาร์บอนิล และ ไฮดรอกซิล อุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึก ความเป็นผลึก และสัณฐานวิทยาจากการทดลองพบว่า เบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังจะทำให้ความทนแรงดึง และมอดุลัสลดลง แสงยูวีมีผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงแต่ทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น และพบว่าเบนโซฟีโนนช่วยเร่งการสลายตัวภายใต้แสงยูวีทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก จากการศึกษาปริมาณออกซิเดชัน พบว่าแสงยูวีมีผลทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทำการทดลอง โดยฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจากฟิล์มปกติ แต่ฟิล์มที่ฝังดินไม่พบหมู่คาร์บอนิล เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายแป้ง ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าแสงยูวีมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกลดลงเล็กน้อยในทุกสูตร เนื่องจากเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่การฝังดินทำให้อุณภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ผลการตรวจสอบโครงผลึก พบว่าแสงยูวีทำให้ร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่ทุกสภาวะการทดลองไม่มีผลต่อโครงผลึก ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า แสงยูวีทำให้พื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นรูพรุน แตกร้าว เปราะ แต่การฝังดินพบว่าพื้นหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งเกิดรูพรุน แต่ไม่แตกร้าวและเปราะเหมือนการฉายแสงยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป (LDPE1905F) จากบริษัท SCG Chemical จำกัด สมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แสดงดังตารางที่ 3.1
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) จากบริษัท Exxon Mobil Chemical จำกัด สมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

Properties	**LD1905F* (LDPE)**	**Exceed 1018** (m-LLDPE)**
Melt flow Rate, (g/10 min)	5	1
Melting Point ,(^{0}C)	110	119
Tensile Strength at Yield : MD : TD	 - 9.8 MPa	 9 MPa 8.5 MPa
Tensile Strength at break : MD : TD	 19.6 MPa 14.7 MPa	 46.1 MPa 32.1 MPa
Tensile Modulus : MD : TD	 166.7 MPa 186.3 MPa	 175 MPa 181.6 MPa
Elongation at break (%) : MD : TD	 400 700	 470 550

* ข้อมูลจากบริษัท SCG Chemical จำกัด (มหาชน)

* * ข้อมูลจากบริษัท Exxon Mobil Chemical จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แป้งมันสำปะหลังชนิดเกรดอาหาร จากบริษัทดวงดีพัฒนา

ตารางที่ 3.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

Properties	Units	Cassava starch
Praticle size	μm	20
Moisture Content	%	12 – 15
Purity	%	90

ข้อมูลจากบริษัทดวงดีพัฒนา

4. กลูเตน (Vital wheat gluten) เกรดอาหาร จากบริษัท Manildra group จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติของกลูเตนข้าวสาลี

Properties	Specification
Protein (%)	75.00 min
Moisture (% w/w)	10.00 max
pH	5.5-6.2
Water absorption (%)	150 min
Ash (% w/w)	0.08 max

ข้อมูลจากบริษัท Manildra group จำกัด

5. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Thai pure science จำกัด

ตารางที่ 3.4 สมบัติของกลีเซอรอล

สมบัติ	กลีเซอรอล
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.26
จุดเดือด (°C)	290
จุดหลอมเหลว (°C)	18
ความหนืดที่ 20 °C (mps)	1400

ข้อมูลจากบริษัท Thai pure science จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สารช่วยผสม (Fusabond® MB 226D, LDPE base) จากบริษัท Dow chemical จำกัด

ตารางที่ 3.5 สมบัติของ Fusabond® MB 226D

Properties	Specification
Melt flow rate (g/10 min)	1.5
Density (g/cm^3)	0.93
Melting point (°C)	122

ข้อมูลจากบริษัท Dow chemical จำกัด

7. สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางแสง (Benzophenone) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Mayzo จำกัด

ตารางที่ 3.6 สมบัติของเบนโซฟีโนน

Properties	Specification
Purity (% min)	99.5
Melting point (°C)	45-49
Volatiles (% max)	0.1

ข้อมูลจากบริษัท Mayzo จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่(Twin screw extruder) : Lab Tech engineering Co.,Ltd.รุ่น LTE-26-40
2. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก(Mini Pelletier): Lab Tech engineering Co.,Ltd.รุ่น LZ-80
3. เครื่องเป่าฟิล์ม(Blown film extruder): Lab Tech engineering Co.,Ltd.รุ่น Type LF 400
4. เครื่องผสมความเร็วสูง(High speed mixer): Lab Tech engineering Co.,Ltd.รุ่น Model 3000
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์(Universal Testing Machine): Lloyd Instrument Co., Ltd. รุ่น LR 5K

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องทดสอบทางความร้อน(Differential Scanning Calorimeter, DSC) : Mettler-Toledo Co.,Ltd. รุ่น DSC 822 และ (Thermogravimatric Analyzer : TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris1
7. เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Rate Tester) : CEAST รุ่น 6841
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.
9. เครื่องตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR spectrum GX
10. ตู้อบแสงอัลตร้าไวโอเลต บริษัท Labtech Engineering Co.Ltd.(Hg-lampcontain mercury): Philips TUV PL-S, 9 Watt
11. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation analyzer) รุ่น L80-4000 บริษัท Lyssy Co., Ltd
12. เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Digimatic micro meter): Mitutoyo รุ่น MDC 25PJ
13. ตู้อบ(Oven)

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 หาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

1. นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่แสดงดังตารางที่ 3.7 นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผสมกันแล้วไปผสมอีกครั้งด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.8 แล้วตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด
2. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C เป็นวลา 1 ชั่วโมง (เพื่อไล่ไอน้ำและความชื้น)
3. นำเม็ดพอลิเมอร์ที่อบแล้วไปทดสอบดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Melt flow indexer ที่อุณหภูมิ 190 ^{0}C โดยใช้น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม รายงานผลในหน่วย กรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 1238
4. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมเป่าขึ้นรูปฟิล์ม โดยสภาวะในการขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 3.9
5. ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester โดยวัดค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส แล้วเลือกค่าอัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่เหมาะสมจากสมบัติเชิงกลที่ได้

6. นำอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้ไปเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS)

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนระหว่าง LDPE : LLDPE ในแต่ละสูตร

สูตร	LDPE	LLDPE
LL1	100	0
LL2	90	10
LL3	80	20
LL4	70	30
LL5	60	40
LL6	50	50
LL7	40	60
LL8	30	70
LL9	0	100

ตารางที่ 3.8 สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง LDPE : LLDPE

อุณหภูมิ (^{0}C)										ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)
die	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
160	165	170	170	170	170	170	165	160	155	130

ตารางที่ 3.9 สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม (blended LDPE/LLDPE)

อุณหภูมิ (^{0}C)					ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)	ความเร็วในการดึง (รอบ/นาที)
die	อุณหภูมิบริเวณที่ 4	อุณหภูมิบริเวณที่ 3	อุณหภูมิบริเวณที่ 2	อุณหภูมิบริเวณที่ 1		
170	173	170	165	160	130	5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 หาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนา แน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS) ได้

- เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

1. อบแป้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
2. นำแป้งที่ได้มาผสมกับพลาสติไซเซอร์(กลีเซอรอล)คลุกให้เข้ากัน แล้วผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 3 ครั้ง (ครั้งละ 3 นาที) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
3. ของผสมระหว่างแป้งกับกลีเซอรอลที่ได้เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

- เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS)

1. นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมไว้มาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อีก 1 ครั้ง (เป็นเวลา 3 นาที)
2. จากนั้นจึงเติมเม็ดพอลิเอทิลีนและสารช่วยผสม (Fusabond® MB 226D) ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.10 แล้วทำการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อีก 4 ครั้ง(ครั้งละ3 นาที)
3. นำของผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยใช้สภาวะดังตารางที่ 3.11 แล้วตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด
4. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS)ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที (เพื่อไล่ความชื้น)
5. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS) ที่ได้เป่าขึ้นรูปฟิล์มซึ่งสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 3.12
6. ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส
7. ทดสอบการกระจายตัวของแป้งด้วยสารละลายไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนผสมของ blended LDPE/LLDPE/TPS แต่ละสูตร

สูตร	LDPE* (phr)	LLDPE * (phr)	แป้งมันสำปะหลัง (phr)	กลีเซอรอล (phr)	Fusabond (phr)
R1	70	30	50	22.5	6.5
R2	70	30	60	27.0	7.5
R3	70	30	70	31.5	8.5
R4	70	30	80	36.0	9.5

* ปริมาณ LDPE และ LLDPE ได้จากการทดลองในข้อที่ 3.3.1

phr คือ เทียบกับน้ำหนักเรซิน (LDPE+LLDPE) 100 กรัม

ตารางที่ 3.11 สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการผสมพอลิเมอร์

อุณหภูมิ (^{0}C)										ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)
die	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
160	162	165	165	165	165	165	160	155	145	70

ตารางที่ 3.12 สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS)

อุณหภูมิ (^{0}C)					ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)	ความเร็วในการดึง (รอบ/นาที)
die	อุณหภูมิบริเวณที่ 4	อุณหภูมิบริเวณที่ 3	อุณหภูมิบริเวณที่ 2	อุณหภูมิบริเวณที่ 1		
170	173	170	165	160	130	3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนา แน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) และหาปริมาณกลูเตนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้

- เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกลูเตน (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3.2

1. อบแป้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
2. นำแป้งที่ได้มาผสมกับพลาสติไซเซอร์(กลีเซอรอล)คลุกให้เข้ากัน แล้วผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 3 ครั้ง (ครั้งละ 3 นาที) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ของผสมระหว่างแป้งกับกลีเซอรอลที่ได้เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
3. นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมไว้มาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 1 ครั้ง (เป็นเวลา 3 นาที)
4. นำมาผสมกับกลูเตนในปริมาณ 3, 5, 4, 6 และ 7 phr ตามแต่ละสูตร คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อีก 1 ครั้ง (เป็นเวลา 3 นาที)
5. จากนั้นจึงเติมเม็ดพอลิเอทิลีนและสารช่วยผสม (Fusabond®MB 226D) ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.13 แล้วทำการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีอีก 2 ครั้ง(ครั้งละ3 นาที)
6. นำของผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้สภาวะดังตารางที่ 3.14 แล้วตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด
7. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกลูเตน (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที (เพื่อไล่ความชื้น)
8. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(LLDPE) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกลูเตน (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) ที่ได้เป่าขึ้นรูปฟิล์มซึ่งสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 3.15
9. ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามมาตรฐาน ASTM E 794 และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131
11. ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)
12. ทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ
13. ทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน
14. ทดสอบการกระจายตัวของแป้งด้วยสารละลายไอโอดีน

ตารางที่ 3.13 อัตราส่วนผสมต่างๆของ blended LDPE/LLDPE/TPS/WG แต่ละสูตร

สูตร	LDPE* (phr)	LLDPE* (phr)	แป้งมันสำปะหลัง** (phr)	กลีเซอรอล (phr)	สารช่วยผสม (phr)	กลูเตน (WG (phr)
PE/TPS	70	30	70	31.5	8.5	-
PE/TPS/WG3	70	30	70	31.5	8.5	3
PE/TPS/WG4	70	30	70	31.5	8.5	4
PE/TPS/WG5	70	30	70	31.5	8.5	5
PE/TPS/WG6	70	30	70	31.5	8.5	6
PE/TPS/WG7	70	30	70	31.5	8.5	7

* ปริมาณ LDPE และ LLDPE ได้จากการทดลองในข้อที่ 3.3.1

** ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมได้จากการทดลองข้อที่ 3.3.2

TPS หมายถึง พอลิเอทิลีน/แป้งผสมกลีเซอรอล

G หมายถึง ปริมาณกลูเตนที่เติมได้แก่ 3, 4, 5, 6 และ 7 phr

ตารางที่ 3.14 สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการผสม blended LDPE/LLDPE/TPS/WG

อุณหภูมิ (^{0}C)										ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)
die	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
160	162	165	165	165	165	165	160	155	145	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.15 สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของ blended LDPE/LLDPE/TPS/WG

อุณหภูมิ (^{0}C)					ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)	ความเร็วในการดึง (รอบ/นาที)
die	อุณหภูมิบริเวณที่ 4	อุณหภูมิบริเวณที่ 3	อุณหภูมิบริเวณที่ 2	อุณหภูมิบริเวณที่ 1		
170	173	170	165	160	130	3.8

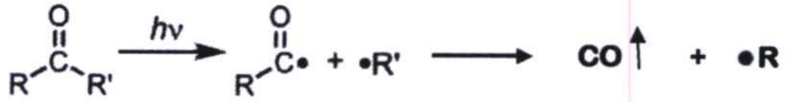
3.3.4 ศึกษาผลของเบนโซฟีโนนซึ่งเป็นตัวเร่งการสลายตัวด้วยแสงที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนา แน่นต่ำ (LDPE) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดจากข้อ 3.3.3 และเบนโซฟีโนน

1. อบแป้งที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
2. นำแป้งที่ได้มาผสมกับพลาสติไซเซอร์(กลีเซอรอล)คลุกให้เข้ากัน แล้วผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 3 ครั้ง (ครั้งละ 3 นาที) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ของผสมระหว่างแป้งกับกลีเซอรอลที่ได้เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
3. นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมไว้มาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที 1 ครั้ง (เป็นเวลา 3 นาที)
4. นำมาผสมกับกลูเตนในปริมาณที่เหมาะสม(ปริมาณกลูเตนที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.3) คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อีก 1 ครั้ง (เป็นเวลา 3 นาที)
5. เติมเบนโซฟีโนนในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อีก 1 ครั้ง (เป็นเวลา 3 นาที)
6. จากนั้นจึงเติมเม็ดพอลิเอทิลีนและสารช่วยผสม (Fusabond® MB 226D) ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.16 แล้วทำการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อีก 2 ครั้ง (ครั้งละ3 นาที)
7. นำของผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยใช้สภาวะดังตารางที่ 3.17 แล้วตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I)

สารที่ทำให้เกิดแตกแยกแบบโฟโตไลติกชนิดนี้จะเกิดเมื่ออยู่ใกล้กับหมู่คาร์บอนิลเป็นผลให้เกิดการเสียคุณภาพได้โดยตรงดังสมการ 2.7 และ 2.8 เมื่อได้อนุมูลแยกออกจากกันแล้วอนุมูลนี้สามารถเข้าทำปฏิกิริยาอื่นต่อไปเพื่อเกิดการเสียคุณภาพในที่สุด

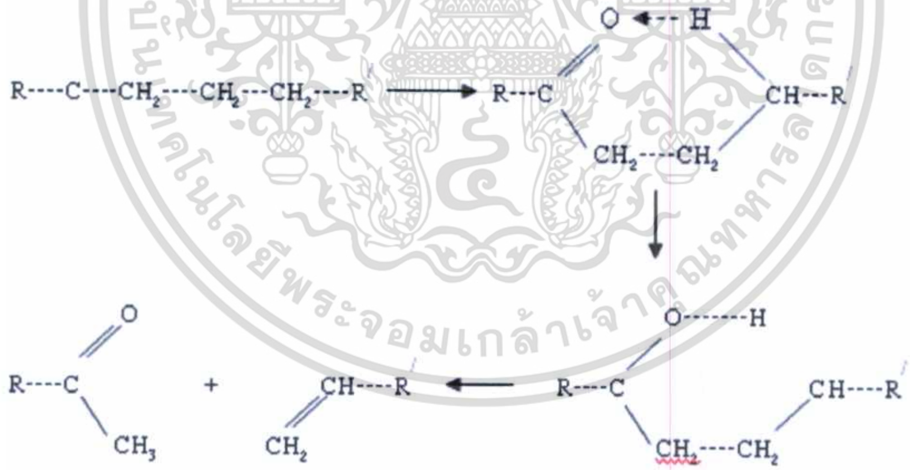


(2.7)

(2.8)

- นอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

หมู่คาร์บอนิลซึ่งอยู่ในตำแหน่งแกมม่า (Gramma) ของพันธะ C – H สามารถกระตุ้นให้เกิดการแตกแยกโดยผ่านกลไกเชิงซ้อนที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมอยู่ชั่วคราวและมีรัศมีที่สมมาตรกันดังสมการ 2.9 ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 เป็นที่นิยมมากกว่านอร์ริชแบบที่ 1 แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งระหว่างปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลเฉพาะทั้งสองและสภาวะเฉพาะในระหว่างการเสื่อมคุณภาพ


(2.9)

■ การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small molecule)

ปฏิกิริยาการเสียคุณภาพทางแสง (Photodegradation) ของพอลิเมอร์เป็นผลทำให้เกิดการกำจัดโมเลกุลเล็กๆออกในรูปของผลิตภัณฑ์ร่วม (By–Products) ได้แก่

- คาร์บอนมอนออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) โดยจะถูกปล่อยออกมาในระหว่างการเสียคุณภาพโดยปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(LLDPE) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกลูเตน (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที (เพื่อไล่ความชื้น)
9. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(LLDPE) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกลูเตน (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) ที่ได้เป่าขึ้นรูปฟิล์มซึ่งสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 3.18
10. ทดสอบการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(LLDPE) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกลูเตน (blended LDPE/LLDPE/TPS/WG) ด้วยเครื่องฉายรังสียูวีเป็นเวลา 6 เดือน
11. ทดสอบการกระจายตัวของแป้งด้วยสารละลายไอโอดีน

ตารางที่ 3.16 อัตราส่วนผสมต่างๆของ blended LDPE/LLDPE/TPS/WG และ benzophenone แต่ละสูตร

สูตร	LDPE (phr)	LLDPE (phr)	แป้งมันสำปะหลัง (phr)	กลีเซอรอล (phr)	Fusabond (phr)	กลูเตน* (phr)	เบนโซฟีโนน (phr)
PE/TPS/WG5/B1	70	30	70	31.5	8.5	5	1
PE/TPS/WG5/B3	70	30	70	31.5	8.5	5	3
PE/TPS/WG5/B5	70	30	70	31.5	8.5	5	5

* ปริมาณกลูเตนได้จากการทดลองข้อที่ 3.3.3

ตารางที่ 3.17 สภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้ในกระบวนการ blended LDPE/LLDPE/ TPS/WG และ benzophenone

อุณหภูมิ (^{o}C)										ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)
die	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
160	162	165	165	165	165	165	160	155	145	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.18 สภาวะการขึ้นรูปฟิล์มของ blended LDPE/LLDPE/TPS/WG และ benzophenone

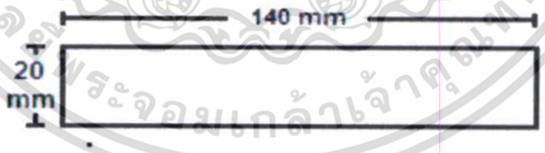
อุณหภูมิ (^{0}C)					ความเร็วสกรู (รอบ/นาที)	ความเร็วในการดึง (รอบ/นาที)
die	อุณหภูมิบริเวณที่ 4	อุณหภูมิบริเวณที่ 3	อุณหภูมิบริเวณที่ 2	อุณหภูมิบริเวณที่ 1		
170	173	170	165	160	130	3.8

3.4 วิธีการทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์ม

3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength ; σ), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus ; E) โดยตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 × 140 มิลลิเมตร วัดตัวอย่างทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) ตามมาตรฐาน ASTM D 882 ใช้ชิ้นงานทดสอบสูตรละ 8 ชิ้น สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

- ความเร็วดึง (Crosshead speed) 500 มิลลิเมตรต่อนาที
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) 50 มิลลิเมตร
- น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell) 100 นิวตัน



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆได้ดังนี้

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength ; σ) = F / A
- เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) = $\left[\frac{L-L_0}{L_0}\right]\times 100$
- ค่ามอดุลัส (Modulus : E) = ความเค้น (σ) / ความเครียด (ε)

เมื่อ F คือ แรงดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง

L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)

L_0 คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยืดชิ้นงาน (mm.)

ความเครียด (ε) = $\Delta L / L_0$

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.4.2.1 เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

เตรียมฟิล์มตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัมโดยชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก ($T_{c\ onset}$) และค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามมาตรฐาน ASTM E 794 โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10°C/min จากอุณหภูมิ -50 °C จนถึง 250°C แล้วลดอุณหภูมิลงในอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ในการทดสอบจะใช้ตัวอย่างฟิล์มหลายๆตำแหน่งมาทดสอบแล้วหาค่าเฉลี่ย(ในการทดลองนี้ใช้สูตรละ 3 ตำแหน่ง)

- การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%\ \text{Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของการ Heating (mJ)}}{\text{มวลของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f^o คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 276 J/g [59]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

ศึกษาอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว (T_d on set) ของพอลิเมอร์ผสมโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างประ มาณ 20-25 มิลลิกรัม แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 ^{0}C/min จากอุณหภูมิ 30 ^{0}C ถึง 600 ^{0}C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131

3.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

สังเกตลักษณะกายภาพเบื้องต้นของแผ่นฟิล์มที่ได้ เช่น สังเกตสี กลิ่น สังเกตลักษณะของเนื้อฟิล์ม และทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์

3.4.3.1 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม

ศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวการกระจายตัว ของแป้งมันสำปะหลัง และกลูเตนภายในพื้นผิวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยทำการเคลือบฟิล์มตัวอย่างด้วยเรซิน (พอลิเอสเตอร์) จากนั้นจะนำฟิล์มที่เคลือบแล้วไปหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) จากนั้นทำการเคลือบผิวของฟิล์มที่บริเวณรอยหักด้านข้างของฟิล์มด้วยทองแล้วนำไปส่องดูที่ผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3.4.3.2 การทดสอบหาปริมาณการดูดซับน้ำ

ทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) ตามมาตรฐาน ASTM D 570 โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 2 วัน แล้วคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำได้ดังนี้

$$M_t(\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100$$

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

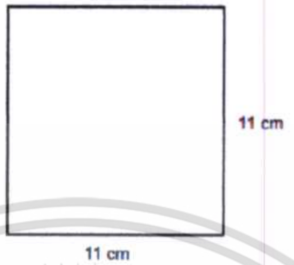
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) สูตรละ 2 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ISO 15106-1 โดยค่าการซึมผ่านของไอน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{WVP} = \text{WVTR} \times \text{ความหนาของฟิล์ม}$$

เมื่อ WVP คือ Water vapor permeability มีหน่วยเป็น g·μm. /m^2·day

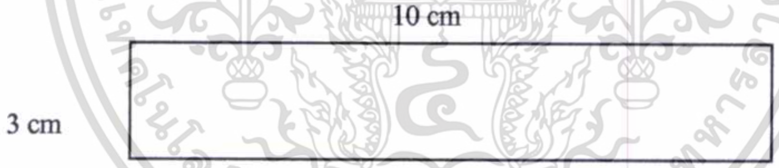
WVTR คือ Water vapor transmission rate ซึ่งอ่านได้จากเครื่อง มีหน่วยเป็น g/m^2 ·day



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

3.4.8 การทดสอบการกระจายตัวของแป้งด้วยสารละลายไอโอดีน [60]

นำตัวอย่างฟิล์มแต่ละสูตรรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3 x 10 cm จุ่มลงในสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 10 %w/v ที่เตรียมไว้เป็นเวลา 15 นาที แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานและสีของสารละลายที่เกิดขึ้น ถ่ายภาพของชิ้นงานไว้และนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope) เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆที่อยู่ในฟิล์ม



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อกระบวนการเตรียมฟิล์ม สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มที่เตรียมได้ ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 เป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล และนำฟิล์มที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

ตอนที่ 2 นำแป้งผสมกับกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารปรับสภาพพลาสติก (plasticizer) ได้ของผสมที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermo plastic starch ;TPS) แล้วนำไปผสมกับเม็ดพอลิเอทิลีน (LDPE/LLDPE)ที่ได้จากตอนที่ 1 ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้แป้งในอัตราส่วนที่สูงกว่าเม็ดพลาสติกจึงทำให้พบปัญหาในกระบวนการผสมและขึ้นรูปเนื่องจากความเปราะของแป้ง

ตอนที่ 3 การปรับปรุงให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นโดยการเติมกลูเตนซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งลงไปเพื่อช่วยทำให้การผสมและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ช่วยลดความเปราะและเพิ่มความยืดหยุ่นรวมทั้งศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มที่ได้

ตอนที่ 4 การปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มที่ได้จากตอนที่ 3 ด้วยเบนโซฟีโนน (Benzophenone) แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องฉายรังสียูวี (UV)

4.1 ผลการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

จากการทดลองนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการเป่าขึ้นรูป และทำให้ฟิล์มมีความเหนียวมากขึ้น ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.8 ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ แล้วตัดเป็นเม็ดและนำไปเป่าขึ้นรูปฟิล์มแล้วทดสอบสมบัติต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

ในการทดลองพบว่าสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนผสม (LDPE/LLDPE) ได้ทุกสูตร และลักษณะทางกายภาพของเม็ดพอลิเอทิลีนผสมและค่าดัชนีการหลอมไหล แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดพลาสติกที่ได้

อัตราส่วน LDPE/LLDPE	ลักษณะของพอลิเอทิลีนผสมที่ออกจากหัวดาย	ลักษณะของเม็ดพลาสติกที่ได้
100/0	-	-
90/10	ผิวเรียบ ไม่เกิด shark skin และ ไหลออกจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ด ได้ต่อเนื่อง	มีผิวที่เรียบ มีสีขาวขุ่น
80/20	ผิวไม่เรียบ เริ่มเกิด shark skin ที่ผิวเล็กน้อย ไหลออกจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีขาวขุ่น
70/30	ผิวไม่เรียบ เกิดเป็น shark skin ที่ผิวมากขึ้นไหลออกจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระมากขึ้น มีสีขาวขุ่น
60/40	ผิวไม่เรียบ เกิด shark skin ที่ผิวมาก ไหลออกจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระมากขึ้น มีสีขาวขุ่น
50/50	ผิวไม่เรียบ เกิด shark skin และไหลออกมาจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระมากขึ้น มีสีขาวขุ่น
40/60	ผิวไม่เรียบ เกิด shark skinและไหลออกมาจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระมากขึ้น มีสีขาวขุ่น
30/70	ผิวไม่เรียบ เกิด shark skin และไหลออกมาจากหัวดายอย่างต่อเนื่อง สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระมากที่สุด มีสีขาวขุ่น
0/100	-	-

หมายเหตุ (-) ไม่ต้องทำการผสมเนื่องจากเป็น LDPE และ LLDPE บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของ LLDPE เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มของการเกิดรอยแตกที่ผิว (shark skin) มากขึ้น เนื่องจากเมื่อดูโครงสร้างของ LLDPE จะพบว่าการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์มีความเป็นระเบียบมากกว่า โดยโซ่กิ่งที่ต่อกับสายโซ่หลักจะเป็นสายโซ่สั้นๆ ทำให้โอกาสเกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นแบบชิดกัน (close packing) มีสูงขึ้น ดังนั้นความเป็นผลึกของ LLDPE จึงสูงกว่า LDPE ส่งผลให้ LLDPE เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ได้ช้ากว่า LDPE ที่อุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดยังมีค่าดัชนีการไหลต่างกัน จากปัจจัยทั้งสองนี้ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความไม่สม่ำเสมอของการไหล (flow instabilities) ส่งผลให้เมื่อพอลิเมอร์ผสมไหลผ่านหัวดาย (die) ออกมาแล้วมีอัตราการเย็นตัวลงไม่เท่ากันโดยบริเวณผิวด้านนอกที่สัมผัสกับอากาศจะเย็นตัวก่อนบริเวณด้านใน ทำให้บริเวณผิวของพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นรอยหยักและเป็นคลื่นคล้ายรอยแตกเล็กๆที่เรียกว่า shark skin [52]

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Flow Index)

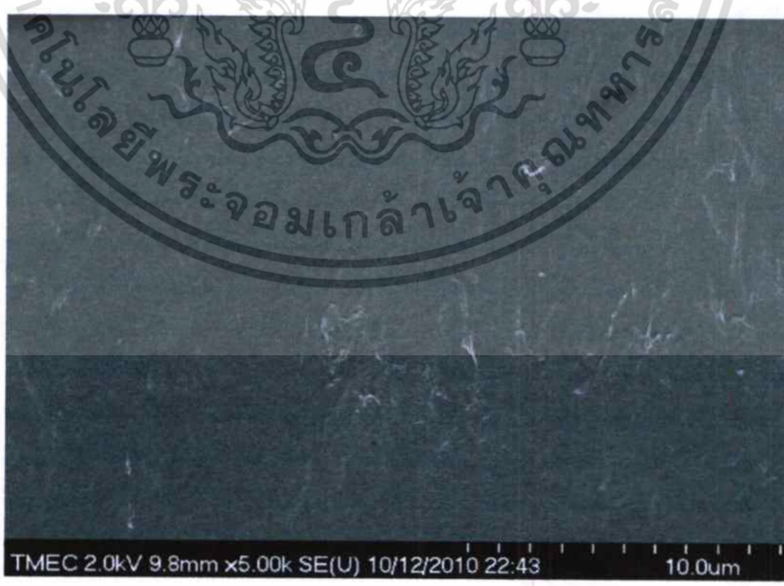
อัตราส่วน LDPE/LLDPE	MFI (g/10 min)
100/0	4.45 ± 0.13
90/10	3.60 ± 0.18
80/20	2.87 ± 0.25
70/30	2.12 ± 0.31
60/40	1.34 ± 0.23
50/50	1.26 ± 0.34
40/60	1.03 ± 0.16
30/70	0.94 ± 0.28
0/100	0.93 ± 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูป

สูตร	ลักษณะของฟิล์มที่ได้
LDPE	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว โดยไม่มีเม็ดพอลิเมอร์ที่เกิดการหลอมไม่สมบูรณ์กระจายอยู่
90/10	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมอย่างสมบูรณ์
80/20	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว
70/30	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว
60/40	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว
50/50	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว
40/60	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว
30/70	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว
LLDPE	ฟิล์มใสและมองเห็นเป็นเนื้อเดียว

หมายเหตุ ฟิล์มที่ได้จะมีความหนาอยู่ในช่วง 30-60 μm



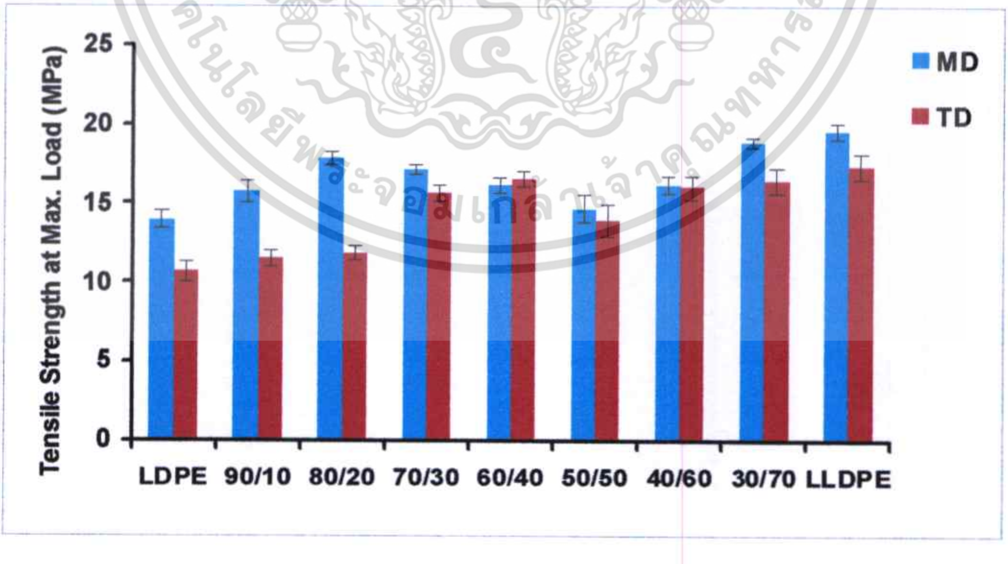
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของฟิล์ม LDPE/LLDPE ที่อัตราส่วน LDPE:LLDPE เท่ากับ 70:30 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำ LDPE ผสมกับ LLDPE ซึ่งมีค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ต่ำกว่าจะทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลง เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ LLDPE ที่สูงขึ้น ดังนั้นการที่จะนำสูตรพอลิเมอร์ผสมไปใช้ในการเตรียมเป็นเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจึงต้องคำนึงถึงความหนืดด้วยเพราะถ้าระบบมีความหนืดมากเกินไป เมื่อเติมแป้งลงไปจะทำให้ความหนืดยิ่งเพิ่มมากขึ้นแล้วส่งผลให้ความดันภายในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่เพิ่มขึ้นด้วยจนเครื่องไม่สามารถทำการผสมได้ที่สภาวะอุณหภูมิที่กำหนดไว้ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความหนืดยังส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเกิด shark skin มากขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และจากตารางที่ 4.3 พบว่าลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สังเกตได้พบว่าทุกอัตราส่วนที่เนื้อฟิล์มมีความใสและเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.1 ที่แสดงให้เห็นว่า LDPE กับ LLDPE ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในการเลือกอัตราส่วน LDPE:LLDPE ที่เหมาะสมไปใช้เตรียมฟิล์มนั้น นอกจากค่าดัชนีการหลอมไหลและลักษณะทางกายภาพแล้วต้องพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ด้วย

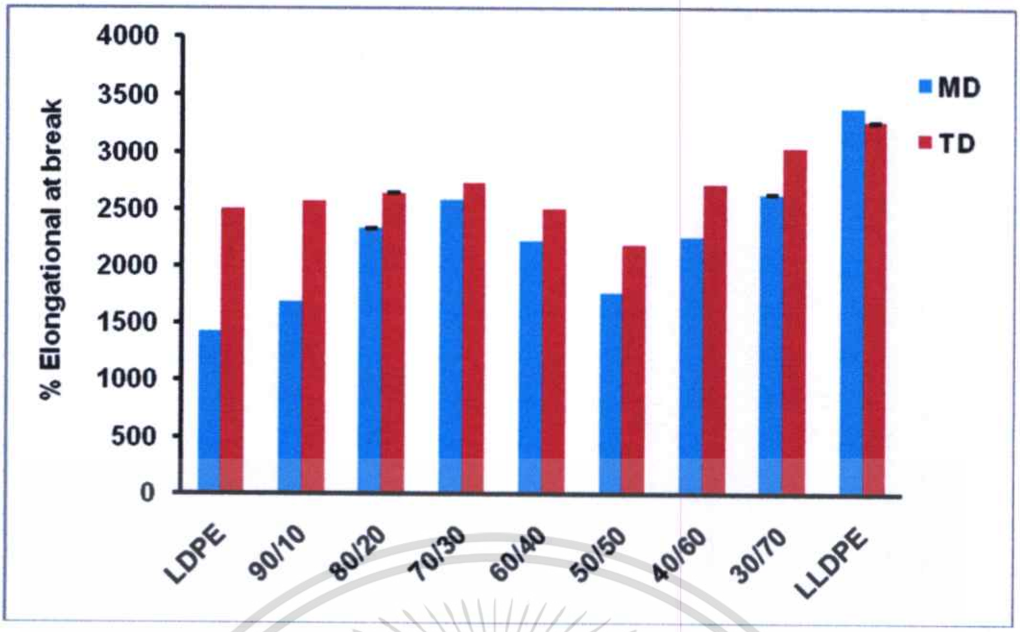
4.1.2 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength ; σ), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus ; E) ทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) ตามมาตรฐาน ASTM D 882 ได้ผลการทดสอบดังนี้

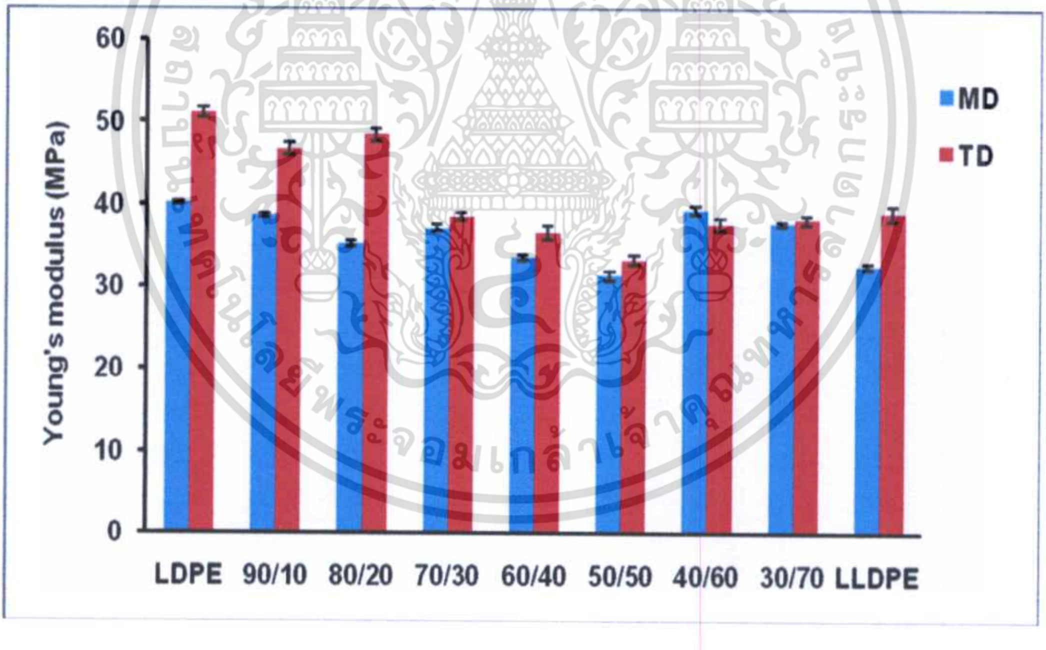


รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE ใน อัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPEในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPEในอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 – 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าที่อัตราส่วน LDPE/LLDPE มีความแตกต่างกัน (90/10, 80/20, 70/30 และ 30/70) พอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผลของ LLDPE ที่มีความแข็งแรงและมีความเหนียวมากกว่า LDPE จึงทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งที่อัตราส่วนดังกล่าวพอลิเมอร์ผสมมีรอยต่อของวัฏภาคน้อยและมีการผสมเข้ากันได้ดีทำให้ไม่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกวัฏภาคโดยที่ปริมาณ LDPE สูงๆ พอลิเมอร์ผสมยังมีค่าดัชนีการหลอมไหลสูงจึงสามารถไหลได้ง่ายจึงทำให้การผสมเข้ากันได้ดีและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อปริมาณสัดส่วน LDPE/LLDPE ใกล้เคียงกัน (60/40, 50/50 และ 40/60) พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดุลัสลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมเกิดความแตกต่างระหว่างวัฏภาคเพิ่มมากขึ้นและมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากขึ้นด้วย อีกทั้งที่อัตราส่วนดังกล่าวพอลิเมอร์มีความสามารถในการไหลแตกต่างกันอย่างมาก จึงทำให้การผสมเกิดความไม่เข้ากันและเกิดการแยกวัฏภาคขึ้นได้ ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลลดลงที่สัดส่วนดังกล่าว [18,43]

ในการทดสอบฟิล์มที่ได้ทั้ง 2 แนวแรงคือ แนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์มในแนวตามเครื่องจักร (MD) สูงกว่าแนวขวางเครื่องจักร (TD) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) และค่ามอดุลัส (Young's modulus) พบว่าแนวขวางเครื่องจักร (TD) มีค่าสูงกว่าในแนวตามเครื่องจักร (MD) เนื่องจากในกระบวนการเป่าฟิล์มนั้นมีการให้แรงดึงฟิล์มในแนว MD จึงทำให้สายโซ่มีการจัดเรียงตัวตามแนวแรงได้มากกว่าแนว TD ที่มีการจัดเรียงตัวตามแรงลมที่ใช้เป่าขยาย

จากการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีการหลอมไหล ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดและค่ามอดุลัสของฟิล์มที่อัตราส่วนต่างๆพบว่าที่อัตราส่วน LDPE/LLDPE เท่ากับ 90/10, 80/20, 70/30 และ 30/70 ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นดังนั้นจึงได้ทดลองนำอัตราส่วนดังกล่าวไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (แป้งมันสำปะหลัง 50 phr)แล้วเป่าขึ้นรูปฟิล์ม จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วน LDPE/LLDPE เท่ากับ 70/30 สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ต่อเนื่องมากที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าดัชนีการหลอมไหล สมบัติเชิงกล และความสามารถในการเป่าขึ้นรูป จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS)

4.2 ผลการหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) ได้

จากการทดลองนำพอลิเอทิลีนผสม (LDPE/LLDPE) ที่ได้จากตอนที่ 1. มาผสมกับแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม (Fusabond) ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.11 นำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แล้วเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) ได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

ในการทดลองพบว่าฟิล์มที่สามารถเป่าขึ้นรูปได้มีลักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 4.4- 4.6

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (PE/TPS) ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่างๆ

LDPE* (phr)	LLDPE* (phr)	แป้งมันสำปะหลัง (phr)	กลีเซอรอล (phr)	สารช่วยผสม (Fusabond) (phr)	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	
					เป่าได้	เป่าไม่ได้
70	30	50	22.5	6.5	√	
70	30	60	27	7.5	√	
70	30	70	31.5	8.5	√	
70	30	80	36	9.5		√

*phr คือ ปริมาณสารเมื่อเทียบกับเรซิน 100 ส่วน

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index) ของพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (PE/TPS)

ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (phr)	MFI (g/10 min)
50	1.64 ± 0.19
60	1.48 ± 0.33
70	1.29 ± 0.21
80	1.05 ± 0.30

ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (PE/TPS)

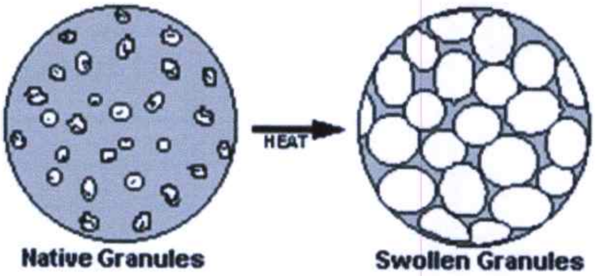
ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (phr)	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้
50	เป่าขึ้นรูปได้ต่อเนื่อง ฟิล์มมีสีขุ่นเล็กน้อย มองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน ที่บริเวณผิวฟิล์มหยาบด้านขึ้น ไม่เรียบลื่น
60	เป่าขึ้นรูปได้ต่อเนื่อง ฟิล์มมีสีขาวขุ่น มองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน ที่บริเวณผิวฟิล์มหยาบด้านขึ้น
70	เป่าขึ้นรูปได้ต่อเนื่องแต่เกิดฟองอากาศทำให้ฟิล์มมีรูในบางจุด ฟิล์มมีสีขาวขุ่นมากขึ้น มองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน ที่บริเวณผิวฟิล์มหยาบด้านมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ คือ ที่ปริมาณแป้ง 70 phr และกลีเซอรอล 31.5 phr โดยปริมาณของกลีเซอรอลที่ใช้คิดเทียบจากน้ำหนักของแป้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้ 45% ของน้ำหนักแป้ง เนื่องจากในการทดลองผสมแป้งกับกลีเซอรอลพบว่าหากใช้กลีเซอรอลมากเกินไปจะทำให้แป้งจับตัวกันเป็นก้อนและเมื่อเป่าขึ้นรูปฟิล์มจะมีกลีเซอรอลบางส่วนซึมออกมาบริเวณผิวของฟิล์ม (Bleeding) ทำให้ผิวฟิล์มมีลักษณะเหนียวติด และหากใช้กลีเซอรอลน้อยเกินไปพบว่า การกระจายตัวของแป้งไม่ดีเท่าที่ควรและฟิล์มไม่ความยืดหยุ่น เปราะและขาดได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณกลีเซอรอลให้เหมาะสมกับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

ส่วนของแป้งและกลีเซอรอลที่ผสมกันนั้นจะเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermo plastic starch) โดยกลีเซอรอลที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าเข้าไปแทรกตัวอยู่ในส่วนอสัณฐานของแป้งเท่านั้น ซึ่งในส่วนนี้มีความเป็นระเบียบน้อยและมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) อิสระอยู่จำนวนมาก จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งกับกลีเซอรอลได้ โดยทั่วไปนั้นเมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 60-75°C โมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นผลึกมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (crystallite) ลดลง กลีเซอรอลจึงสามารถแทรกเข้าไปในในส่วนของผลึกที่เริ่มมีการคลายตัวออกจากกันได้บ้าง ทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) แป้งจึงมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า "เจลาติไนเซชัน" แต่เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้เพราะโมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นผลึกที่เหลืออยู่ (มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงอยู่) จะเกิดสภาพคล้ายร่างแห เรียกว่า micelle network ยึดเหนี่ยวโมเลกุลเอาไว้ [58] ดังรูปที่ 4.5 แต่ในกระบวนการผลิตนั้นใช้อุณหภูมิสูงกว่าที่ใช้ในการเกิดเจลมาก ดังนั้นที่อุณหภูมิการผลิตเม็ดแป้งจะแตก และโมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอะไมโลเพกตินจะกระจัดกระจายออกมา และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นร่างแหสามมิติสามารถอุ้มน้ำไว้ในร่างแห ทำให้มีความหนืดมากขึ้นจนเกิดเป็นเจลเหนียวขึ้นอีกครั้ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "เกิดรีโทรเกรเดชัน (retrodradation)" หรือ "การคืนตัว (set back)" เมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีกการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลอะไมโลสจะเอื้อต่อการยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของเจลแน่นขึ้นโมเลกุลของน้ำอิสระภายในเจลจะถูกขับออกมาเรียกว่า "เกิดการขับน้ำ (synerasis)" ซึ่งจะมีผลทำให้เจลมีลักษณะเหนียวขึ้นมีสีขุ่นเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่สังเกตพบว่ามีสีขาวขุ่นขึ้น [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

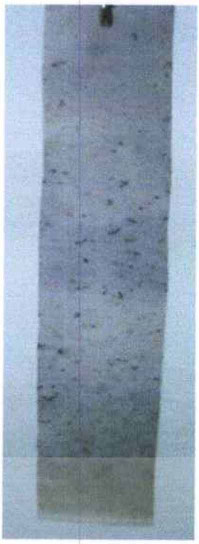


รูปที่ 4.5 การพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน [58]

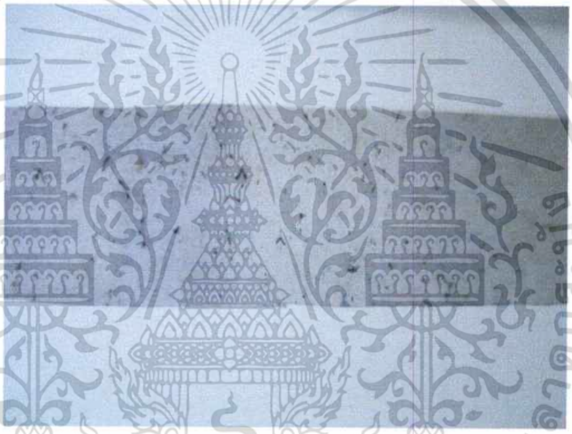
ดังนั้นเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrodradation) หรือการคืนตัว (set back) ของแป้งก็เพิ่มขึ้นด้วยจึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม (LDPE/LLDPE/TPS) ความหนืดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากการทดสอบฟิล์มด้วยสารละลายไอโอดีนเพื่อดูการกระจายตัวของแป้งใน LDPE/LLDPE พบว่า ฟิล์ม LDPE/LLDPE ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยฟิล์มเปลี่ยนจากสีขาวขุ่นเป็นสีม่วงอมน้ำเงินทั่วทั้งแผ่นดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารละลายไอโอดีน ซึ่งจากการทดสอบนี้การเปลี่ยนสีของฟิล์มเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนแสดงให้เห็นว่าแป้งมีการกระจายตัวได้ดีใน LDPE/LLDPE

นอกจากนี้ความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างแป้งกับ LDPE/LLDPE เป็นผลจากการเติมสารช่วยผสม (fusabond) เนื่องจาก LDPE/LLDPE ไม่มีขั้วแต่แป้งมีขั้ว ดังนั้นเมื่อทำการผสมจึงเกิดความไม่เข้ากัน แต่เมื่อเติมสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วลงไป สารช่วยผสมจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างแป้งกับ LDPE/LLDPE ทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับ LDPE/LLDPE มีมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสัณฐานวิทยาที่พบว่าแป้งส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ใน LDPE/LLDPE ได้ดี และมีความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับ LDPE/LLDPE สูง โดยจากภาพ SEMในรูปที่ 4.7 ที่ปริมาณแป้งสูงที่สุดคือ 70 phr สังเกตเห็นว่าแป้งกับ LDPE/LLDPE รวมเป็นเนื้อเดียวเป็นส่วนใหญ่ มีแป้งเพียงเล็ก น้อยที่จับตัวกันเป็นก้อนเล็กๆกระจายตัวอยู่ จากผลการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีนและผลการศึกษาทางสัณฐานวิทยานั้นมีความสอดคล้องกันซึ่งแสดงให้เห็นการกระจายตัวและความสามารถในการเข้ากันได้ของแป้งกับ LDPE/LLDPE ได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของสารช่วยผสม (fusabond) ที่ช่วยให้แป้งกับ LDPE/LLDPE มีความเข้ากันได้ดีขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)



(ค)

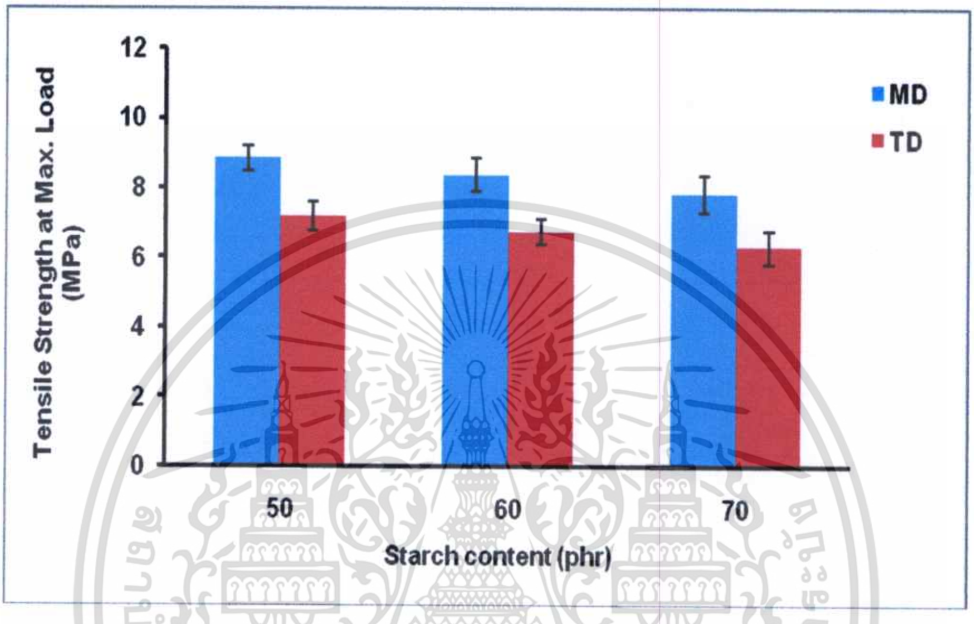
รูปที่ 4.6 สีของ (ก) ฟิล์ม LDPE/LLDPE , (ข) และ (ค) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS หลังการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน

รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของแป้งในฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้ง 70 phr

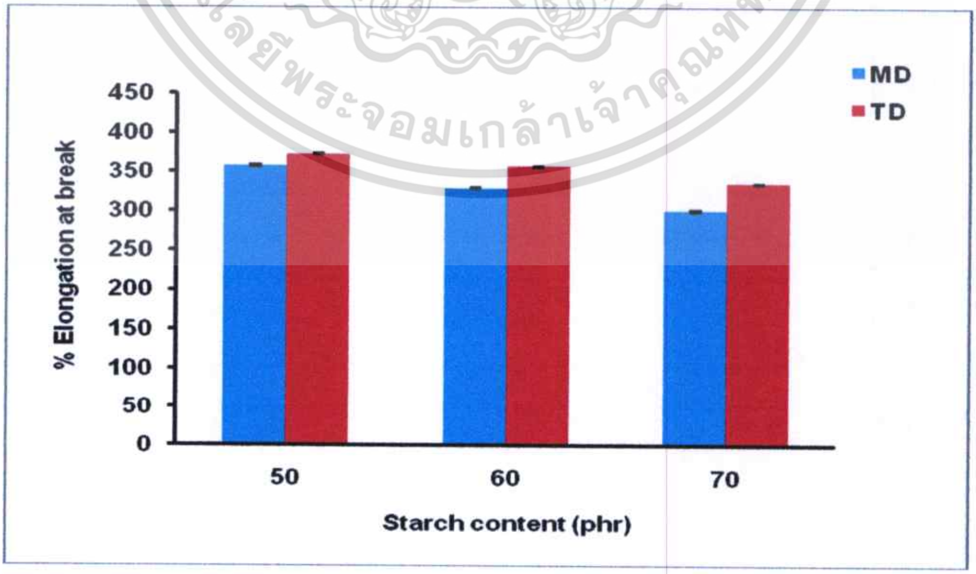
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PE/TPS ที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength ; σ), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus ; E) ทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) ตามมาตรฐาน ASTM D 882ได้ผลการทดสอบดังนี้

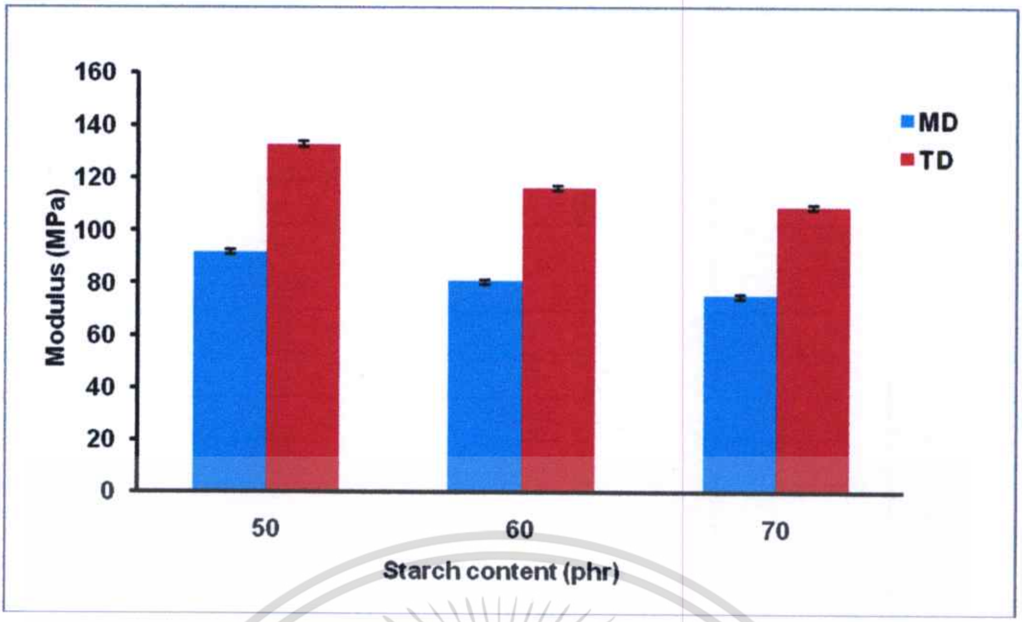


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้งต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้งต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ปริมาณแป้งต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

จากรูปที่ 4.8 – 4.10 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดุลัสลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลของสมบัติเชิงกลที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีนและผลทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่า แป้งมันสำปะหลังมีการกระจายตัวดีและสามารถเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับ LDPE/LLDPE จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดุลัสลดลงไม่มากนักเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงนั้นเนื่องจากเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (บริเวณที่สัมผัสกันระหว่างเม็ดแป้งกับ LDPE/LLDPE) ซึ่งบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคนี้เป็นจุดที่ทำให้เกิดการเสียสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก [44] ดังนั้นที่ปริมาณแป้ง 70 phr ซึ่งเป็นปริมาณแป้งสูงสุดจึงมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากที่สุดเช่นกัน ส่งผลให้ที่ปริมาณแป้ง 70 phr มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดุลัสต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการทดสอบฟิล์มทั้งใน 2 แนวแรงคือ แนวตามเครื่องจักรและในแนวขวางเครื่องจักรพบว่า สมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ทั้งในแนว MD และ TD เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น

จากการทดลองในการเลือกปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่จะนำไปใช้เตรียมฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS นั้นจะเลือกที่ปริมาณแป้ง 70 phr เพราะเป็นปริมาณแป้งที่สูงที่สุดสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ถึงแม้ว่าจะมีสมบัติเชิงกลต่ำ แต่หากเปรียบเทียบกันจะพบว่าที่ปริมาณแป้ง 70 phr มีค่าสมบัติเชิงกลต่างจากที่ปริมาณแป้ง 50 และ 60 phr เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และที่ปริมาณแป้ง 70 phr ทำให้ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าสูตรอื่นๆเนื่องจากมีปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า แต่ในกระบวนการผสมและเป่าขึ้นรูปพบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์ผสม LDPE/LLDPE/TPS มีความเปราะมากขึ้นด้วย ซึ่งทำให้เกิดปัญหาความไม่ต่อเนื่องกระบวนการผลิต ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงได้นำกลูเตนซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี รวมทั้งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

4.3 ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) และหาปริมาณกลูเตนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้

จากการทดลองเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ และเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ผลดังนี้

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการทดลองพบว่าในกระบวนการทำพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ในสูตรที่มีการเติมกลูเตนลงไปพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกมามีความหนืดมากขึ้นและมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สามารถดึงเป็นเส้นได้โดยไม่ขาดง่าย และพอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองอ่อนเหมือนกับสีของกลูเตน ตารางที่ 4.7 - 4.8 แสดงค่าดัชนีการหลอมไหลและลักษณะทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ และตารางที่ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) ที่เป่าขึ้นรูปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG)

สูตร	MFI (g/10 min)
PE/TPS+WG3	1.17 ± 0.26
PE/TPS+WG4	1.10 ± 0.31
PE/TPS+WG5	1.03 ± 0.19
PE/TPS+WG6	0.96 ± 0.25
PE/TPS+WG7	0.82 ± 0.37

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

สูตร	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้
PE/TPS+WG3	สังเกตเห็นมีความหนืดมากกว่าสูตรแป้งเนื่องจากสามารถดึงเป็นเส้นได้และขาดน้อยลง พอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองอ่อนๆ และมีกลิ่นคล้ายขนมปัง ที่ผิวเกิด shark skin เล็กน้อย
PE/TPS+WG4	สังเกตเห็นมีความหนืดขึ้นเนื่องจากสามารถดึงเป็นเส้นได้โดยไม่ขาดง่าย พอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองอ่อน และมีกลิ่นคล้ายขนมปัง ที่ผิวเกิด shark skin เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
PE/TPS+WG5	สังเกตเห็นมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสามารถดึงเป็นเส้นได้ต่อเนื่องโดยไม่ขาด พอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองเข้มขึ้น และมีคล้ายขนมปัง ที่ผิวเกิด shark skin เพิ่มขึ้น
PE/TPS+WG6	สังเกตเห็นมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสามารถดึงเป็นเส้นได้ต่อเนื่อง พอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองเข้มขึ้น และมีกลิ่นคล้ายขนมปัง มากขึ้น ที่ผิวเกิด shark skin เพิ่มมากขึ้นด้วย
PE/TPS+WG7	สังเกตเห็นมีความหนืดเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากสามารถดึงเป็นเส้นได้ต่อเนื่องโดยไม่ขาด พอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองเข้มขึ้นมาก และมีกลิ่นคล้ายขนมปัง ที่ผิวเกิด shark skin มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG)

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้
	เป่าได้	เป่าไม่ได้	
PE/TPS+WG3	√		สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ แต่ไม่ต่อเนื่องมากนัก ฟิล์มมีสีเหลืองอ่อนๆและมีกลิ่นคล้ายขนมปัง ฟิล์มยืดหยุ่นมากขึ้น
PE/TPS+WG4	√		สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ต่อเนื่องขึ้นแต่ขาดบ้าง มีฟองอากาศเกิดขึ้น ฟิล์มมีสีเหลืองอ่อน และมีกลิ่นคล้ายขนมปัง ฟิล์มยืดหยุ่นมากขึ้น
PE/TPS+WG5	√		สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ต่อเนื่องมีฟองอากาศเกิดขึ้นอยู่บ้าง ฟิล์มมีสีเหลืองและมีกลิ่นคล้ายขนมปัง ฟิล์มยืดหยุ่นมากขึ้น
PE/TPS+WG6	√		สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้แต่ไม่ต่อเนื่องเนื่องจากความหนืดสูงขึ้นมากทำให้ฟิล์มขาด ฟิล์มมีสีเหลืองและมีกลิ่นคล้ายขนมปัง
PE/TPS+WG7		√	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้เนื่องจากความหนืดของพอลิเมอร์ผสมสูงทำให้ไหลได้ยากขึ้น

จากตารางที่ 4.7-4.9 พบว่าเมื่อปริมาณกลูเตนเพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อใส่กลูเตนยังพบว่าในกระบวนการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่นั้นสามารถดึงเส้นพอลิเมอร์ผสม LDPE/LLDPE/TPS/WG ได้ยาวต่อเนื่องขึ้นและสามารถตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ เนื่องจากกลูเตนมีสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติก (Viscoelasticity) คือ ทั้งเหนียวหนืด (vicous) เหมือนของเหลวและยืดหยุ่น (elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกัน [24] จึงช่วยลดปัญหาความเปราะที่เกิดจากการใส่แป้งในปริมาณมากได้ การเพิ่มขึ้นของความหนืดและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมนั้นช่วยทำให้กระบวนการผลิตทำได้ง่ายและต่อเนื่องขึ้น แต่เมื่อปริมาณกลูเตนมากเกินไปความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลต่อกระบวนการผลิตเช่นกันโดยที่ความหนืดสูงๆพอลิเมอร์ผสมไหลได้ยากขึ้นทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องส่งผลให้เกิด shark skin ขึ้นในกระบวนการผสม และในการเป่าขึ้นรูปก็ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์ม LDPE/ LLDPE/TPS/WG ได้ (ที่ปริมาณกลูเตน 7 phr) ในการทดลองพบว่าที่ปริมาณกลูเตน 5 phr สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเนื่องมากที่สุด ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เป่าขึ้นรูปได้มีสีเหลืองเหมือนกับสีของกลูเตน โดยเข้มขึ้นตามปริมาณกลูเตนและมีกลิ่นกลูเตนซึ่งคล้ายกับกลิ่นขนมปัง นอกจากนี้การใส่กลูเตน สามารถช่วยให้ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ได้ย่อยสลายได้ดีขึ้นเพราะกลูเตนเป็นโปรตีนชนิด หนึ่งที่สามารถย่อยด้วยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ

4.3.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/gluten (PE/TPS/WG)

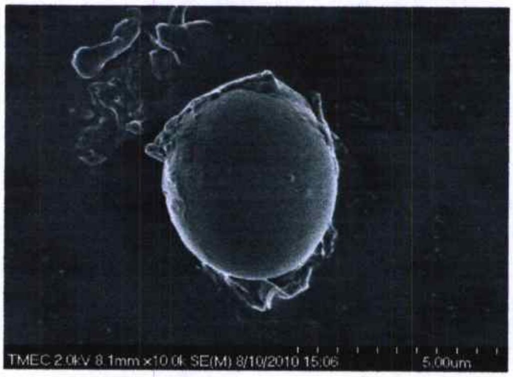
การศึกษาสัณฐานวิทยาเพื่อดูการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของแป้งและกลูเตนในพอลิเอทิลีนของฟิล์ม PE/TPS/WG ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นั้นแสดงดัง รูปที่ 4.11-4.12

(ข) (ค)

รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม(ก) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS (ข) ฟิล์มLDPE/LLDPE/TPS/WG3 และ (ค) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5

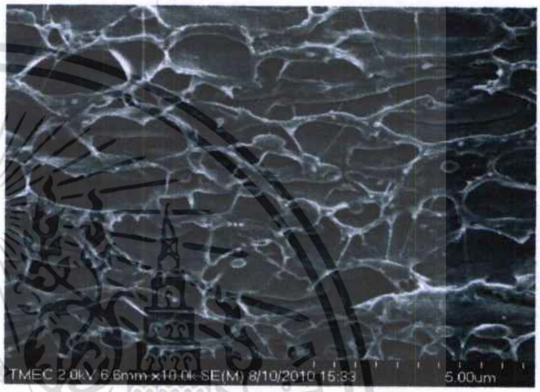
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)

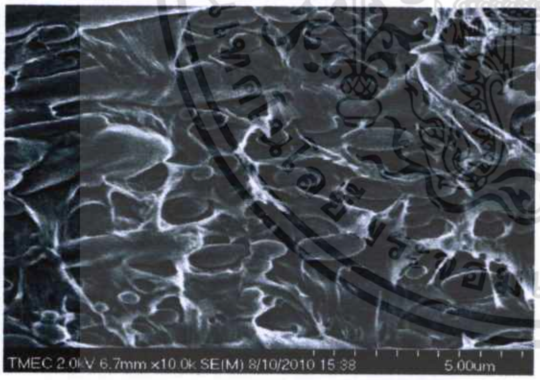


(ข)

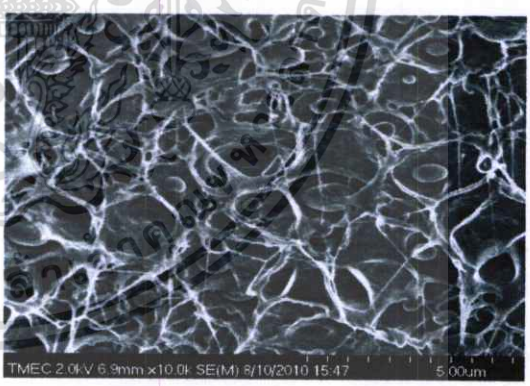
(ค)



(ง)



(ฉ)



(จ)

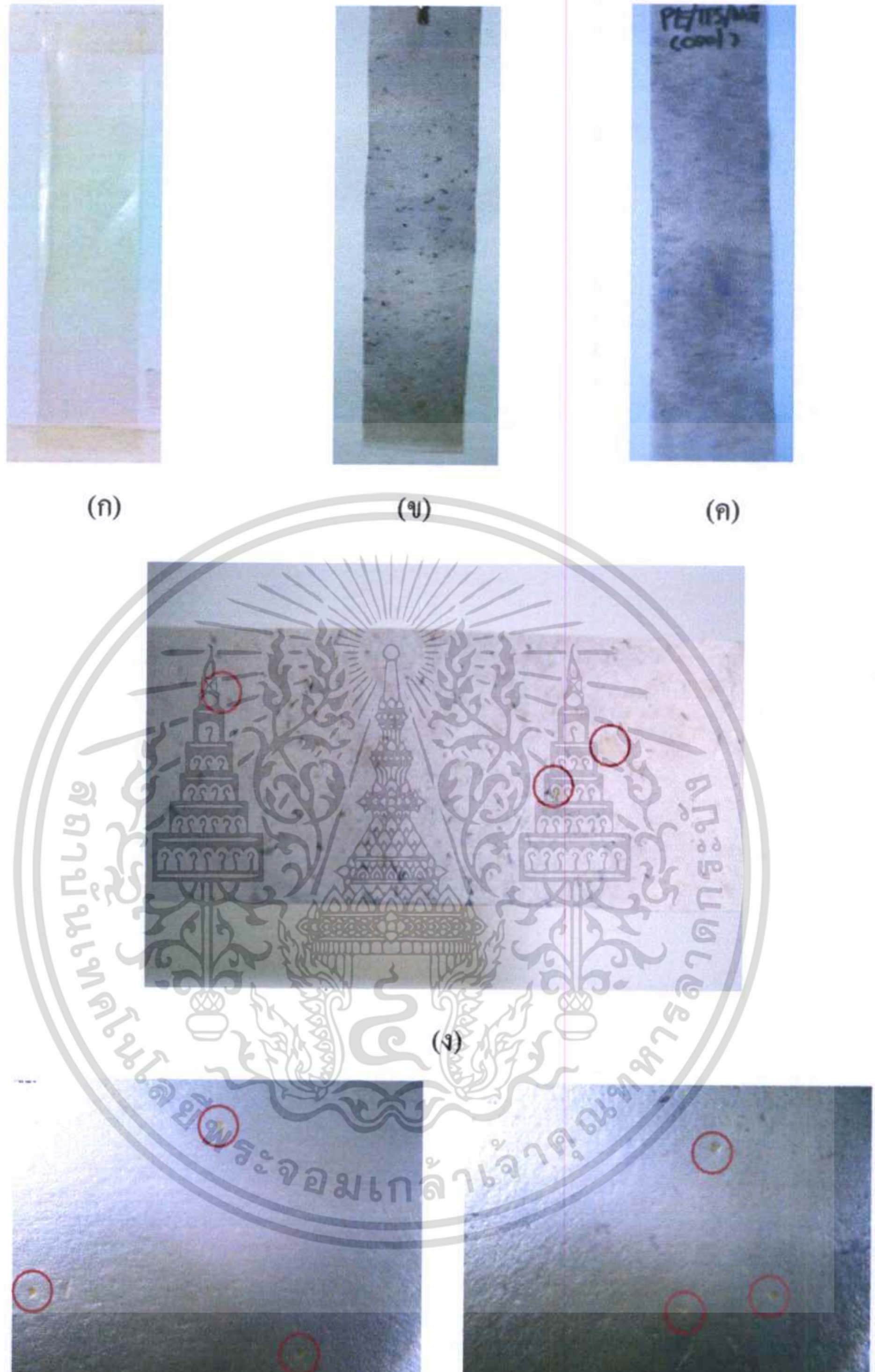
รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดแป้งและกลูเตนในฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG (ก) ลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (ข) และ(ค) รูปร่างและขนาดของกลูเตน (ง) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS (จ) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG3 และ (ฉ) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 สังเกตเห็นว่าแป้งมันสำปะหลังและกลูเตนมีรูปร่างค่อนข้างกลม แป้งมันสำปะหลังมีขนาดอนุภาคประมาณ 20 μm ส่วนกลูเตนมีขนาดอนุภาคประมาณ 3-12 μm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแป้งมันสำปะหลัง รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นบริเวณพื้นผิวของฟิล์มไม่เรียบโดยสังเกตเห็นมีอนุภาคกลมๆเล็กของแป้งและกลูเตนกระจายตัวอยู่ รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นการกระจายตัวของกลูเตนใน LDPE/LLDPE/TPS ได้ชัดเจนขึ้น โดยจากรูปจะเห็นได้ว่า กลูเตนแทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ LDPE/LLDPE/TPS และมีการกระจายตัวที่ดี แต่เมื่อปริมาณกลูเตนที่มากขึ้นจะทำให้กลูเตนเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแล้วไม่กระจายตัว เนื่องจากเกิดความแตกต่างของโครงสร้างมีมากขึ้น แล้วส่งผลให้โครงสร้างที่เหมือนกันรวมตัวกัน [53] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกลูเตนจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐานของ LDPE/LLDPE แต่อาจจะมีบางส่วนที่แทรกตัวอยู่ในส่วนของโครงผลึกของ LDPE/LLDPE แต่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติทางความร้อนที่พบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึก (% crystallinity) และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อมีการเติมกลูเตนลงไป (ค่าร้อยละความเป็นผลึก และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 และรายละเอียดอื่นๆได้อธิบายไว้ในหัวข้อสมบัติทางความร้อน)

นอกจากนี้กลูเตนสามารถเกิดเจลได้หากผสมกับกลีเซอรอล [61] เช่นเดียวกับแป้งแต่เนื่องจากในการผสมนั้นไม่ได้มีการผสมกลูเตนกับกลีเซอรอลเอาไว้ก่อนเหมือนกับแป้ง จึงทำให้กลูเตนมีโอกาสเกิดเจลได้น้อยและในการทดลองใช้กลูเตนในปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับแป้ง ดังนั้นกลูเตนจึงเพียงแต่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม หรืออาจเกิดเพียงแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบบพันธะไฮโดรเจนกับแป้งและกลีเซอรอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เท่านั้นเนื่องจากกลูเตนมีหมู่อะมิโน (NH_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ในโครงสร้าง ในการทดสอบฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ได้ด้วยสารละลายไอโอดีนเพื่อดูผลของกลูเตนที่มีการกระจายตัวของแป้งนั้นพบว่า เมื่อเติมกลูเตนลงไปทำให้การกระจายตัวของแป้งใน LDPE/LLDPE/TPS/WG มีความต่อเนื่องลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจากรูปสังเกตขึ้นได้ว่า สีม่วงอมน้ำเงินที่เกิดจากส่วนของแป้งทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีน ส่วนกลูเตนไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS แต่ก็ยังถือได้ว่าแป้งยังมีการกระจายที่ดีอยู่เพราะจากรูป 4.13 สีม่วงอมน้ำเงินเกิดขึ้นทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม ทั้งนี้เพราะกลูเตนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าแป้งจึงเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้ การกระจายตัวของแป้งเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สีของ (ก) ฟิล์ม LDPE/LLDPE , (ข) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS , (ค) และ (ง) ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG หลังการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน, (จ) และ (ฉ) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีนของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 สมบัติทางความร้อน

ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PE/TPS/WG เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว (Tm) อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก (Tc_{onset}) ค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามมาตรฐาน ASTM E 794 และวิเคราะห์หาอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว (Td onset) ภายใต้ภาวะบรรยากาศของไนโตรเจนตามมาตรฐาน ASTM E 1131 ได้ผลดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ส่วนการวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวแป้ง กลูเตน และพอลิเอทิลีน ด้วยเทคนิค Thermo-gravimetric analysis (TGA) ภายใต้ภาวะบรรยากาศของไนโตรเจนตามมาตรฐาน ASTM E 1131 ได้ผลดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.10 ค่าเริ่มต้นอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มตกผลึก ร้อยละความเป็นผลึก และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จากเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC)

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว, Tm (°C)	อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก, Tc onset (°C)	ค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity)	พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก(ΔH_f)
PE/TPS	112	97	30.43	84.00
PE/TPS+WG3	114	97	31.72	87.54
PE/TPS+WG4	115	97	29.07	80.23
PE/TPS+WG5	115	97	25.82	71.27
PE/TPS+WG6	114	97	26.72	73.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของกลีเซอรอล (°C)	อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของแป้ง (°C)	อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของพอลิเอทิลีน (°C)
Cassava starch	-	303	-
Glycerol	149	-	-
PE/TPS	149	302	455
PE/TPS+WG3	159	302	458
PE/TPS+WG4	161	303	458
PE/TPS+WG5	159	303	458
PE/TPS+WG6	160	303	458

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (Tm) และอุณหภูมิเริ่มการตกผลึก (Tc onset) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมกลูเตนเมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่ไม่ได้เติมกลูเตน ค่าอุณหภูมิทั้งสองไม่เปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเห็นได้ว่าการเติมกลูเตนลงไปนั้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิทั้งสอง แต่ส่งผลต่อค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) โดยพบว่า ฟิล์มที่มีการเติมกลูเตนนั้นจะมีค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) ลดลงเล็กน้อย เพราะการเติมกลูเตนนั้นทำให้เกิดรอยต่อของวัฏภาคมากขึ้นโดยกลูเตนไปแทรกตัวอยู่ในส่วนอสัณฐาน (amorphous) อีกทั้งกลูเตนสามารถเกิดเป็นเจล [61] หรือพันธะไฮโดรเจนกับแป้งและกลีเซอรอล เพราะในโครงสร้างของกลูเตนหมู่อะมิโน(NH_2) และหมู่คาร์บอกซิลิกแอซิด (COOH) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีน การเกิดพันธะไฮโดรเจนนั้นไม่ได้ทำให้ส่วนที่เป็นผลึกเปลี่ยนแปลง แต่จะทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลว (Tm) ของกลูเตนเพิ่มขึ้น แต่หากเปรียบเทียบปริมาณกลูเตนที่เติมลงไปนั้นค่อนข้างน้อยมากจึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิดังกล่าว

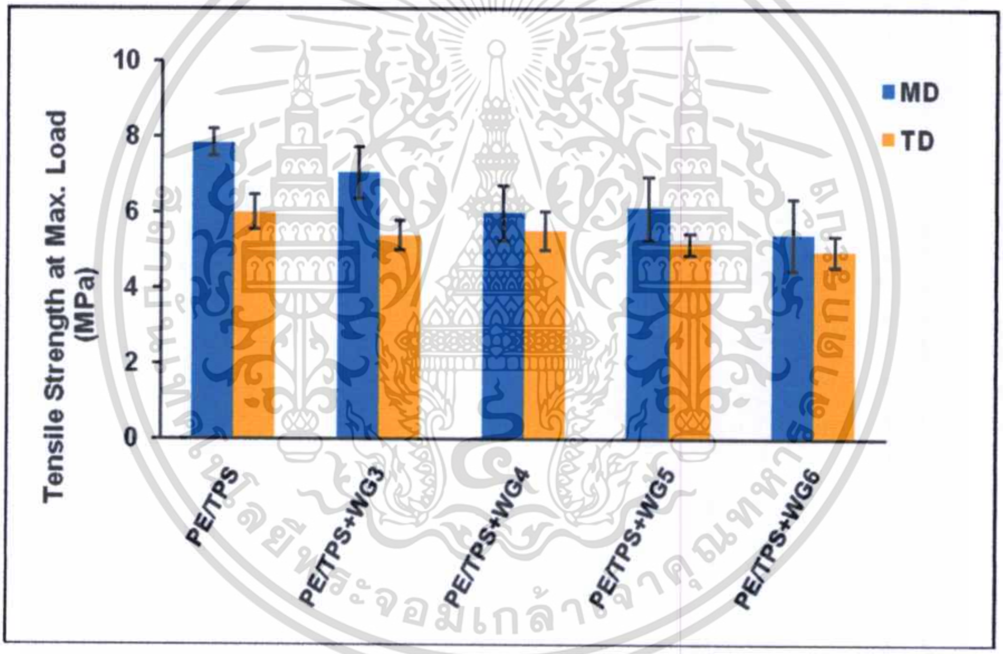
ส่วนเมื่อเติมกลูเตนแล้วทำให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) และค่าพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณกลูเตนมากขึ้นจะขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเอทิลีนมากขึ้นด้วยทำให้การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเอทิลีนลดลงจึงเกิดผลึกลดลง จากตารางที่ 4.11 ค่าสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จากเทคนิค TGA พบว่า ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของแป้ง กลีเซอรอล และพอลิเอทิลีนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมกลูเตน จากเทอร์โมแกรม TGA (ภาคผนวก ก.) ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกลูเตนเท่ากับ 270 °C แต่อุณหภูมิที่กลูเตนมีการสลายตัวมากที่สุดอยู่ที่ 299 °C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของแป้ง ดังนั้นจึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรม TGA อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของกลูเตน แต่จะเห็นอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของกลูเตนรวมกับของแป้ง

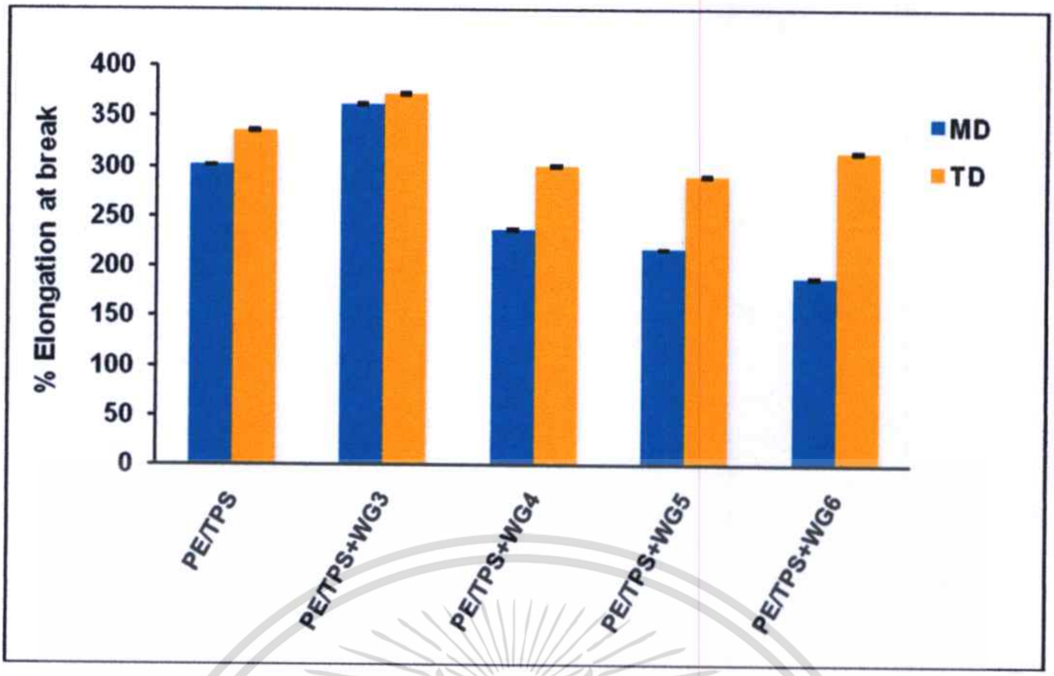
4.3.4 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ได้ด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง(Tensile strength ; σ), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus ; E) ทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) ตามมาตรฐาน ASTM D 882ได้ผลการทดสอบดังนี้

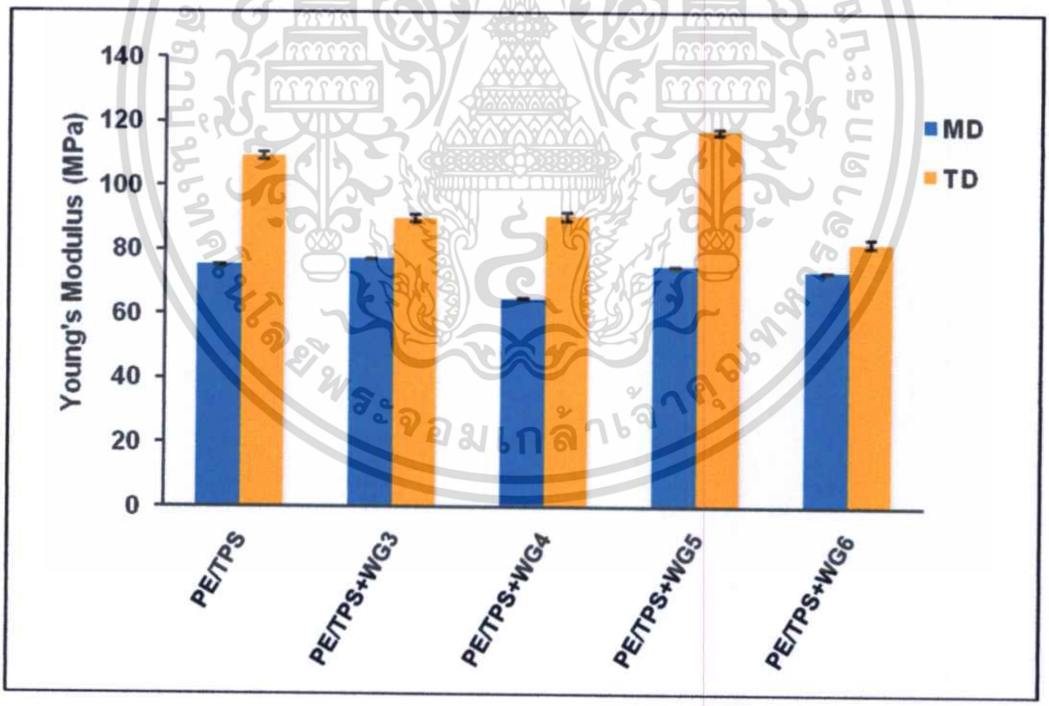


รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.16 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีการเติมกลูเตนพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งแนวเครื่องจักร (MD) และ

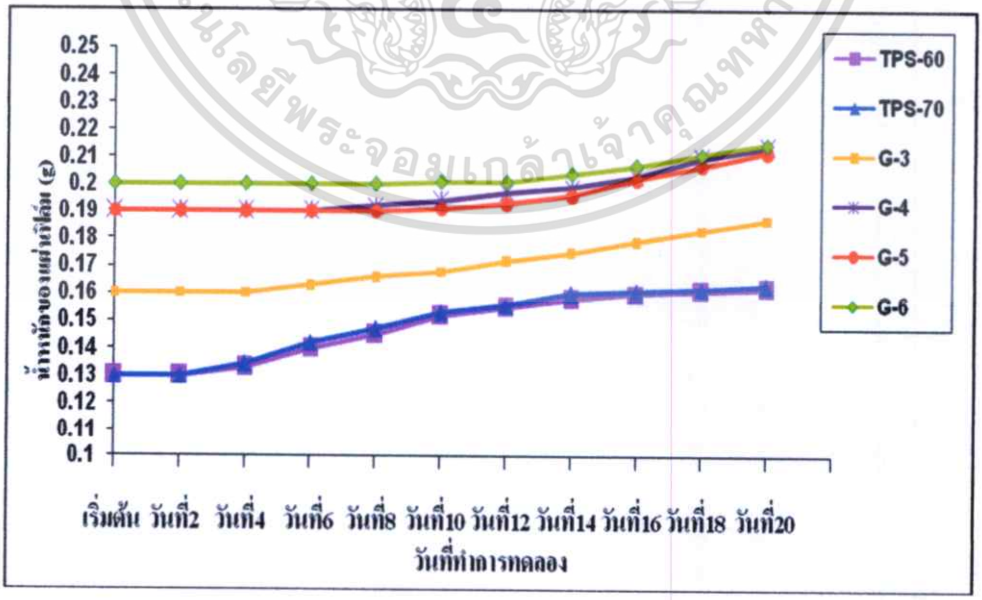
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวขวางเครื่องจักร (TD) เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมกลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS) ดังรูปที่ 4.14 - 4.16 เนื่องจากในขณะนี้มีอนุภาคอยู่ทั้งหมด 3 ชนิดจึงเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากยิ่งขึ้นซึ่งบริเวณนี้เป็นจุดที่ก่อให้เกิดการเสียสภาพเมื่อมีแรงมากระทำ แต่ปริมาณกลูเตนที่เติมลงไปนั้นมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนและแป้ง จึงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆลดลงไม่มากนัก และนอกจากนี้ในฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG กลูเตนนั้นมีความเข้ากันได้กับ LDPE/LLDPE/TPS เพียงทางกายภาพโดยกลูเตนกระจายตัวอยู่ทั่วๆไปใน LDPE/LLDPE/TPS ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบบพันธะไฮโดรเจนเท่านั้นซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกลูเตน กับ LDPE/LLDPE/TPS ดังนั้นจึงส่งผลให้ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG มีความแข็งแรงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลเฉพาะของฟิล์มที่เติมกลูเตนพบว่า ปริมาณกลูเตนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังลดลง เนื่องจากปริมาณกลูเตนที่มากเกินไปนั้น จะทำให้กลูเตนเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแล้วไม่กระจายตัวส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง [53] แต่จะเห็นว่าค่าสมบัติเชิงกลลดลงไม่มากนัก หากพิจารณาจากกระบวนผลิตและสมบัติเชิงกลพบว่า ที่ปริมาณกลูเตน 5 phr เหมาะสมต่อการนำไปช่วยปรับปรุงฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ที่สุด

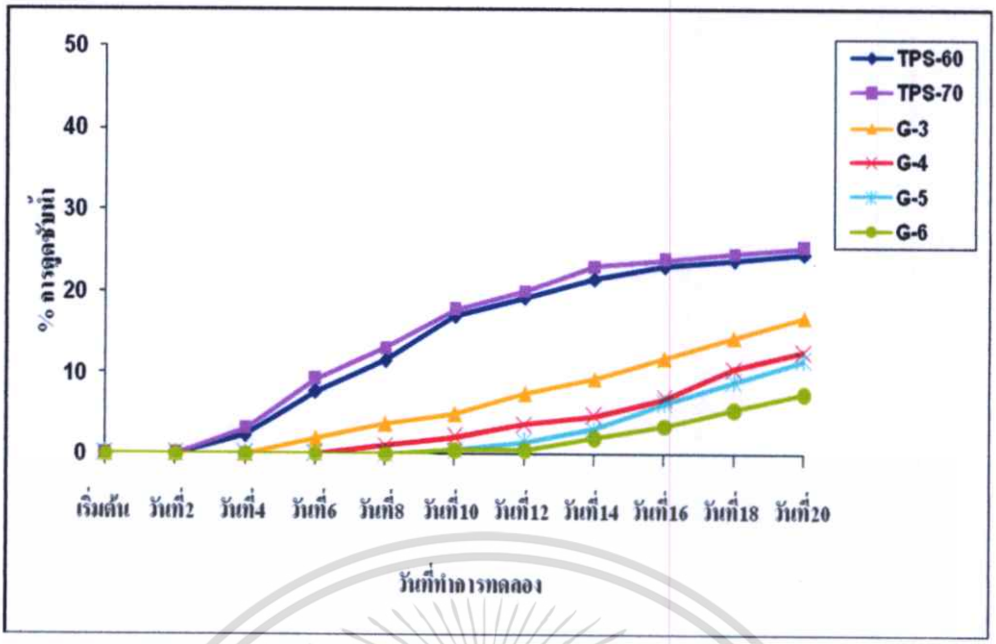
4.3.5 การดูดซับน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำ

จากการทดสอบการดูดซับน้ำของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จำนวน 20 วันแล้วคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์การดูดซับน้ำได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.17 น้ำหนักของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆ

ตารางที่ 4.12 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG

สูตร	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g.μm/m^2.day)
TPS	1954
TPS+WG5	1379

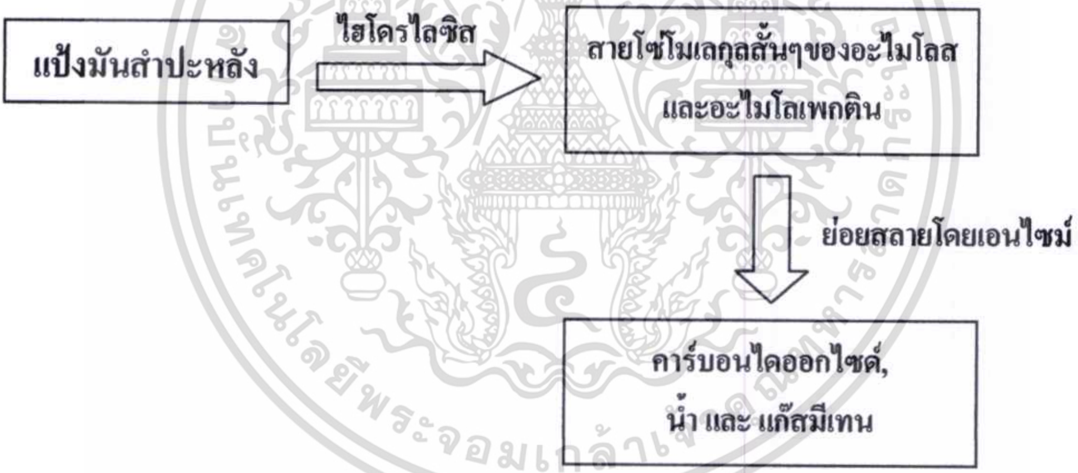
จากการรูปที่ 4.17 - 4.18 และตารางที่ 4.12 พบว่าการดูดซับน้ำและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ลดลงเมื่อปริมาณกลูเตนเพิ่มขึ้นเพราะกลูเตนมีสมบัติทนต่อการซึมผ่านของน้ำและก๊าซ [27] แป้งมันสำปะหลังที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในฟิล์มนั้นมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงสามารถดูดซับน้ำได้ดีโดยเฉพาะที่ปริมาณแป้งสูงๆ แต่เนื่องจากกลูเตนเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ถึงแม้กลูเตนจะมีหมู่อะมิโนที่มีขั้วแต่เพราะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงทำให้กลูเตนไม่ละลายน้ำ เมื่อกลูเตนกระจายตัวอยู่บริเวณผิวของฟิล์มจึงทำให้ฟิล์มดูดซับน้ำและมีการซึมผ่านของไอน้ำน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 การทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

จากการทดสอบสมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังชิ้นงานในดินจะใช้ภาวะจริงตามธรรมชาติเป็นเวลา 6 เดือน โดยเก็บตัวอย่างฟิล์มออกมาสังเกตการย่อยสลายทุกๆ 2 สัปดาห์ พบว่าฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS และ ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG เกิดการย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน ซึ่งสังเกตได้จากผิวชิ้นงานทดสอบมีรอยดำและรอยสีส้มของจุลินทรีย์เกิดขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups, OH) จำนวนมาก ซึ่งมีความเป็นขั้วสูงยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้สามารถดูดซึมความชื้นได้มากขึ้น [55] โดยความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ชีวภาพ (Hydrolysis) ด้วยจุลินทรีย์ซึ่งมีกลไกการย่อยสลายจากการฝัง ดินอยู่ 2 ขั้นตอนดังนี้ [56]

- ขั้นที่ 1 น้ำจะแพร่เข้าไป เป็นผลให้ฟิล์มเกิดการบวมและเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นที่ผิวของฟิล์ม
- ขั้นที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์



รูปที่ 4.19 ขั้นตอนการเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพของแป้ง[62]

จากขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพของแป้งจะเห็นได้ว่าความชื้นมีความสำคัญต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งที่เป็นสายโซ่ยาวๆของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีขนาดสั้นลง จากนั้นจุลินทรีย์ที่อยู่ในธรรมชาติจะสามารถย่อยสายโซ่สั้นๆเหล่านี้ได้โดยการปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยจนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) และแก๊สมีเทน (CH_4) ดังนั้นความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS และ ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG จึงขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งที่เป็นองค์ประกอบโดยถ้ามีปริมาณแป้งมากก็จะเกิดการย่อยสลายได้มากด้วยเช่นกันซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรที่มีปริมาณแป้งมากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ (แป้ง 70 phr) มาใช้เตรียมฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS

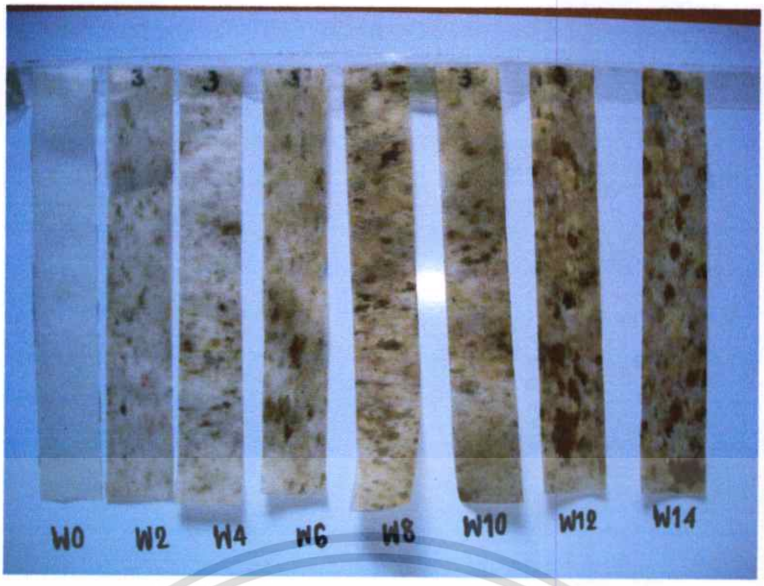
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

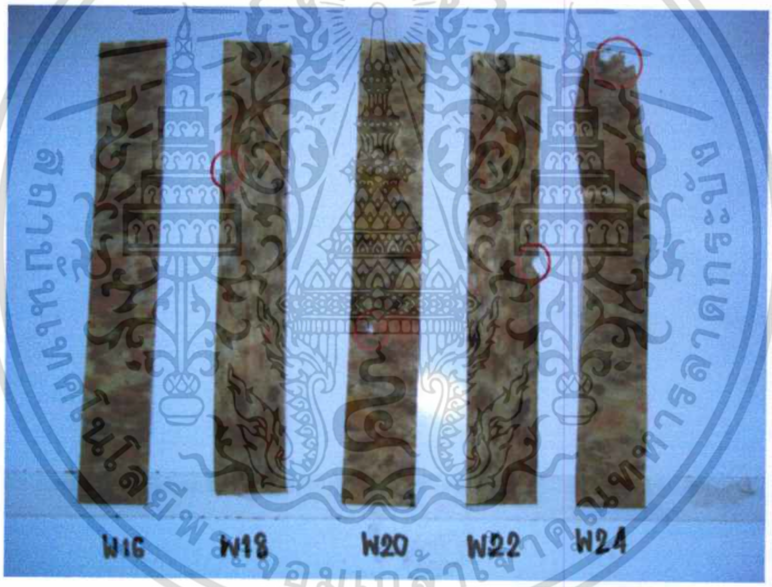
และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG นอกจากนี้ฟิล์ม PE/TPS/WG ที่มีกลูเตนผสมอยู่ก็เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้เช่นเดียวกับฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS ถึงแม้ว่ากลูเตนจะทำให้ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG เกิดการดูดซับน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำได้ลดลงก็ตามแต่กลูเตนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จึงสามารถเกิดการย่อยสลายได้เช่นเดียวกับแป้ง และช่วยให้ฟิล์มมีการย่อยสลายได้ดีขึ้นเมื่อกลูเตนถูกย่อยสลายทำให้ฟิล์มสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นจึงเกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น (เนื่องจากปริมาณกลูเตนที่ใส่มีปริมาณน้อย)

การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มที่ทำการทดสอบการย่อยสลายนั้นสามารถสังเกตได้ชัดเจนตั้งแต่สัปดาห์ที่ 12 เป็นต้นไปโดยพบว่า ที่ผิวฟิล์มมีรูเล็กๆหรือมีรอยขาดซึ่งเกิดขึ้นจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ รวมทั้งสีของฟิล์มที่ทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.20

(ก)

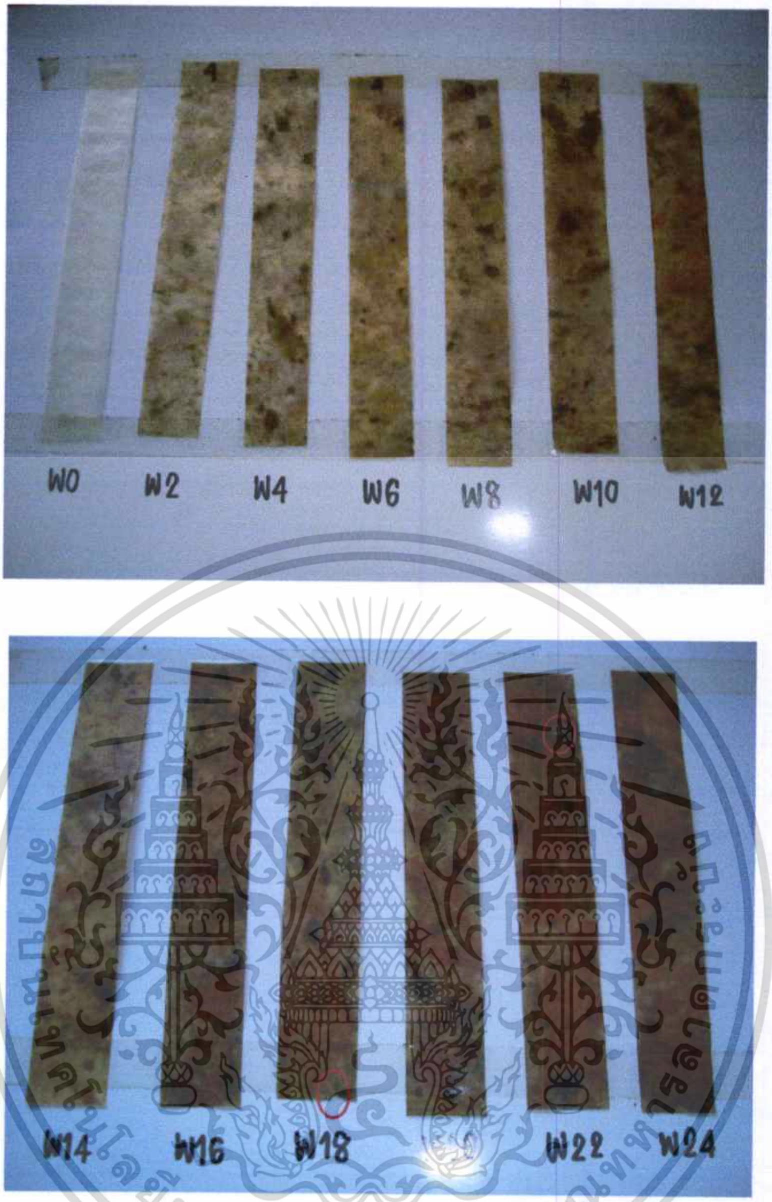
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





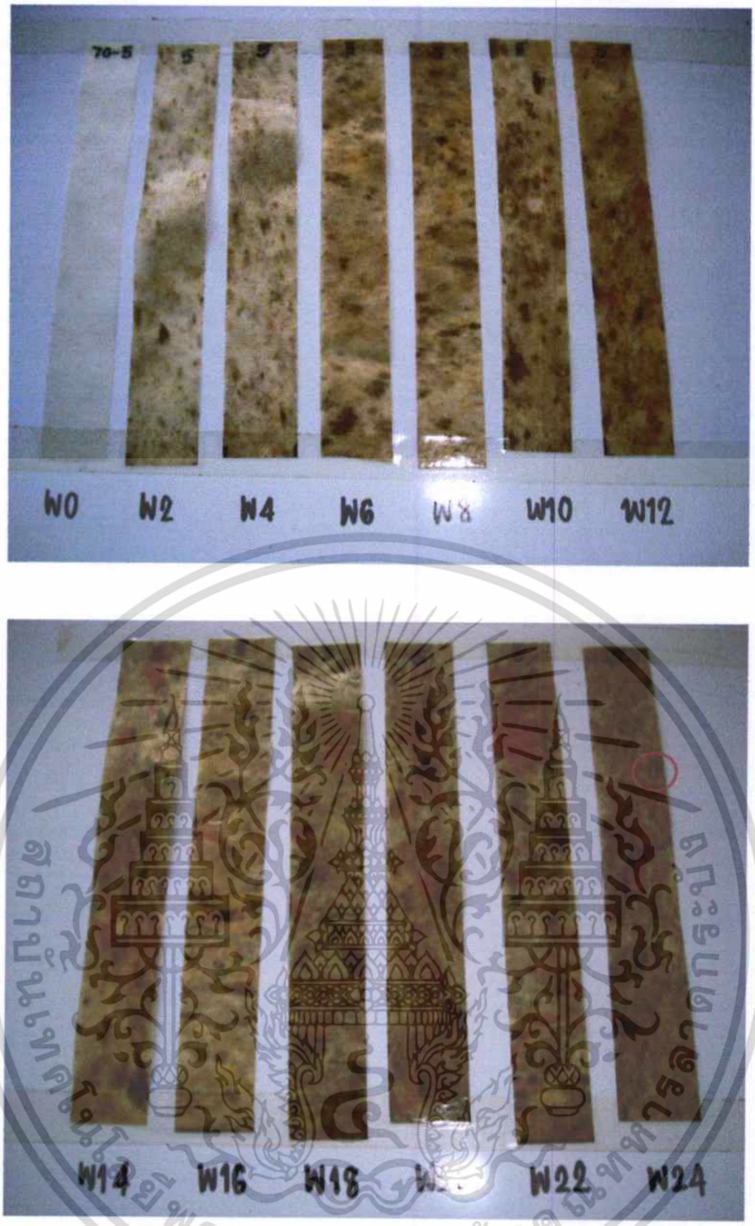
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



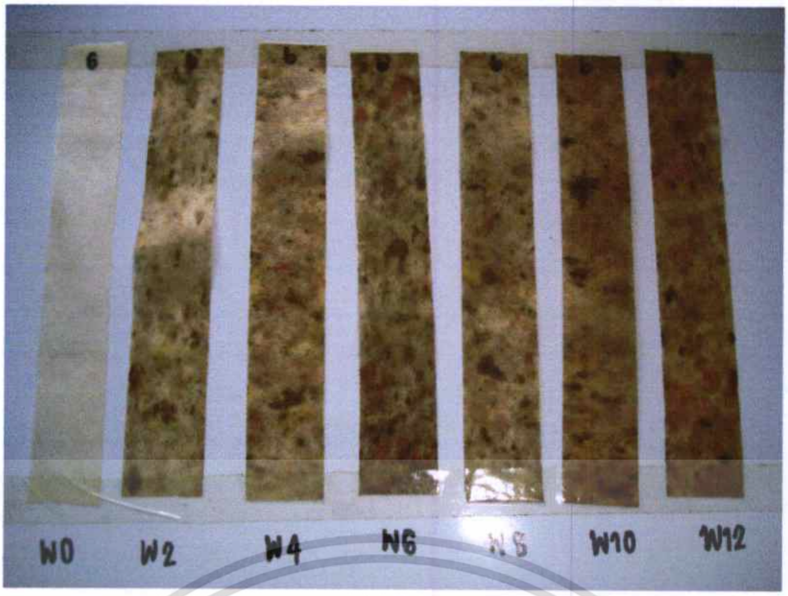
(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



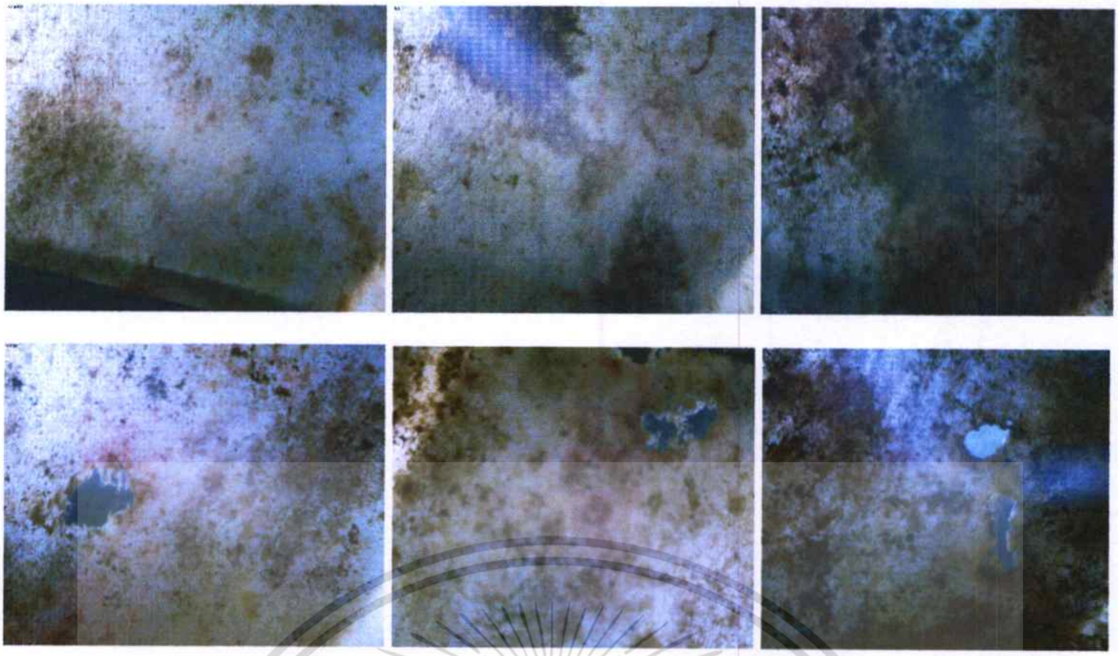
(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ)

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยวิธีการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ (ก) LDPE/LLDPE/TPS, (ข) LDPE/LLDPE/TPS/WG3, (ค) LDPE/LLDPE/TPS/WG4, (ง) LDPE/LLDPE/TPS/WG 5 และ(จ) LDPE/LLDPE/TPS/WG6 (ฉ) ภาพการเกิดรอยดำ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และรอยขาดที่เกิดขึ้นกับฟิล์มที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยวิธีการฝังดินที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

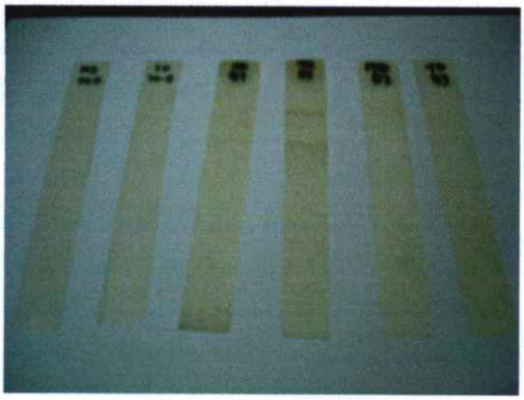
4.4 ผลของเบนโซฟีโนนที่มีต่อการย่อยสลายทางแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/gluten (PE/TPS/WG)

จากการทดสอบการย่อยสลายทางแสงด้วยการฉายรังสี UV ของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (PE/TPS/WG) ที่มีการเติมเบนโซฟีโนนได้ผลดังนี้

4.4.1 ลักษณะทางกายภาพ

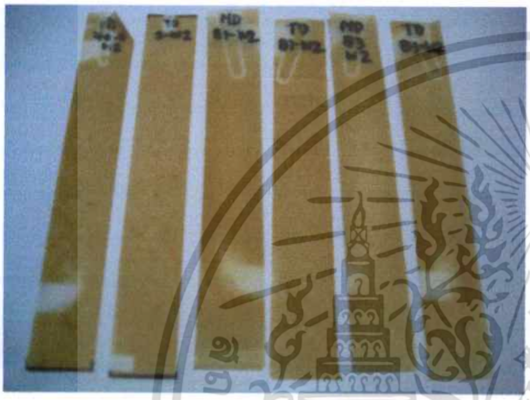
ฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสี UV เป็นเวลา 4 เดือนมีสีเหลืองเข้มขึ้น และมีความเปราะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายทางแสงทำให้ฟิล์มขาด โดยเฉพาะในช่วงเดือนที่ 3-4 ดังรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

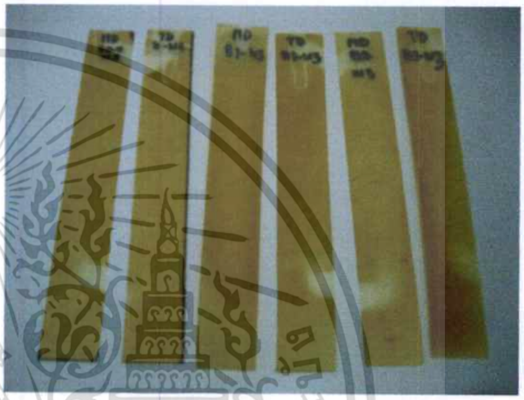


(ก) เริ่มต้น

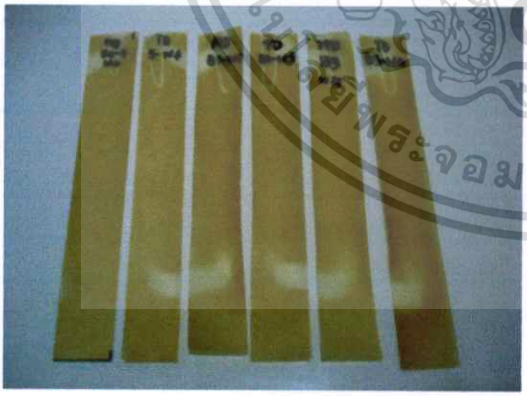
(ข) สัปดาห์ที่ 2



(ค) สัปดาห์ที่ 4



(ง) สัปดาห์ที่ 6



(จ) สัปดาห์ที่ 8

(ฉ) สัปดาห์ที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ช) สัปดาห์ที่ 12

(ซ) สัปดาห์ที่ 14

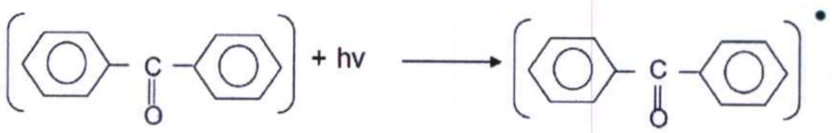
(ฌ) สัปดาห์ที่ 16

รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ผ่านการฉายรังสียูวี (UV radiation) เป็นเวลา 16 สัปดาห์ โดยเก็บฟิล์มตัวอย่างทุกๆ 2 สัปดาห์ (ก)-(ฌ)

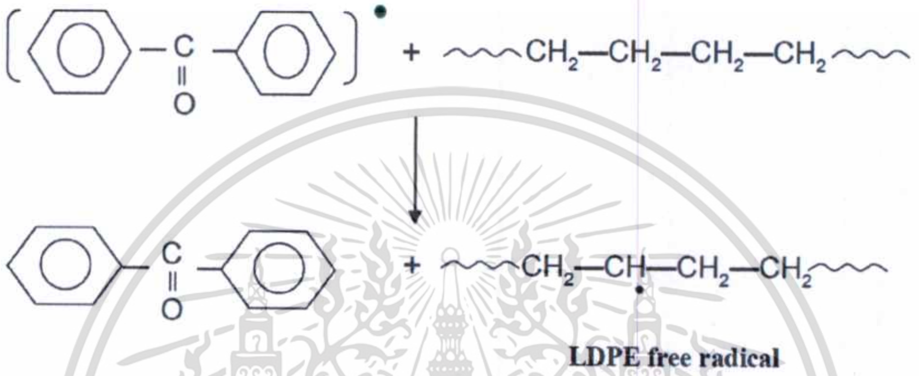
จากรูปที่ 4.21 สังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มมีสีเหลืองเข้มขึ้นมาก กรอบและเปราะขาดได้ง่าย เนื่องจากเกิดการย่อยสลายทางแสง โดยสูตรที่มีการเติมเบนโซฟีโนนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเพราะเบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางแสงของพอลิเอทิลีน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระในสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และเกิดการตัดขาดของสายโซ่ [44] ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

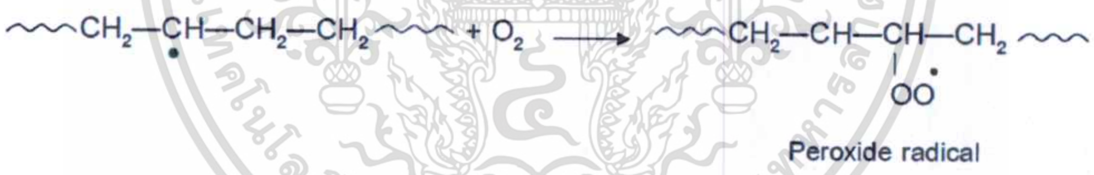
เมื่อเบนโซฟีโนนได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงยูวีจนเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะกระตุ้น



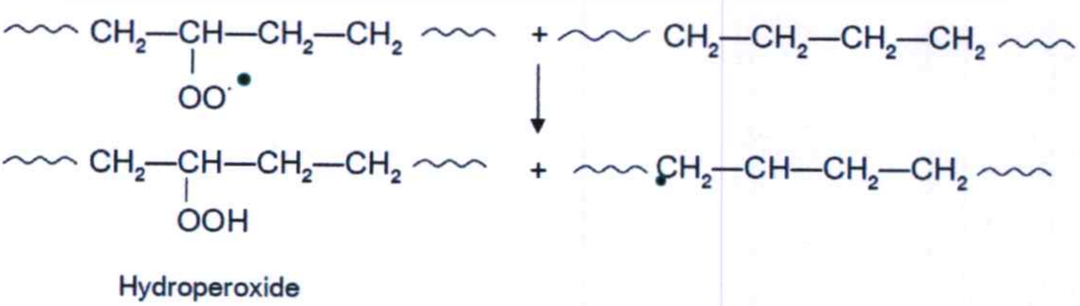
เบนโซฟีโนในสถานะกระตุ้นจะทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนจนเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่



พอลิเอทิลีนที่มีอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์แรดิคอล (ROO*)

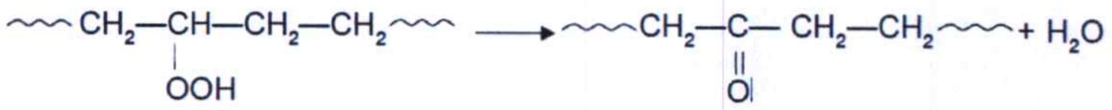


เปอร์ออกไซด์เรดิคอลทำปฏิกิริยาดึงไฮโดรเจนจากสายโซ่พอลิเมอร์โมเลกุลอื่น จนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH)

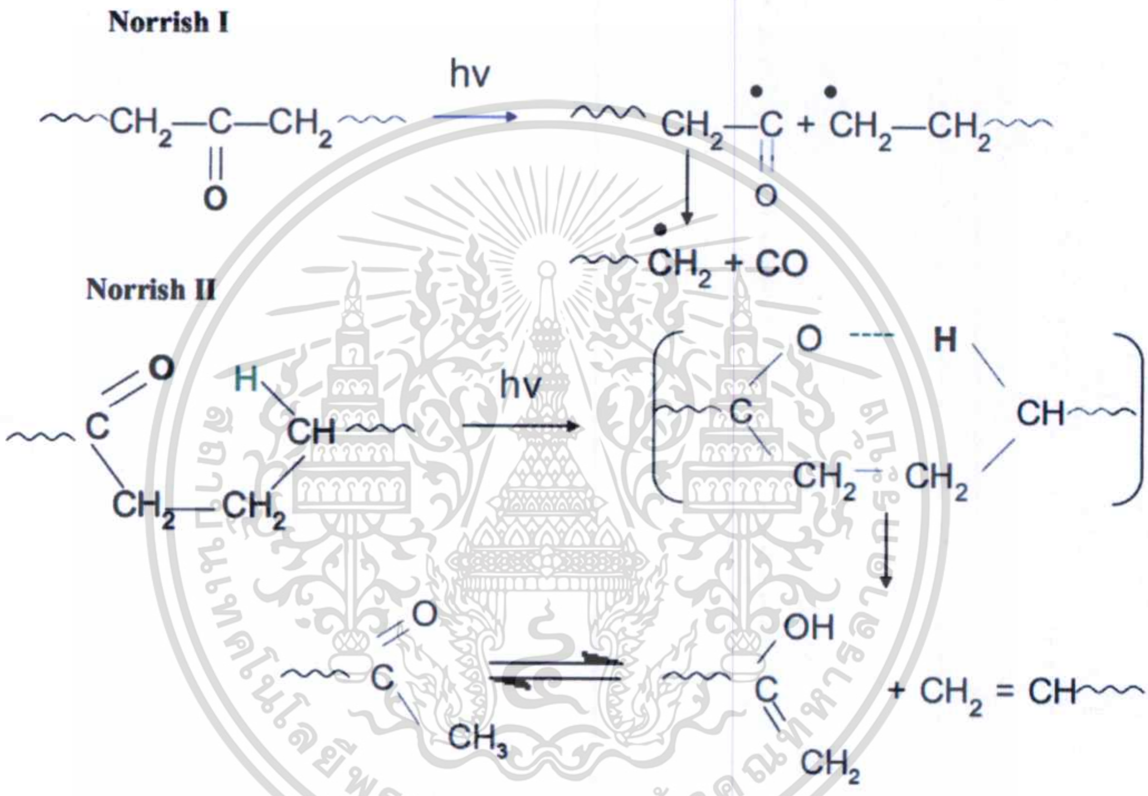


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ทำให้พอลิเอทิลีนสลายตัวจนเกิดหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้าง



พอลิเอทิลีนที่มีหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้างจะเกิดการสลายตัวโดยผ่านกระบวนการ นอร์ริชชนิดที่ 1 หรือ 2



จากปฏิกิริยาดังกล่าวเห็นได้ว่าเบนโซฟีโนนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงทำให้ไม่เสถียร จึงเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะกระตุ้นและเกิดอนุมูลอิสระ จากนั้นเบนโซฟีโนนที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเอทิลีนจึงเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่พอลิเอทิลีน โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์แรดิคอล (ROO*) แล้วทำปฏิกิริยาดึงไฮโดรเจนจากสายโซ่โมเลกุลอื่น สุดท้ายทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิล และสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลคีนขึ้นภายในสายโซ่พอลิเอทิลีน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟาเรด (FTIR) ดังรูปที่ 4.22-4.26 ที่พบว่า เมื่อฟิล์มได้รับรังสียูวีทำให้มีค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล (C=O stretching) และค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 1300-1450 cm^{-1} ที่เป็นช่วงการดูดกลืนของ CH_2 bending มากขึ้น

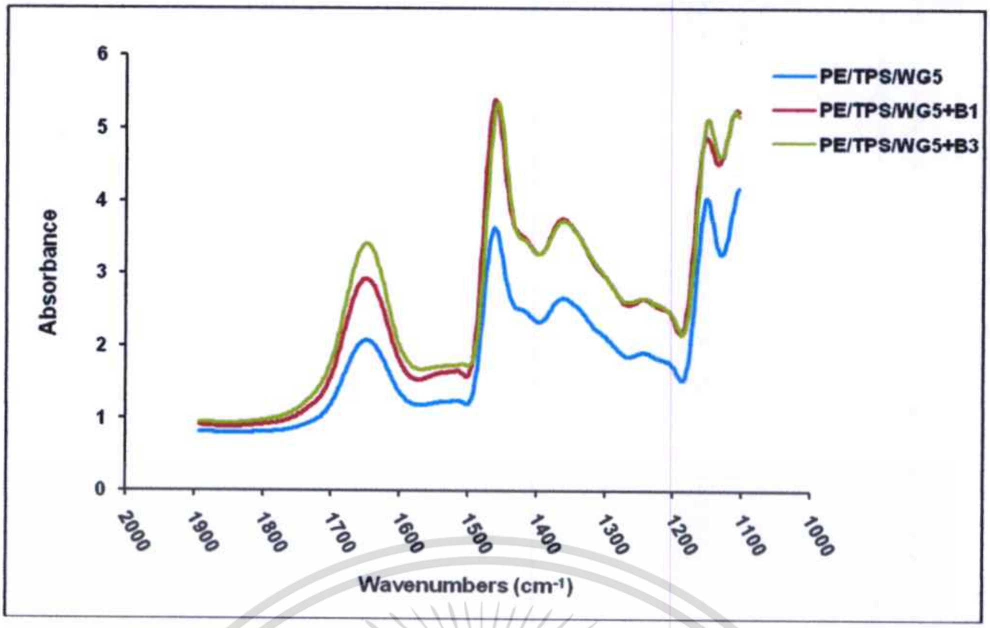
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเมื่อนำค่ามาคำนวณค่าดัชนีคาร์บอนิล (carbonyl index; CI) ได้ดังรูปที่ 4.27 และหากเปรียบเทียบสูตรที่ไม่เติมเบนโซฟีโนน (LDPE/LLDPE/TPS/WG5) กับสูตรที่เติมเบนโซฟีโนน (LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 และ LDPE/LLDPE/TPS/WG5B3) พบว่า สูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5 มีค่าดัชนีคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นน้อยกว่าสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 และ LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเบนโซฟีโนนช่วยให้การย่อยสลายทางแสงเกิดได้มากขึ้น

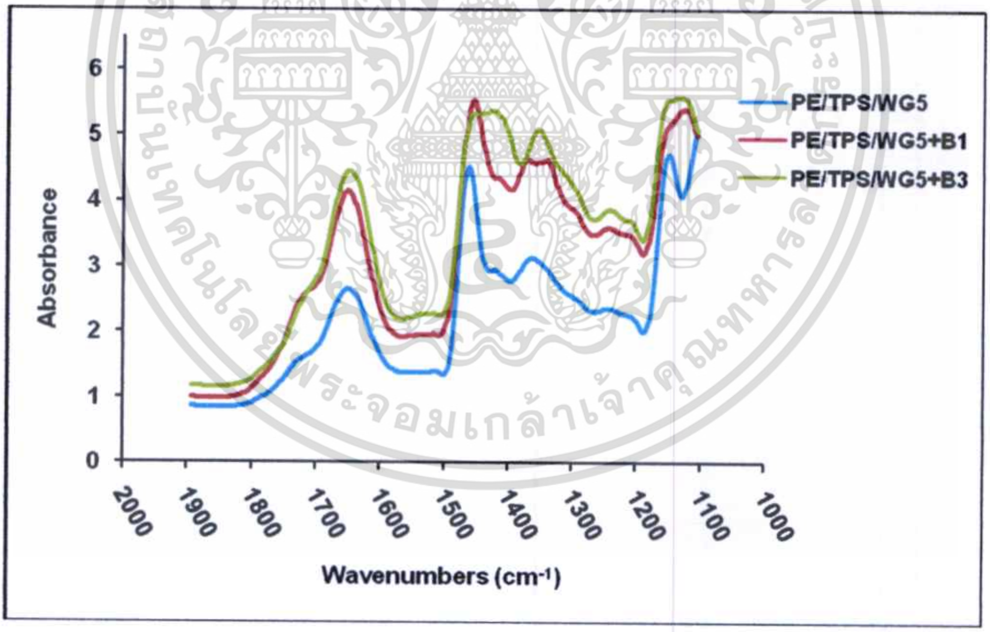
นอกจากนี้ปริมาณเบนโซฟีโนนก็มีผลต่อการย่อยสลายทางแสงเช่นกันซึ่งหากเปรียบเทียบสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 และ LDPE/LLDPE/TPS/WG5B3 พบว่า สูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 ที่มีปริมาณเบนโซฟีโนน 3 phr มีการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีคาร์บอนิลมากกว่าสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 ที่มีปริมาณเบนโซฟีโนนเพียง 1 phr

ในการย่อยสลายทางแสงนอก จากการเกิดหมู่คาร์บอนิลขึ้นในโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ ทำให้ฟิล์มมีสีเหลืองเข้มขึ้น ยังเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเอทิลีนขึ้นอีกด้วยซึ่งสอดคล้องกับผลสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 4.28-4.33 ซึ่งพบว่า ภายหลังการฉายรังสียูวีเป็น 2 เดือน (ในเดือนที่ 3-4 ไม่สามารถทดสอบสมบัติเชิงกลได้เนื่องจากฟิล์มบิดเป็นเกลียวและเปราะขาด) ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของฟิล์มทั้งแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ลดลง โดยหากเปรียบเทียบสูตรที่ไม่เติมเบนโซฟีโนน (LDPE/LLDPE/TPS/WG5) กับสูตรที่เติมเบนโซฟีโนน (LDPE/LLDPE/TPS/WG5B1 และ LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3) พบว่าสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5 มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสลดลงน้อยกว่าสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 และLDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเบนโซฟีโนนพบว่า สูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 ที่มีปริมาณเบนโซฟีโนน 3 phr มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสลดลงมากกว่าสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 ซึ่งช่วยยืนยันผลของเบนโซฟีโนนที่มีต่อการย่อยสลายทางแสงเช่นเดียวกับลักษณะทางกายภาพและค่าดัชนีคาร์บอนิล และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการย่อยสลายทางแสงนั้นสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ภายหลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 1 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

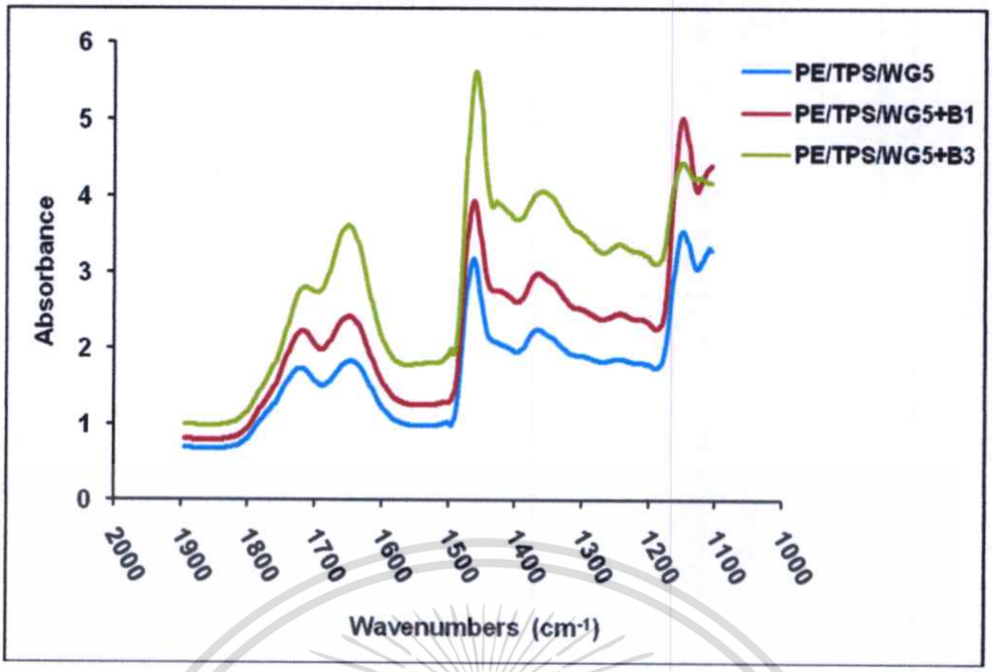


รูปที่ 4.22 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} ก่อนการฉายรังสียูวี จากเทคนิค FTIR

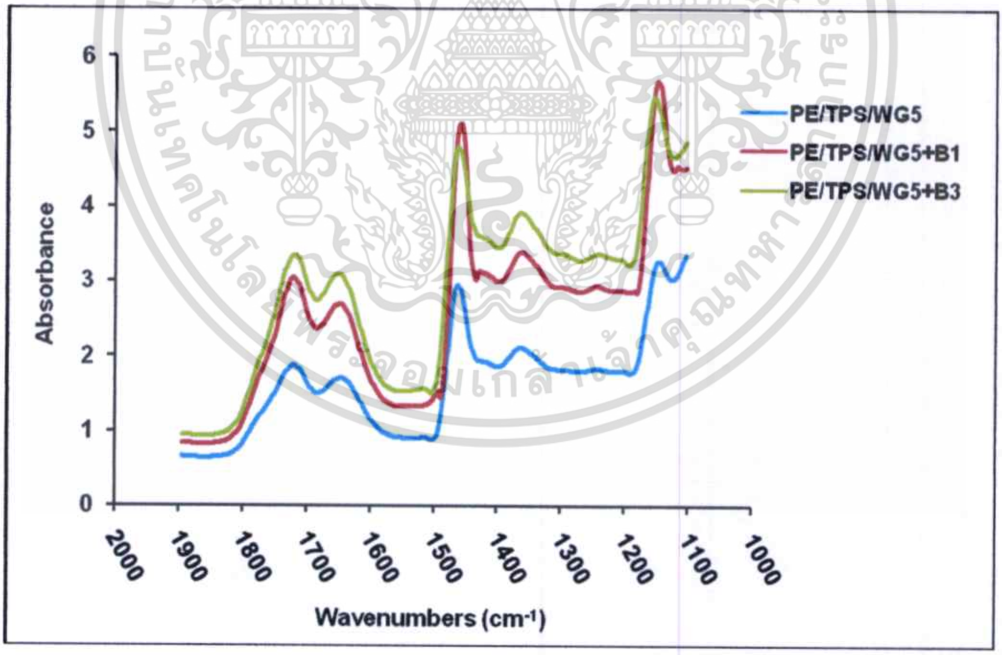


รูปที่ 4.23 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 1 เดือน จากเทคนิค FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

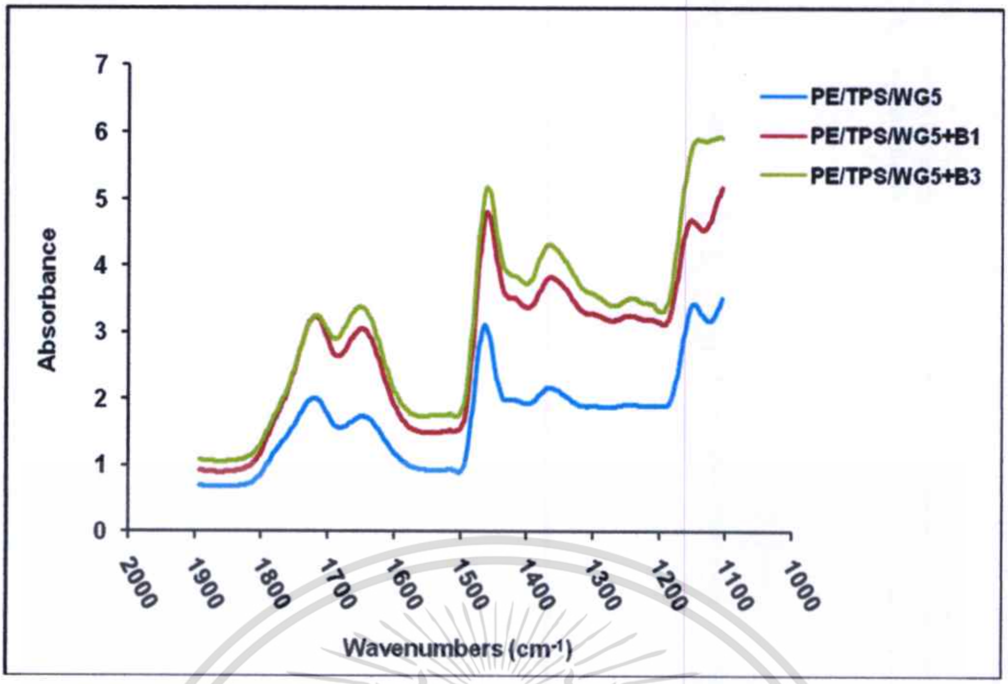


รูปที่ 4.24 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 2 เดือน จากเทคนิค FTIR

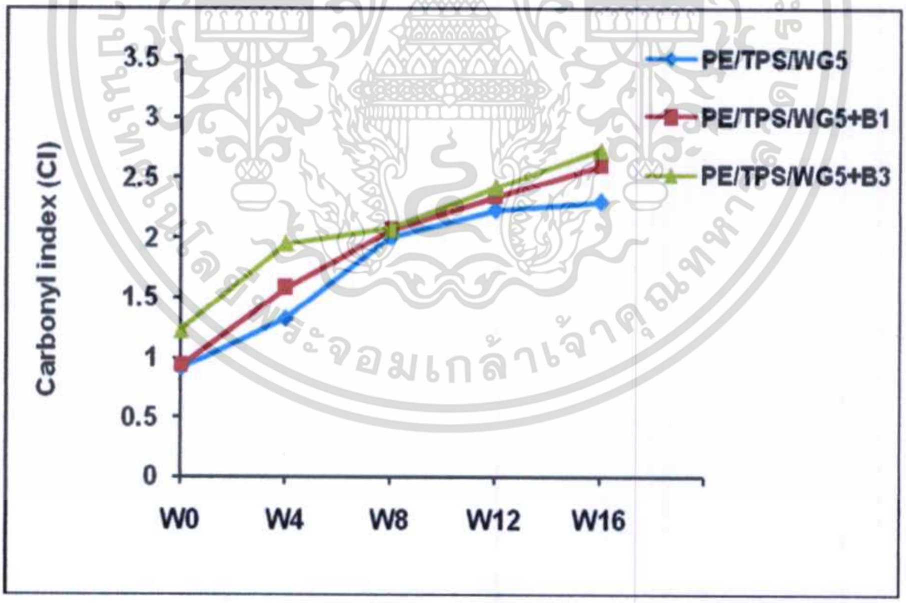


รูปที่ 4.25 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน จากเทคนิค FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

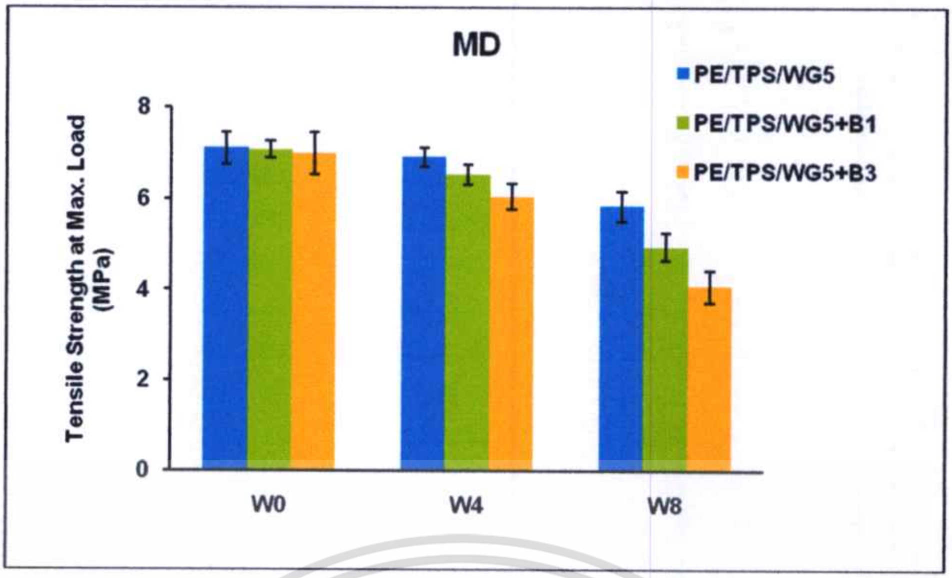


รูปที่ 4.26 เส้นสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG และฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG ที่เติมเบนโซฟีโนนในช่วงความยาวคลื่น 1600-1800 cm^{-1} และ 1300-1450 cm^{-1} หลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 4 เดือน จากเทคนิค FTIR

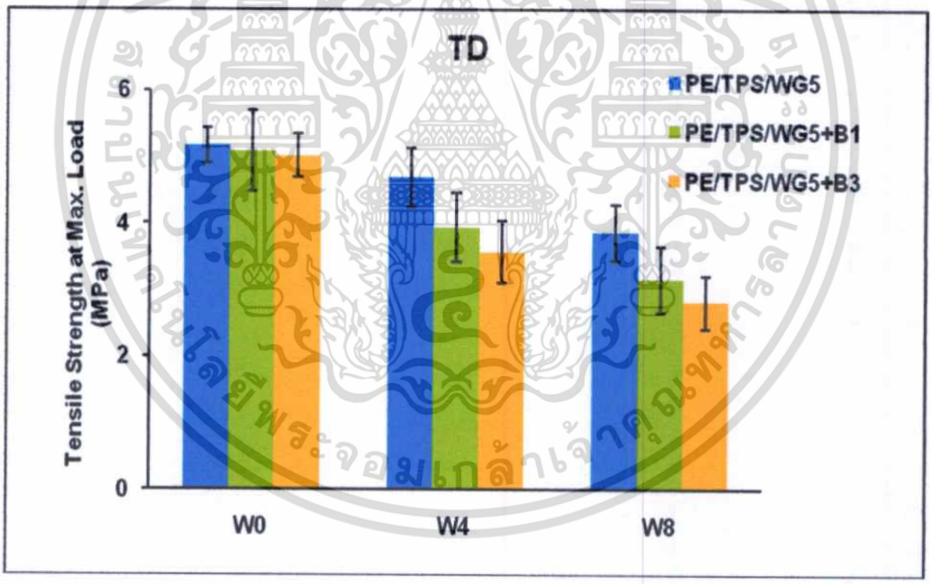


รูปที่ 4.27 ค่าดัชนีคาร์บอนิล (carbonyl index; CI) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ไม่เติมเบนโซฟีโนน (PE/TPS/WG5)และฟิล์มที่เติมเบนโซฟีโนน(PE/TPS/WG5+B1 และ PE/TPS/WG5+B3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

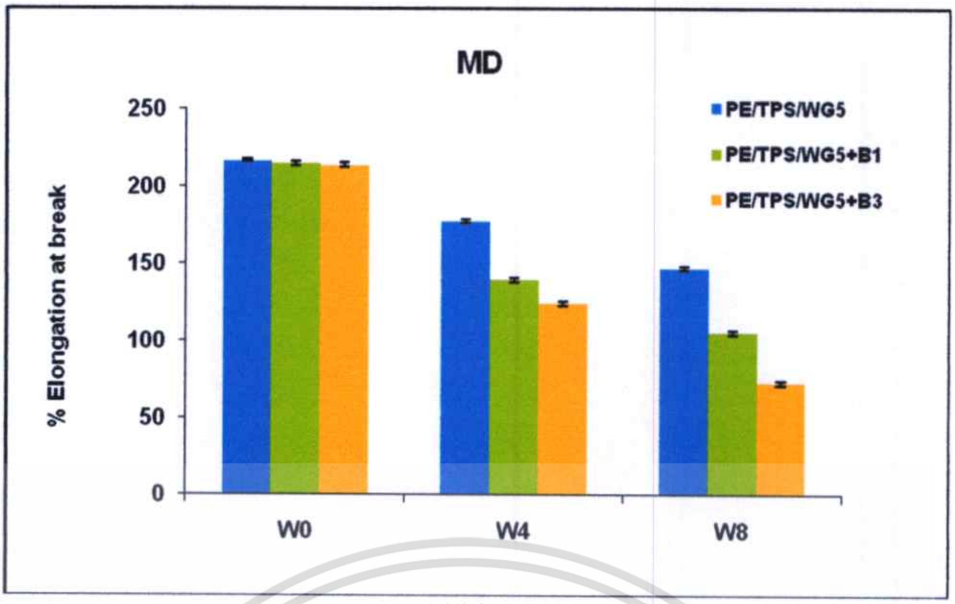


รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆในแนวเครื่องจักร (MD)

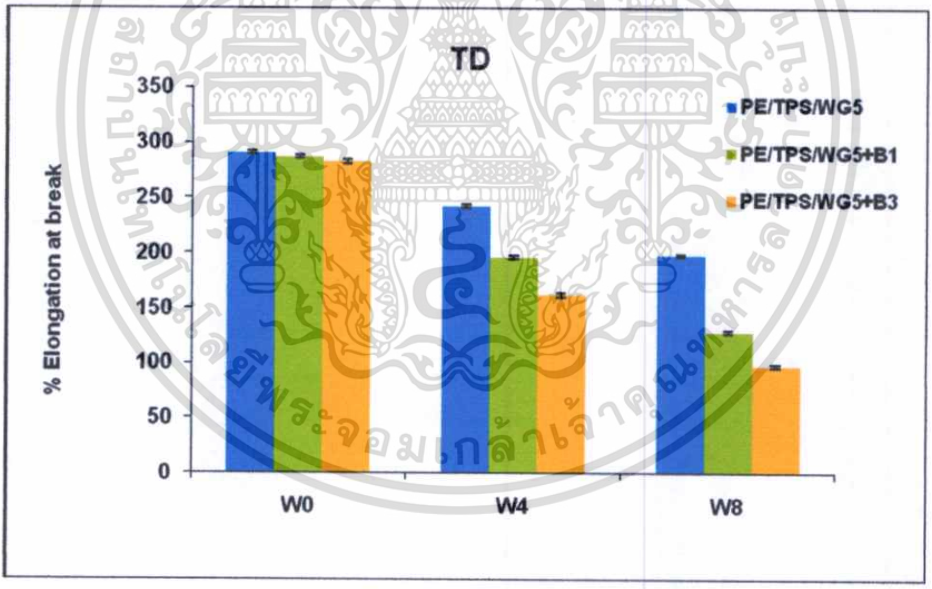


รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆในแนวขวางเครื่องจักร (TD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

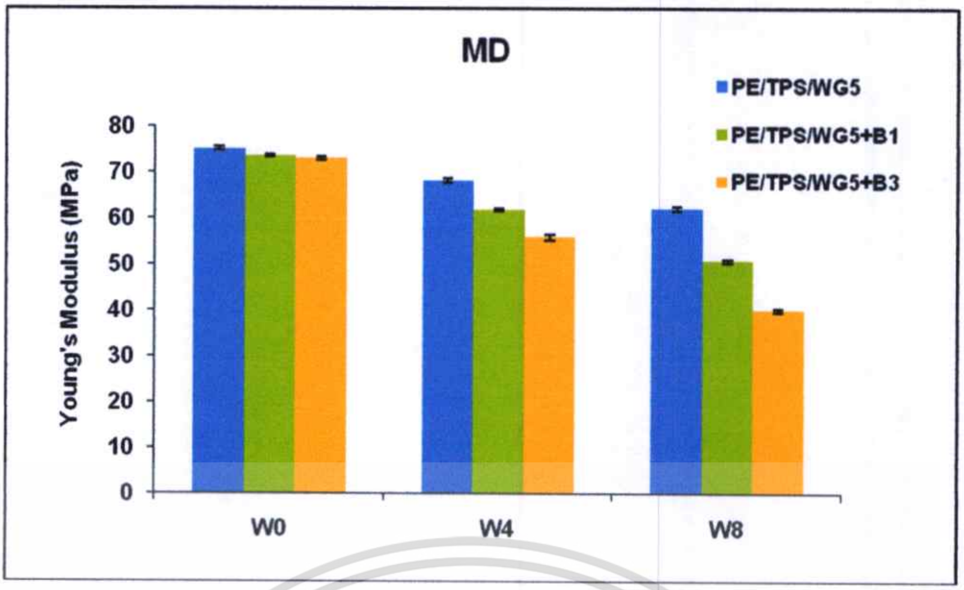


รูปที่ 4.30 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆในแนวเครื่องจักร (MD)

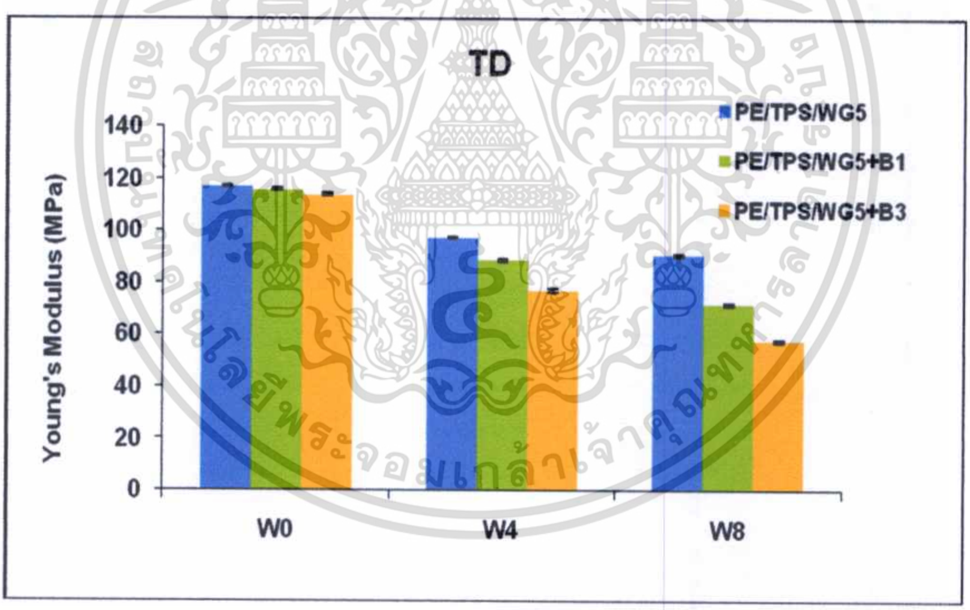


รูปที่ 4.31 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆในแนวขวางเครื่องจักร (TD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆในแนวเครื่องจักร (MD)



รูปที่ 4.33 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/WG ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆในแนวขวางเครื่องจักร (TD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการเตรียมฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป และศึกษาผลของกลูเตนที่มีต่อกระบวนการเตรียมฟิล์ม สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มที่เตรียมได้ สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ พบว่าที่อัตราส่วน LDPE : LLDPE เท่ากับ 70 :30 เหมาะสมต่อการนำไปใช้เตรียมฟิล์มที่มีปริมาณแป้งสูงๆมากที่สุด

2. ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์ม/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) คือ 70 phr พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดสูงและเปราะมากขึ้นทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลลดลงเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น

3. การปรับปรุงฟิล์มด้วยการเติมกลูเตนซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งลงไปพบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (LDPE/LLDPE/TPS) มีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้กระบวนการผลิตต่อเนื่องและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่ากลูเตนมีความไม่เข้ากันกับแป้งและพอลิเอทิลีนทำให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยที่ปริมาณกลูเตน 5 phr ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดการเติมกลูเตนไม่ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว (Tm) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (Tc) เปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ลดลงเล็กน้อย ฟิล์มมีการดูดซับน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติได้ดีโดยเกิดรอยดำและรูเล็กขึ้นที่ผิวฟิล์ม

4. การปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/กลูเตน (LDPE/LLDPE/TPS/WG) ด้วยเบนโซฟีโนน (Benzophenone) จากการทดสอบด้วยเครื่องฉายรังสียูวี (UV) พบว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางแสงได้ดีโดยมีสีเหลืองเข้มขึ้นและเปราะมากขึ้น รวมทั้งฟิล์มมีค่าดัชนีคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นด้วย และที่ปริมาณเบนโซฟีโนน 3 phr ทำให้เกิดการย่อยสลายทางแสงได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการดำเนินงานวิจัยนี้พบว่า ฟิล์มสูตร LDPE/LLDPE/TPS/WG5 ช่วยให้กระบวนการผลิตมีความต่อเนื่องและมีสมบัติต่างๆเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้ผลิตฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพ และเมื่อปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายทางแสงของด้วยเบนโซฟีโนนพบว่า ฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 เกิดการย่อยสลายทางแสงได้ดีที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชนิดของพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) อื่นๆเช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (Poly ethylene glycol ; PEG) ซูโครสเอสเตอร์ (sucrose ester) ที่ใช้ในพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่ช่วยให้แป้ง กลูเตน และพอลิเอทิลีนมีความเข้ากันได้มากขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล
2. สารเติมแต่งที่นำมาใส่เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ควรเลือกใช้สารที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเพื่อเป็นการเพิ่มสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์ม เช่น เส้นใยธรรมชาติ น้ำมันจากพืชต่างๆสำหรับใช้ช่วยในกระบวนการผลิต (processing aid) เป็นต้น
3. ชนิดและคุณสมบัติของแป้งมีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้ ดังนั้นหากเลือกใช้แป้งที่ผ่านการดัดแปร อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้มากขึ้นและอาจใส่แป้งได้ในปริมาณที่มากขึ้น แต่ในการเลือกใช้แป้งดัดแปรต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตด้วย
4. การใช้เครื่องมือที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการผสมจะช่วยให้มีองค์ประกอบต่างๆมีความเข้ากันได้มากขึ้น
5. ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มต้องเลือกใช้สภาวะต่างๆให้เหมาะสมกับความหนืดของพอลิเมอร์ที่เป่าขึ้นรูปจึงจะทำให้เป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ต่อเนื่อง และพอลิเมอร์ที่ใช้ควรมีความยืดหยุ่นเนื่องจากต้องใช้แรงดึงฟิล์มขึ้นและเป่าลมเพื่อปรับความหนาของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Changhong Potato Starch Co., Ltd. **Biodegradable Products**. [Online]. Available : http://chpotatostarch.en.ecplaza.net/4.asp.

[2] **พลาสติกชีวภาพตลาดโลกร้อนแรงตามกระแสโลกร้อน.** [Online]. Available : http://www.positioningmag.com/prmews/prmews.aspx?id= 67160. 2008.

[3] ธนาวดี ลี้จากภัย. **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม.** ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ. 2549.

[4] **พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (Degradable polymers).** [Online]. Available : http://www.thaigoodview.com/node/46661?page=0%2C9. 2000-2010.

[5] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). **พลาสติกย่อยสลายได้.** [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html. 2007.

[6] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง.** พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[7] Thai Bioplastics Industry Association. **BioPlastic Life Cycle**. [Online]. Available : http://www.tbia.or.th/en/post.php?post_id=24. 2008.

[8] Polymer society (Thailand). **Degradable plastics.** [Online]. Available : http://www/thaipolymersociety.org/polymernews_5.pdf. 2006.

[9] กิตติวุฒิ ธนรัตนพัฒกิจ, พชร เทียมธารา และ ราชวัลลภ แจ้งมงคล. **"การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูป."** โครงงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[10] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. **"พลาสติกรีไซเคิล"**. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[11] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท บุ๊คเน็ท จำกัด.

[12] อัณณพ รักรัตน์. **"ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง."** วิทยานิพนธ์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] **พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide).** [Online]. Available :
http://www.thaigoodview.com/library/contest2552/type2/science04/28/P_Untitled-10.html

[14] อนันต์ เกษมพันธุ์ , คุสิต อนันตรักษ์, ณัฐวุฒิ บุญรักษ์วนิช, อรุณี เอี่ยวสีหยก และ อัญชลี ติรพรวดี. 2542. **"พลาสติกย่อยสลายได้."** [Online]. Available :
http://www.Thaibioplas.com/010%20Destroy%20plastic.pdf/.

[15] มรกต ตันติเจริญ, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. "อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง." **24th ANNIVERSARY THE THAI TAPIOCA FLOUR INDUSTRIES TRADE ASSOCIATION.** กรุงเทพฯ

[16] ปราโมท. 2551. **"พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)."** [Online]. Available :
http://www.thaigoodview.com/node/17034.mht.

[17] Raghavan, D. 1995. "Characterization of Biodegradable Plastic" .**Polymer-Plastic Technology Engineering**, Vol.34, p41-63.

[18] Paul and Bucknall. 1998. **Polymer Blends**. Vol.1. U.S.A. : John Wiley and Sons, Inc.

[19] ปรีชา พหลเทพ. 2540. **โพลีเมอร์.** กรุงเทพฯ.มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[20] บรรเลง ศรนิล. 2525. **เทคโนโลยีพลาสติก.** พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.

[21] วิไลวรรณ โพล้งมี. **"การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช."** วิทยานิพนธ์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

[22] Wikipedia. 2008. **Low density polyethylene**. [Online].http://en.wikipedia.org/wiki/LDPE

[23] Thamapring. **"พอลิเมอร์."** [Online]. Available : http://www.thamapring_com-Pingpong web-Polymer-Po_clip_image001_0000_gif ของ Google.mht

[24] Thiranan Kunanopparat, Paul Menut, Marie-He'lene Morel, St'phane Guilbert.2008. **Plasticized wheat gluten reinforcement with natural fibers:Effect of thermal treatment on the fiber/matrix adhesion.** Composites: Part A .39 (2008) 1787–1792

[25] Wikipedia. 2551.**Gluten**. [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Gluten

[26] Li , MaryAnn, John, Ian, and Colin. 2009. **Enhancement of gluten quality combined with reduced lipid content through a new salt-washing process.** Journal of Food Engineering. 95 (2009) 365–372.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[27] **พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide).** [Online]. Available :

http://coursewares.mju.ac.th/2006/FT320/026.htm

[28] **มันสำปะหลัง.**[Online]. Available :

http://www.aftc.or.th/itc/products_analyze.php?id=86&fgrp_id=6&fmnu_id=31

[29] **มันสำปะหลัง.**[Online]. Available :

www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/510.../cassava.pdf

[30] สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย.**"มันสำปะหลัง".** [Online]. Available :

http://www.thaitapiocastarch.org/gallery/

[31] Wikipedia. 2010. **Linear low-density polyethylene.** [Online]. Available :

http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_low-density_polyethylene

[32] เรื่องน่ารู้ในการทำพลาสติก ตอนที่3. 2010. **"พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง".**

[Online]. Available :

http://www.navy22.com/th/index.php?option=com_content&view=article&id=614:-3&catid=106&Itemid=143

[33] **Gluten protein**.1989.[Online]. Available :

http://chaos.bibul.slu.se/sll/slu/ex_arb_vaxtnaringslara/EVN045/EVN045.HTM

[34] **Gluten**.2000.[Online]. Available :

http://xray.bmc.uu.se/Courses/Bke1/2000/Projects/Glutenintolerans/index.html

[35] **Wheat gluten**.1999-2010.[Online]. Available :

http://www.diytrade.com/china/4/products/1922010/wheat_gluten.html

[36] ดร.อมรรัตน์ สวัสดิทัต.2544. "**บรรจุภัณฑ์สลายตัวได้จริงหรือไม่**" .[Online]. Available :

http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=85&i2=10&noshow=1

[37] Wikipedia. 2010. **Benzophenone.** [Online]. Available :

http://en.wikipedia.org/wiki/Benzophenone

[38] **Benzophenone.**2010. [Online]. Available :

http://www.indiamart.com/suvidhinathlaboratories/laboratory-chemicals.html

[39] เจริญ นาคะสรรค์. 2544. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก.** กรุงเทพฯ :ภาควิชาเทคโนโลยียาง และพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. โพร์เพช

[40] **Blown Film Extrusion**.2008. [Online]. Available : http://www.5layer.com/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[41] ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์, เกสินี ปฐมวัฒนศักดิ์, จักรพงศ์ เครือมั่น, แพรวไพลิน คุณสอน.2551. **"Crystallization of LDPE-LLDPE blend under Injection molding condition"** [Online]. Available : www.scisoc.or.th/stt/30/sec_e/paper/stt30_E0018.pdf

[42] Ji-Zhao Liang.2001. **"The elastic behaviour during capillary extrusion of LDPE/LLDPE blend melts".** Polymer Testing 21 (2002) 69–74.

[43] R. Pe´rez, E. Rojo, M. Ferna´ndez, V. Leal, P. Lafuente, A. Santamarı´2005. **Basic and applied rheology of m-LLDPE/LDPE blends:Miscibility and processing features.** Polymer 46 (2005) 8045–8053.

[44] Nakamura E.M., Cordi L., Duran N. and Mei H.I. 2005. **Study and development of LDPE/starch partially biodegradable compounds.** Journal of Materials Processing Technology. (Article in press).

[45] วรวิทย์ โพชนิกร. **"ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ."** วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

[46] Mats Thunwall, Vanda Kuthanová, Antal Boldizar and Mikael Rigdahl.2007. **Film blowing of thermoplastic starch.** Carbohydrate Polymers. Pages 583-590.

[47] Agnes Hochstetter, Riku A. Talja, Harry J. Helen, Lea Hyvonen, Kirsi Jouppila.2005. **Properties of gluten-based sheet produced by twin-screw extruder.** LWT .39 (2006) 893–901.

[48] M.-A. Ottenhof and I.A. Farhat. 2004. **The effect of gluten on the retrogradation of wheat starch.** Journal of Cereal Science . 40 (2004) 269–274.

[49] N. Tzankova Dintcheva and F.P. La Mantia. 2007. **Durability of a starch-based biodegradable polymer.** Polymer Degradation and Stability. 92 : 630-634.

[50] Kaczmarek, Kaminsica, Swialek and Samyal. 2000. **Photoinitiated degradation of polystyrene in the presence of low-molecular organic compounds**. European polymer journal. 36:1167-1173.

[51] Whistler, R. L. and Paschall. 1967, **Starch Chemistry and Technology**, Vol.2, Academic Press, New York, PP. 637-647.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[52] ISO 15106-1 "**Plastic-Film and Sheeting. Determination of Water Vapor Transmission Rate- Part 1: Humidity detection sensor method.**", Geneva: International Organization for Standardization., 2003.

[53] Edwin Habeych, Bram Dekker, Atze Jan van der Goot, Remko Boom.2008. **Starch-zein blends formed by shear flow.** Chemical Engineering Science. 63 (2008) 5229 – 5238.

[54] George Cherian, Aristippos Genndios, Curtis Weller and Pavinee Chinachotic.1994. **Thermomechanical Behavior of Wheat Gluten Films: Effect of Sucrose, Glycerin, and Sorbitol.** Cereal Chem. 72(1):1-6.

[55] J.E. Potts. **Aspects of degradation and stabilization of polymers**. New York : Elsevier. pp.653.1973.

[56] Z. Guohua., L. Ya., F. Cuilan., Z. Min., Z. Caiqiong and C. Zongdao. **"Water resistance, mechanical properties and biodegradability of methylated-cornstarch/poly (vinyl alcohol) blend film."** Polymer Degradation and Stability. Vol.91, 2006. pp. 703-711.

[57] Rabek, JF.1996.**Photodegradation of polymer : Physical characteristics and application**. Berlin : Springer.Verlog.

[58] **เคมีและสมบัติของแป้ง**.2010. [Online]. Available: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html

[59] American Standard for Testing and Materials. 2006. **Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis. ASTM E794.** Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadephia.

[60] **Iodine test**. 2010.[Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Iodine_test

[61] J. Wanga, M. Zhaoa, X.Yanga , Y.Jiangc, C.Chun. **"Gelation behavior of wheat gluten by heat treatment followed by transglutaminase cross-linking reaction"**. Food Hydrocolloids :21 (2007) 174–179.

[62] G. Scott and D. Gilead. **Degradable polymer: principles and applications**. Chapman & Hall, London. 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

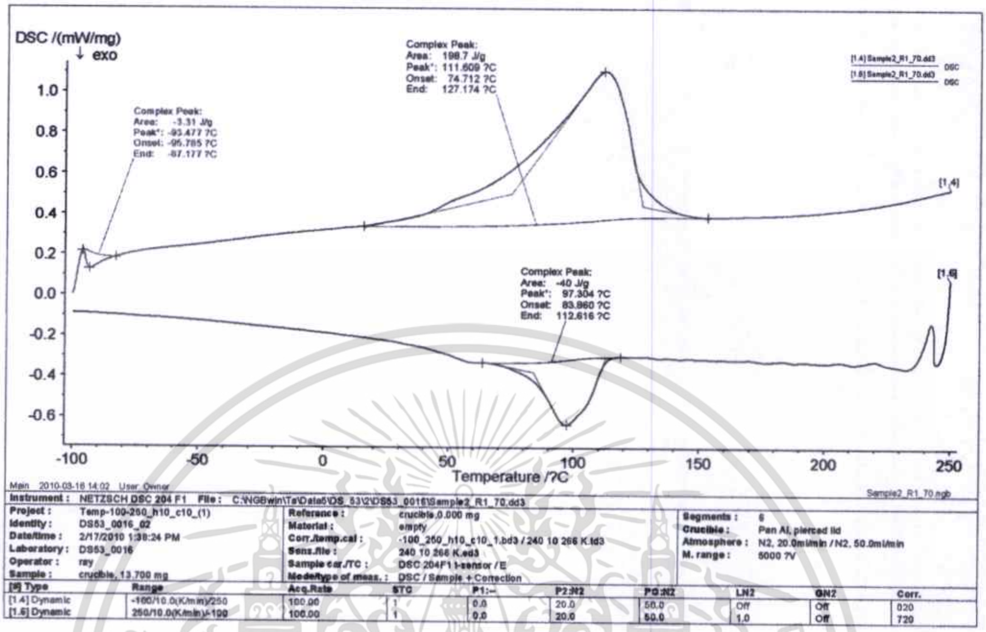
ภาคผนวก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

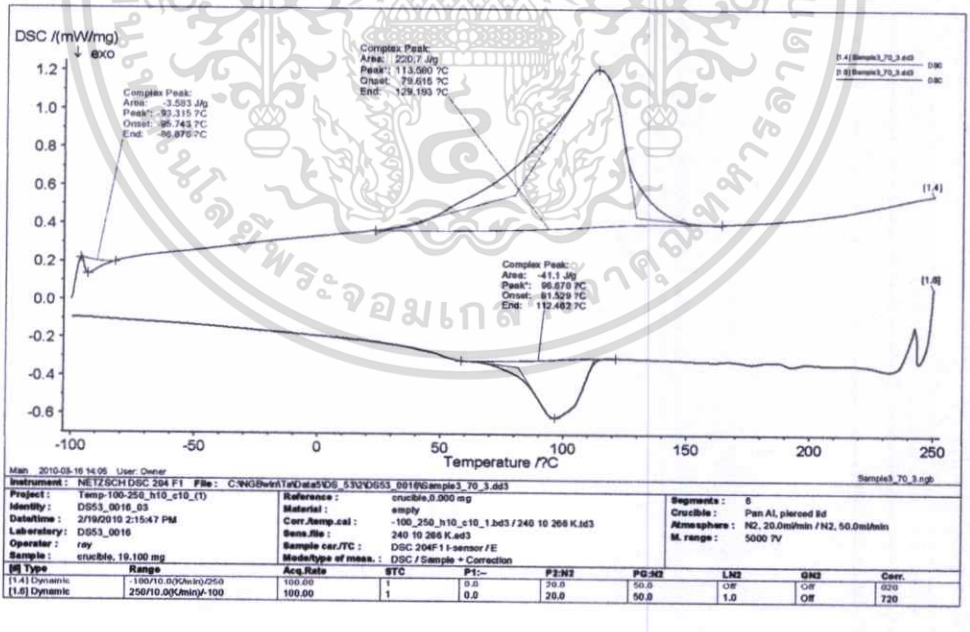
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การทดสอบสมบัติทางความร้อน

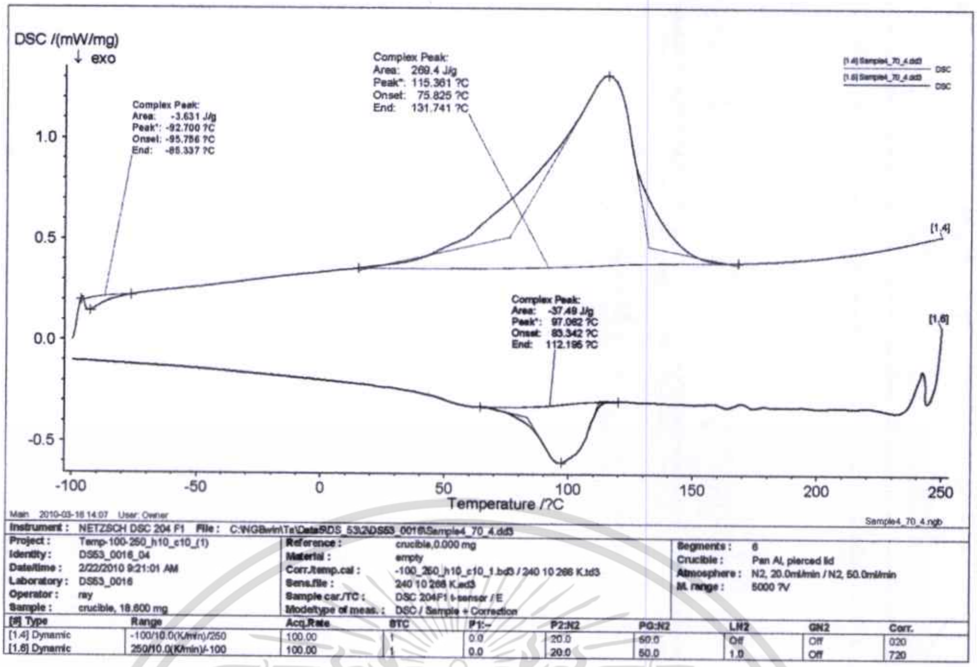


รูปที่ ก-1 DSC thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS (แป้ง 70 phr)

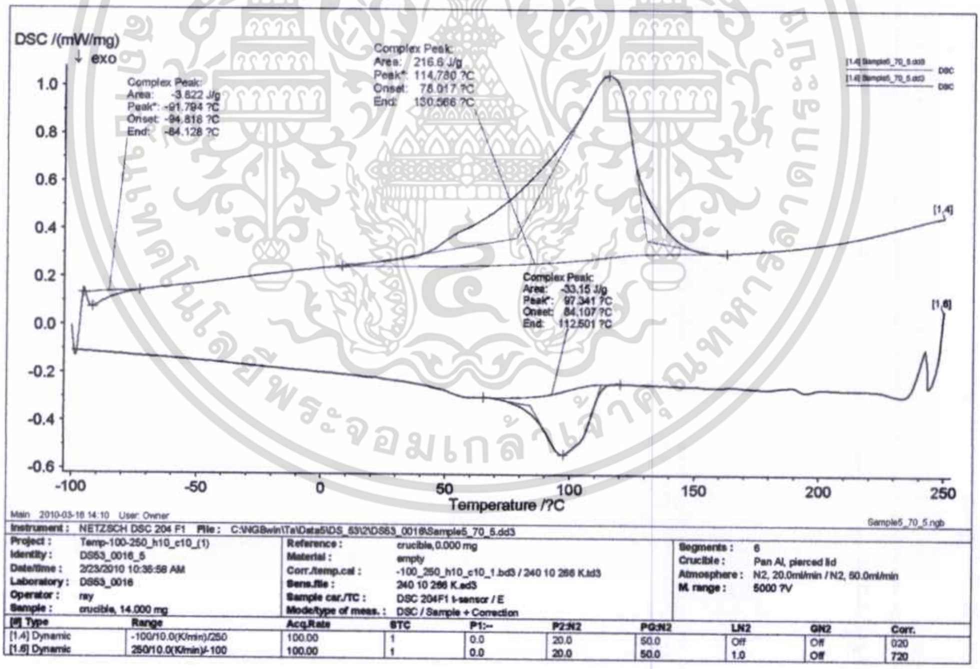


รูปที่ ก-2 DSC thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

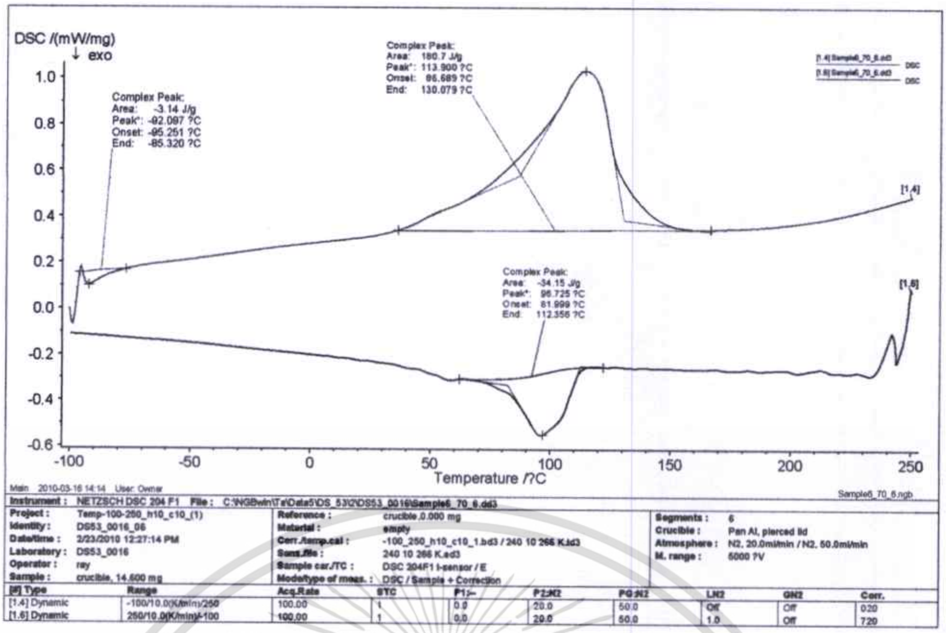


รูปที่ ก-3 DSC thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG4

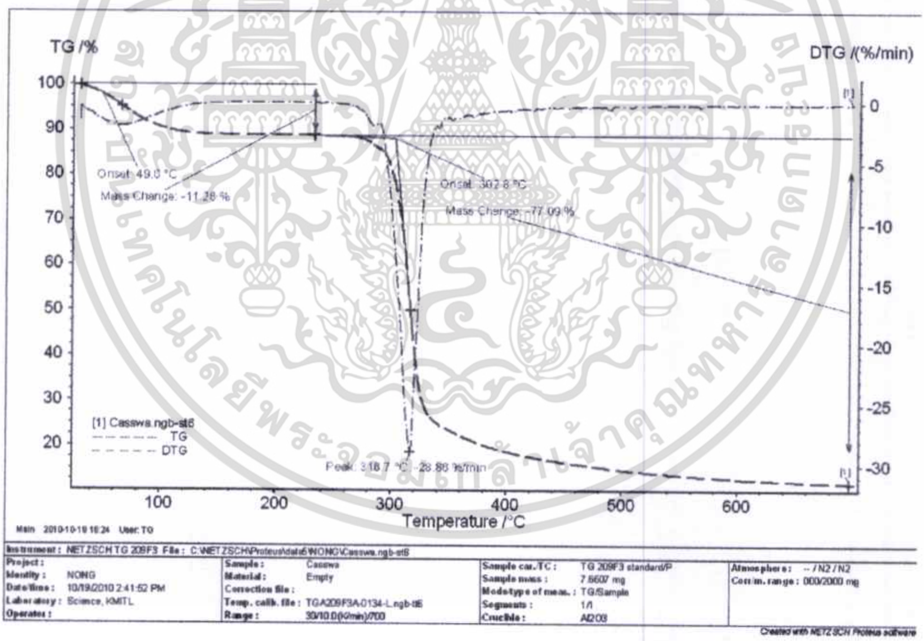


รูปที่ ก-4 DSC thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

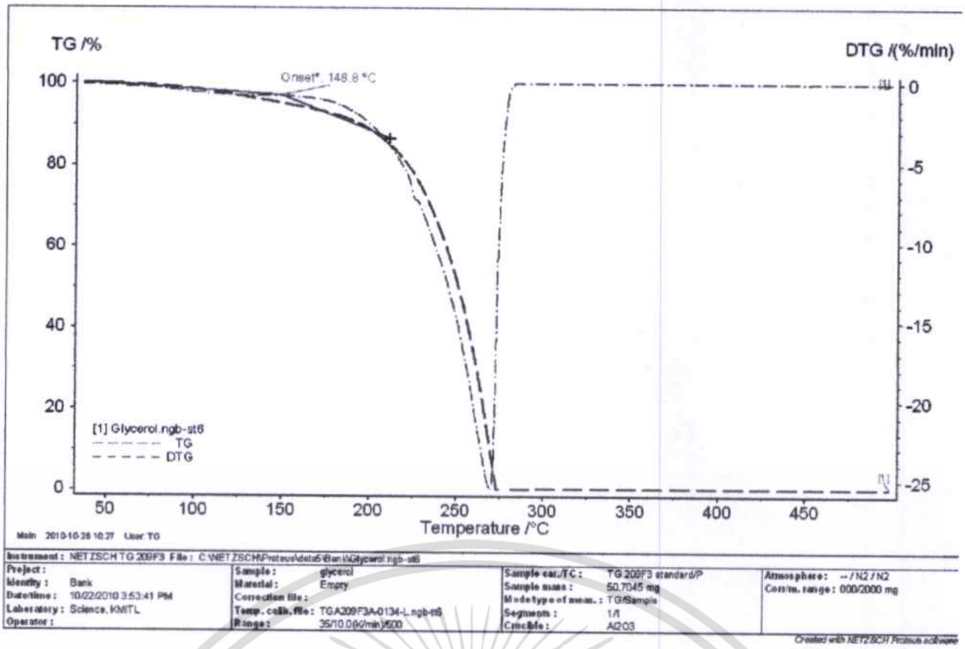


รูปที่ ก-5 DSC thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG6

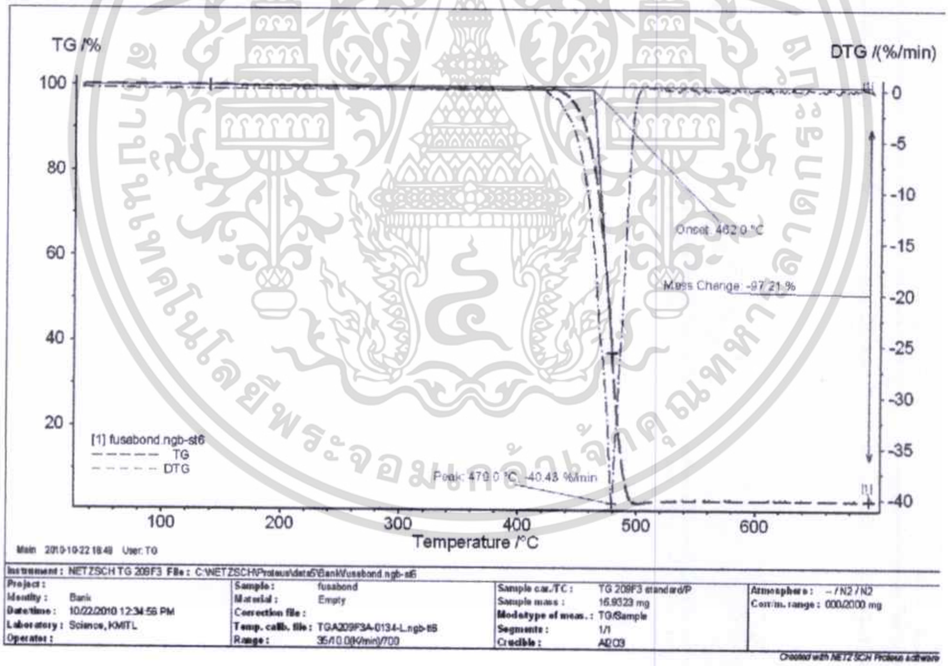


รูปที่ ก-6 TGA thermogram ของแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

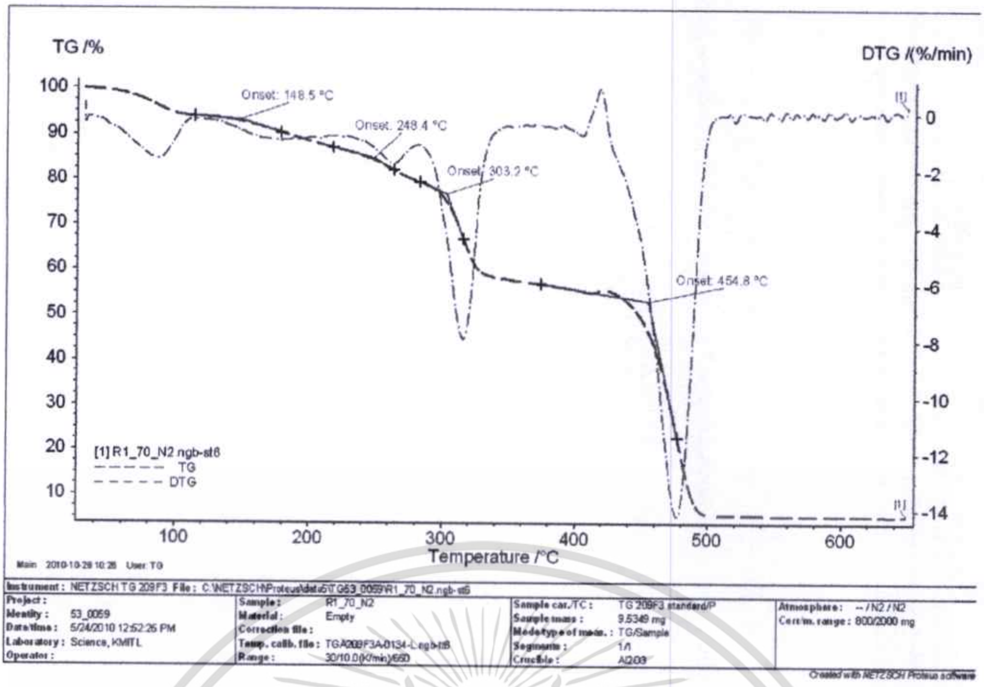


รูปที่ ก-7 TGA thermogram ของกลีเซอรอล

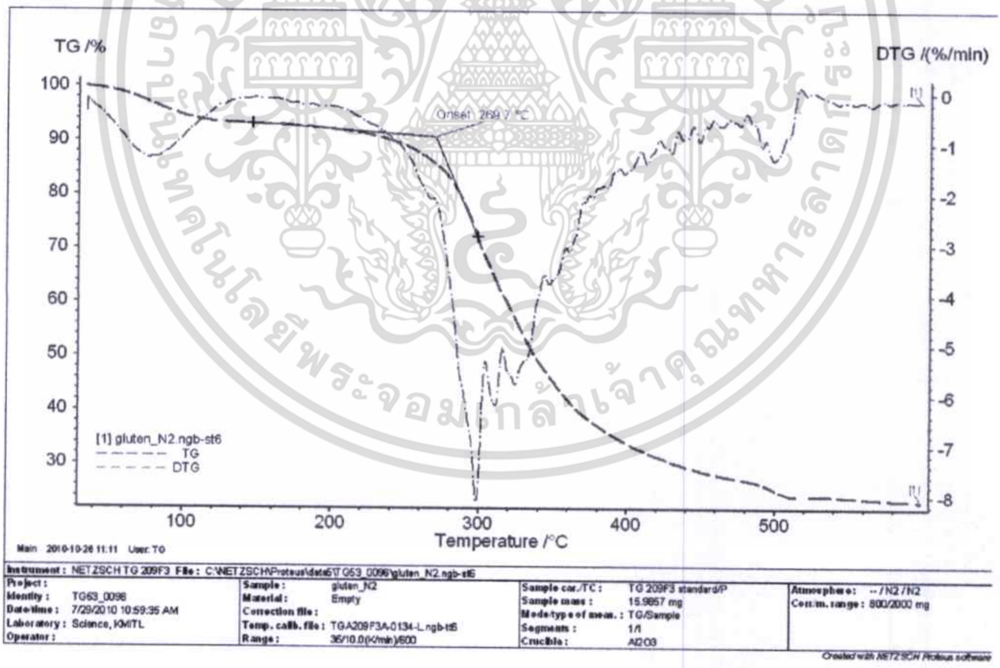


รูปที่ ก-8 TGA thermogram ของสารช่วยผสม (fusabond)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

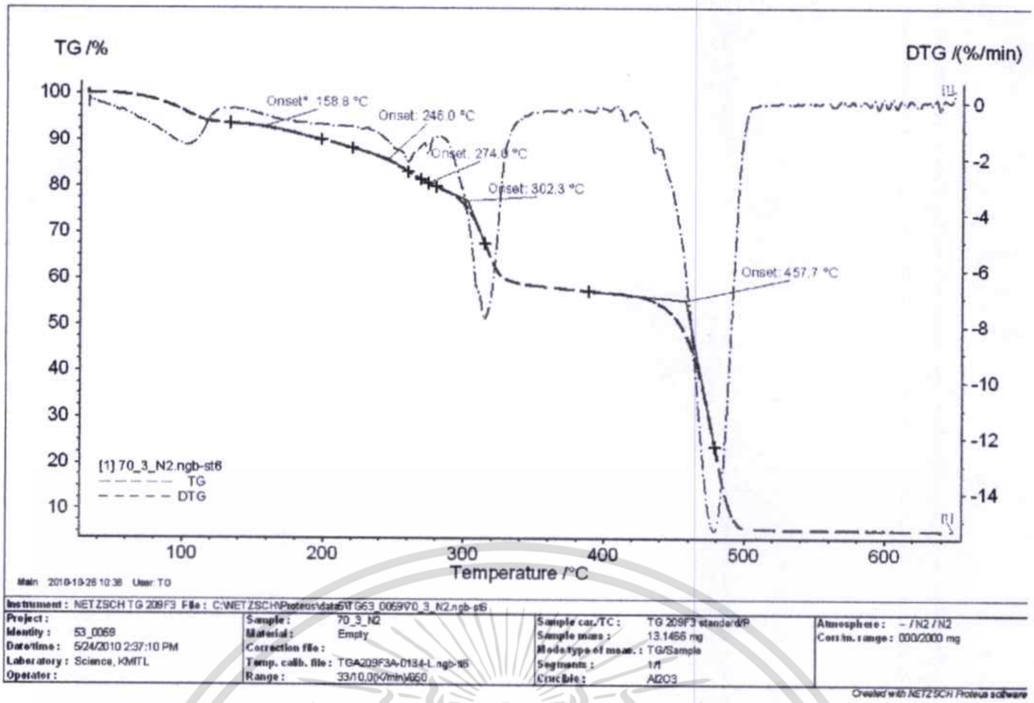


รูปที่ ก-9 TGA thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS

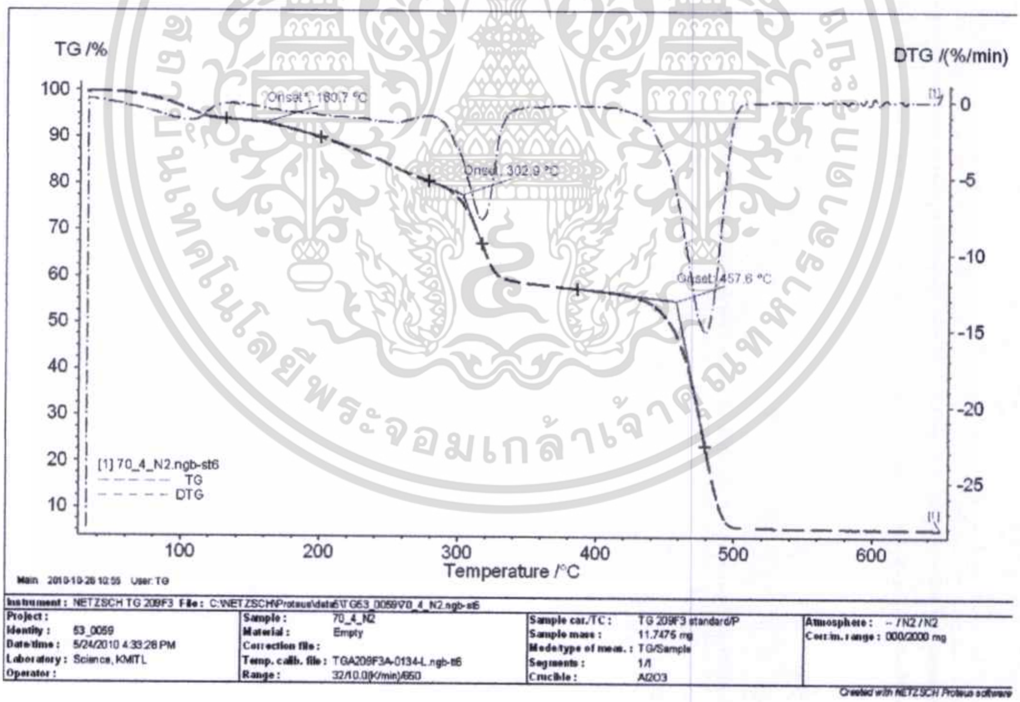


รูปที่ ก-10 TGA thermogram ของกลูเตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

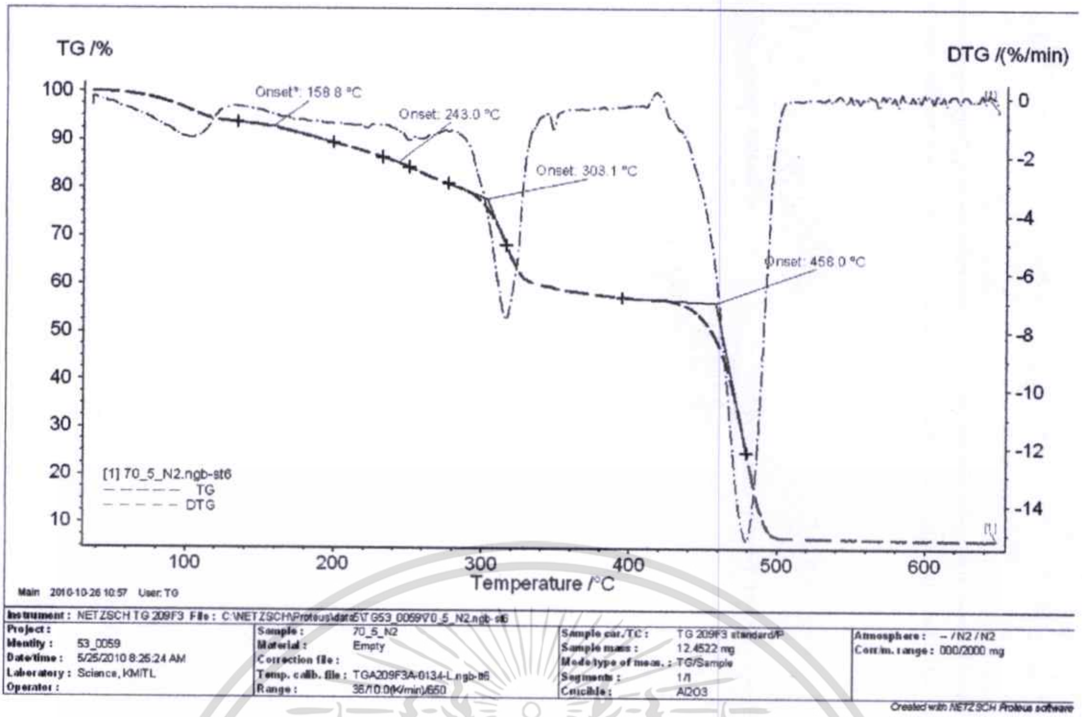


รูปที่ ก-11 TGA thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG3

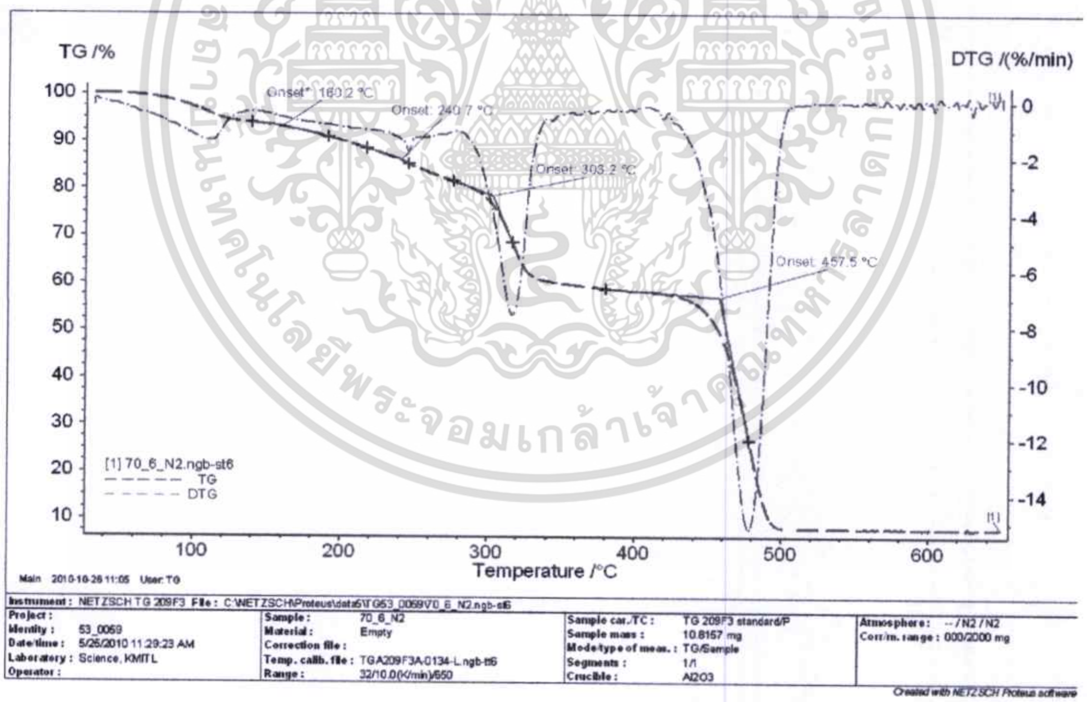


รูปที่ ก-12 TGA thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-13 TGA thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5



รูปที่ ก-14 TGA thermogram ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity)

สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของการ Heating (mJ)}}{\text{มวลของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f° คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 276 J/g

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของฟิล์ม

- ในฟิล์ม PE/TPS (แป้ง 70 phr) มีปริมาณพอลิเอทิลีน เท่ากับ 47.62 กรัม

$$\Delta H_f = (40 / 47.62)*100$$

$$= 84$$

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

$$\% \text{ Crystallinity} = (84/276)*100$$

$$= 30.43 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPE ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ Tensile Strength (MPa)	MD	TD
LDPE	13.967 ± 0.55	10.692 ± 0.67
90/10	15.794 ± 0.71	11.491 ± 0.51
80/20	17.855 ± 0.42	11.875 ± 0.48
70/30	17.185 ± 0.33	15.621 ± 0.51
60/40	16.137 ± 0.48	16.557 ± 0.52
50/50	14.684 ± 0.89	13.955 ± 1.03
40/60	16.176 ± 0.54	16.027 ± 0.74
30/70	18.882 ± 0.26	16.444 ± 0.79
LLDPE	19.582 ± 0.47	17.351 ± 0.83

ตารางที่ ข-2 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม LDPE/LLDPEทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ % Elongational at break	MD	TD
LDPE	1431.09 ± 0.31	2505.78 ± 0.27
90/10	1687.25 ± 0.62	2570.42 ± 0.48
80/20	2331.76 ± 0.79	2647.16 ± 0.53
70/30	2588.94 ± 0.67	2734.53 ± 0.31
60/40	2224.18 ± 0.94	2504.09 ± 0.59
50/50	1773.37 ± 0.45	2187.62 ± 0.44
40/60	2259.52 ± 0.72	2724.28 ± 0.63
30/70	2635.16 ± 0.98	3034.93 ± 0.57
LLDPE	3387.34 ± 0.83	3270.47 ± 0.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม LDPE/LLDPEทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ Young's Modulus (MPa)	MD	TD
LDPE	40.225 ± 0.18	51.228 ± 0.69
90/10	38.654 ± 0.30	46.774 ± 0.71
80/20	35.221 ± 0.29	48.463 ± 0.74
70/30	37.136 ± 0.45	38.561 ± 0.52
60/40	33.591 ± 0.37	36.529 ± 0.86
50/50	31.361 ± 0.56	33.309 ± 0.59
40/60	39.407 ± 0.49	37.638 ± 0.80
30/70	37.646 ± 0.32	38.181 ± 0.63
LLDPE	32.592 ± 0.41	39.061 ± 0.92

ตารางที่ ข-4 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ Tensile Strength (MPa)	MD	TD
R1 (50)*	8.84 ± 0.36	7.18 ± 0.42
R2 (60)*	8.37 ± 0.47	6.74 ± 0.37
R3 (70)*	7.83 ± 0.52	6.29 ± 0.46

* ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง มีหน่วยเป็น phr

ตารางที่ ข-5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ % Elongational at break	MD	TD
R1 (50)*	357.35 ± 0.87	372.47 ± 0.59
R2 (60)*	329.69 ± 1.06	357.38 ± 0.68
R3 (70)*	301.20 ± 0.94	335.81 ± 0.55

* ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง มีหน่วยเป็น phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ Young's modulus	MD	TD
R1 (50)*	91.89 ± 0.83	132.90 ± 1.11
R2 (60)*	80.73 ± 0.92	116.52 ± 0.99
R3 (70)*	75.25 ± 0.86	109.13 ± 1.04

ตารางที่ ข-7 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ Tensile Strength	MD	TD
PE/TPS	7.83 ± 0.35	6.01 ± 0.46
PE/TPS+WG3	7.05 ± 0.67	5.40 ± 0.38
PE/TPS+WG4	5.98 ± 0.73	5.50 ± 0.51
PE/TPS+WG5	7.11 ± 0.84	5.17 ± 0.29
PE/TPS+WG6	5.70 ± 0.95	4.97 ± 0.40

ตารางที่ ข-8 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร \ % Elongational at break	MD	TD
PE/TPS	301.20 ± 1.02	335.81 ± 0.87
PE/TPS+WG3	361.62 ± 1.13	371.60 ± 0.95
PE/TPS+WG4	236.84 ± 1.25	300.00 ± 0.83
PE/TPS+WG5	217.02 ± 0.99	290.50 ± 0.79
PE/TPS+WG6	187.93 ± 1.06	314.01 ± 0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

Young's modulus / สูตร	MD	TD
PE/TPS	75.25 ± 0.21	109.13 ± 1.13
PE/TPS+WG3	77.23 ± 0.15	89.91 ± 1.07
PE/TPS+WG4	64.94 ± 0.24	90.51 ± 1.26
PE/TPS+WG5	74.97 ± 0.18	117.10 ± 1.09
PE/TPS+WG6	73.39 ± 0.11	82.39 ± 1.23

ตารางที่ ข-10 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร	MD			TD		
	W0	W4	W8	W0	W4	W8
PE/TPS+WG5	7.11 ± 0.36	6.92 ± 0.21	5.84 ± 0.33	5.17 ± 0.27	4.70 ± 0.44	3.87 ± 0.43
PE/TPS+WG5/B1	7.08 ± 0.19	6.53 ± 0.22	4.95 ± 0.31	5.08 ± 0.61	3.94 ± 0.52	3.16 ± 0.49
PE/TPS+WG5/B3	7.00 ± 0.47	6.05 ± 0.28	4.08 ± 0.36	5.02 ± 0.33	3.57 ± 0.46	2.82 ± 0.39

ตารางที่ ข-11 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongational at break) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร	MD			TD		
	W0	W4	W8	W0	W4	W8
PE/TPS+WG5	217.02 ±0.89	177.64 ±1.15	146.92 ±1.08	290.50 ±1.23	242.32 ±1.34	197.28 ±1.1
PE/TPS+WG5/B1	215.15 ±1.35	139.58 ±1.42	105.64 ±1.47	286.36 ±1.51	195.75 ±1.46	128.55 ±1.3
PE/TPS+WG5/B3	214.09 ±1.27	124.53 ±1.31	73.15 ±1.50	282.60 ±1.67	161.82 ±1.59	97.13 ±1.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-12 ค่ามอดุลัส (Young's modulus ; MPa) ของฟิล์ม PE/TPS/gluten ที่ปริมาณเบนโซฟีโนนต่างๆ ทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

สูตร	MD			TD		
	W0	W4	W8	W0	W4	W8
PE/TPS+WG5	74.97 ±0.34	68.14 ±0.44	61.92 ±0.52	117.10 ±0.37	97.33 ±0.41	90.65 ±0.53
PE/TPS+WG5/B1	73.42 ±0.27	61.72 ±0.33	50.61 ±0.39	115.64 ±0.46	88.81 ±0.53	71.80 ±0.47
PE/TPS+WG5/B3	72.87 ±0.40	55.84 ±0.58	39.90 ±0.46	113.92 ±0.55	77.23 ±0.61	57.69 ±0.68

ตารางที่ ข-13 น้ำหนักของฟิล์ม PE/TPS และฟิล์ม PE/TPS/gluten ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆ

สูตร	เริ่มต้น	วันที่2	วันที่4	วันที่6	วันที่8	วันที่10
PE/TPS-60	0.130	0.130	0.133	0.140	0.145	0.152
PE/TPS-70	0.130	0.130	0.134	0.142	0.147	0.153
PE/TPS+WG3	0.160	0.160	0.160	0.163	0.166	0.168
PE/TPS+WG4	0.190	0.190	0.190	0.190	0.192	0.194
PE/TPS+WG5	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.191
PE/TPS+WG6	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.201

สูตร	วันที่12	วันที่14	วันที่16	วันที่18	วันที่20
PE/TPS-60	0.155	0.158	0.160	0.161	0.162
PE/TPS-70	0.156	0.160	0.161	0.162	0.163
PE/TPS+WG3	0.172	0.175	0.179	0.183	0.187
PE/TPS+WG4	0.197	0.199	0.203	0.210	0.214
PE/TPS+WG5	0.193	0.196	0.202	0.207	0.212
PE/TPS+WG6	0.201	0.204	0.207	0.211	0.215

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-14 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์ม PE/TPS และPE/TPS/gluten ที่ปริมาณกลูเตนต่างๆ

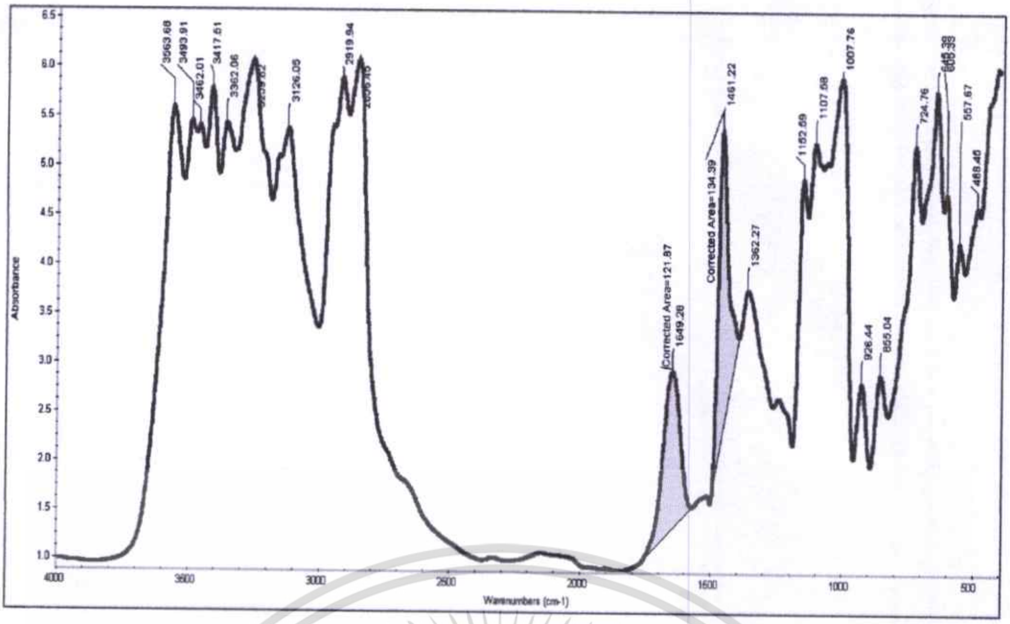
สูตร	เริ่มต้น	วันที่2	วันที่4	วันที่6	วันที่8	วันที่10
PE/TPS-60	0.000	0.000	2.308	7.692	11.538	16.923
PE/TPS-70	0.000	0.000	3.077	9.231	13.077	17.692
PE/TPS+WG3	0.000	0.000	0.000	1.875	3.750	5.000
PE/TPS+WG4	0.000	0.000	0.000	0.000	1.053	2.105
PE/TPS+WG5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.526
PE/TPS+WG6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500

สูตร	วันที่12	วันที่14	วันที่16	วันที่18	วันที่20
PE/TPS-60	19.231	21.538	23.077	23.846	24.615
PE/TPS-70	20.000	23.077	23.846	24.615	25.385
PE/TPS+WG3	7.500	9.375	11.875	14.375	16.875
PE/TPS+WG4	3.684	4.737	6.842	10.526	12.632
PE/TPS+WG5	1.579	3.158	6.316	8.947	11.579
PE/TPS+WG6	0.500	2.000	3.500	5.500	7.500

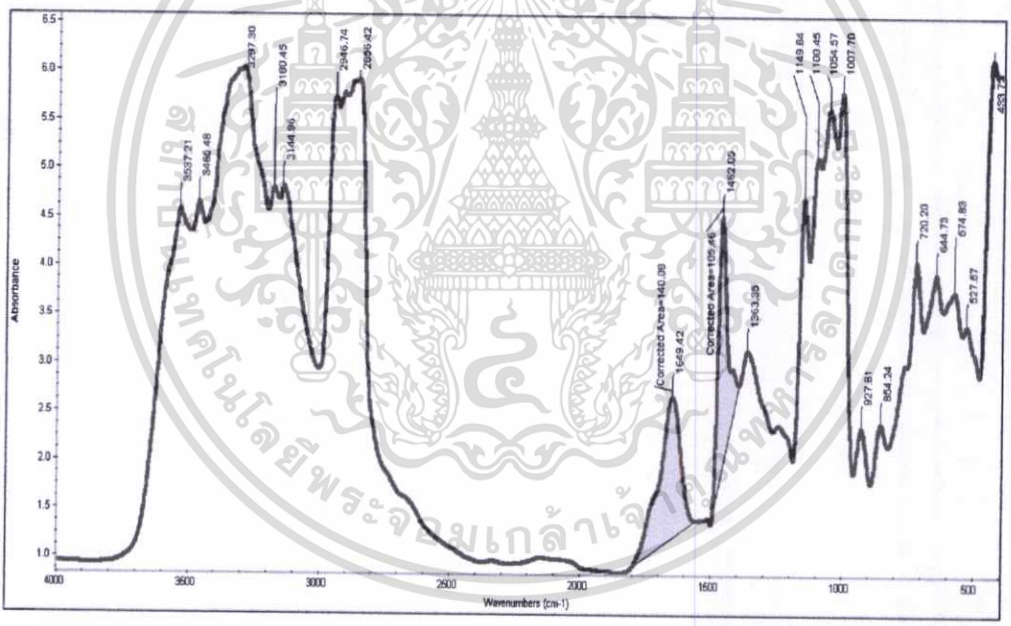
ตารางที่ ข-15 ค่าดัชนีคาร์บอนิล (carbonyl index; CI) ของฟิล์ม PE/TPS+WG5 และ PE/TPS+WG5/Benzophenone ภายหลังการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 4 เดือน

สูตร	W0	W4	W8	W12	W16
PE/TPS+WG5	0.91	1.33	2.00	2.23	2.30
PE/TPS+WG5/B1	0.93	1.58	2.06	2.34	2.60
PE/TPS+WG5/B3	1.23	1.95	2.08	2.42	2.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

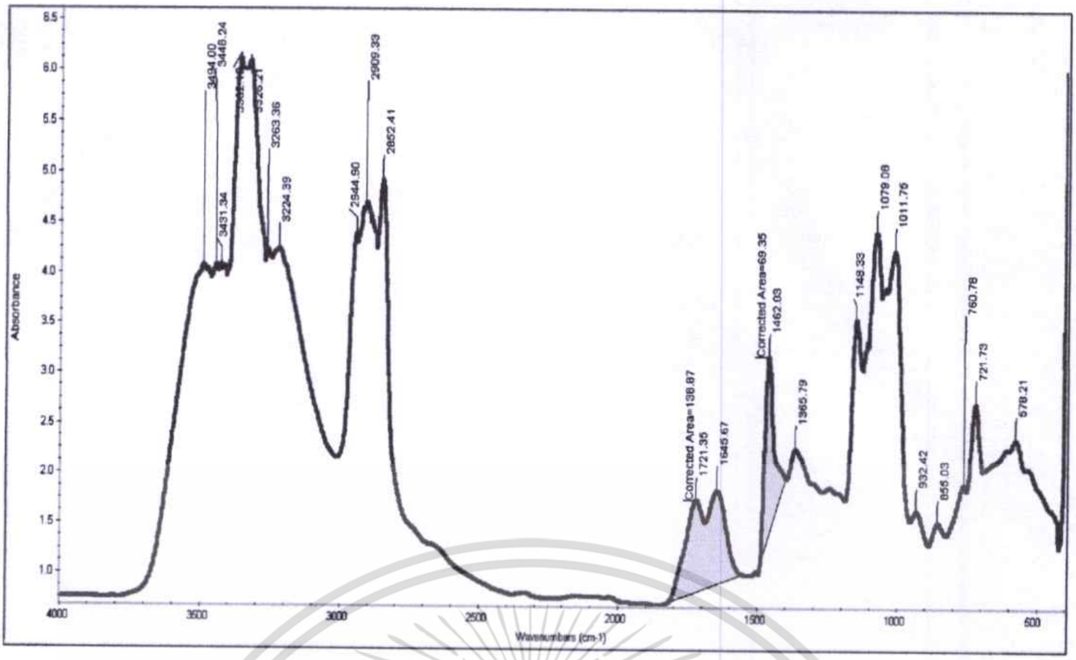


รูปที่ ข-1 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 ก่อนฉายรังสียูวี

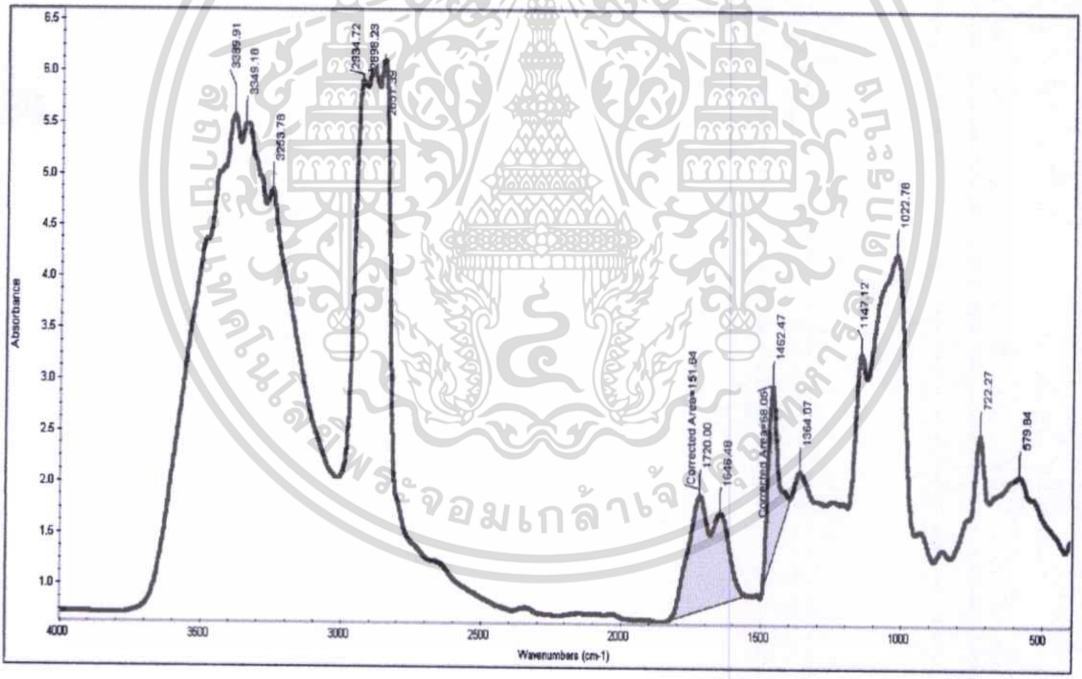


รูปที่ ข-2 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 หลังฉายรังสียูวี 1 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

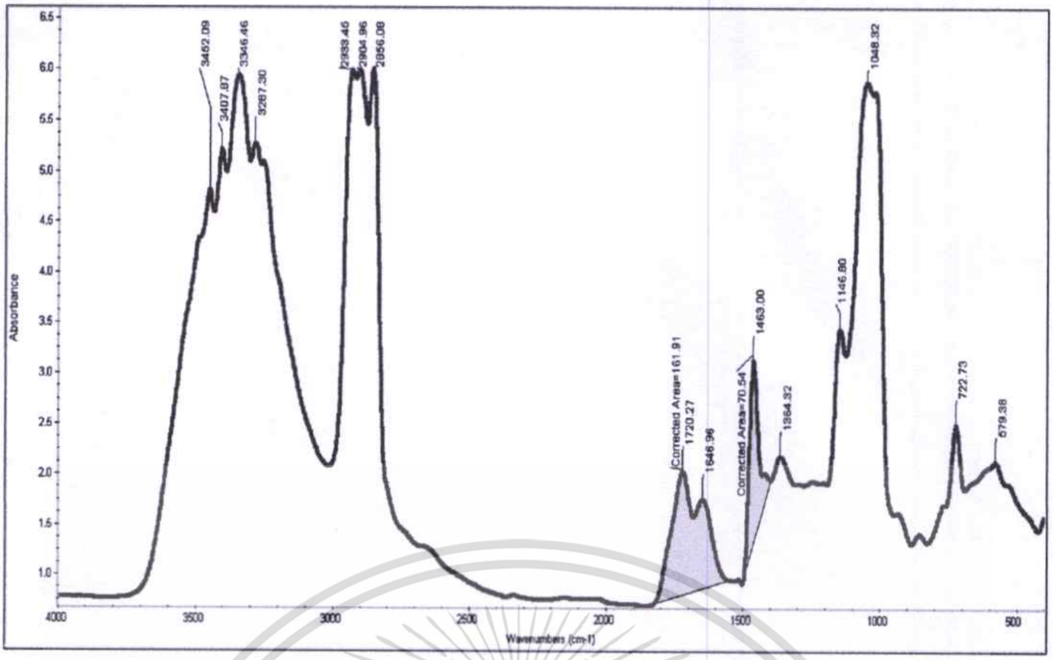


รูปที่ ข-3 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 หลังฉายรังสียูวี 2 เดือน

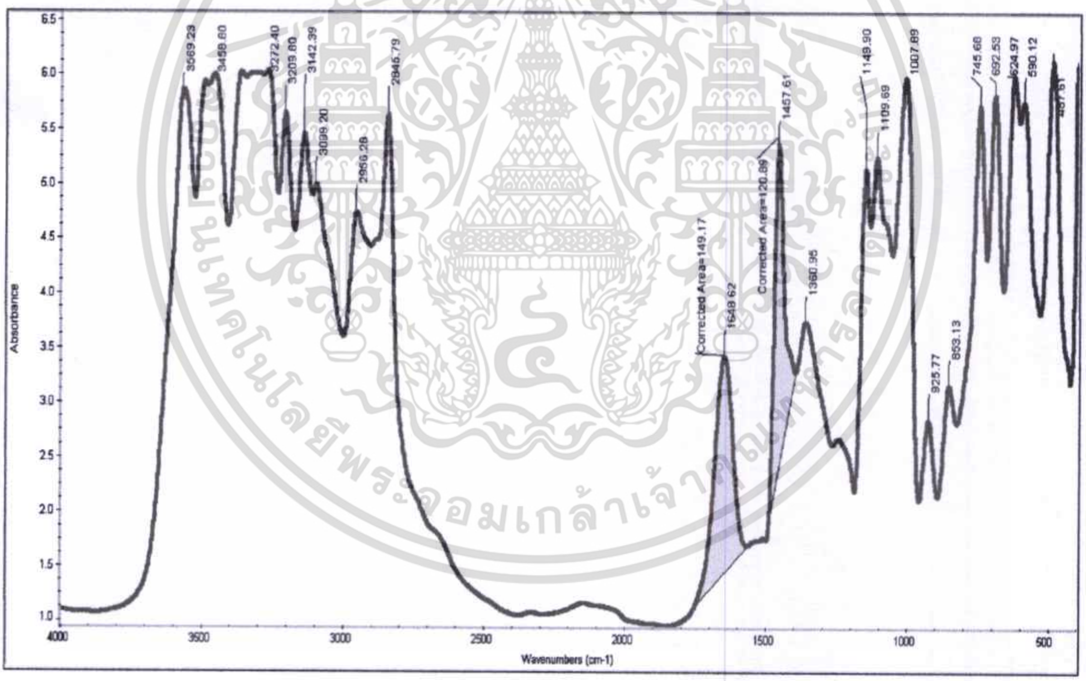


รูปที่ ข-4 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 หลังฉายรังสียูวี 3 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

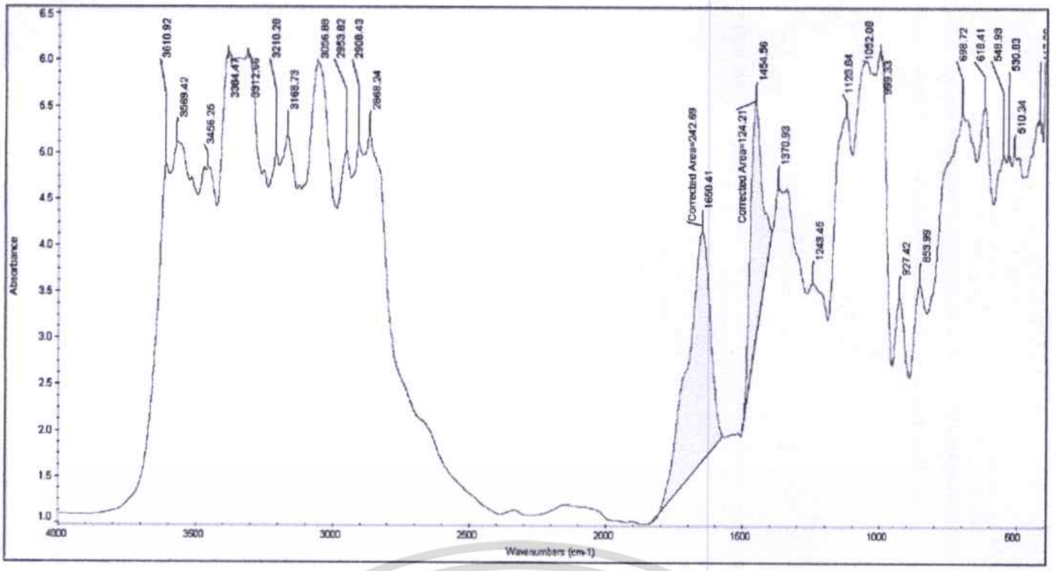


รูปที่ ข-5 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5 หลังฉายรังสียูวี 4 เดือน

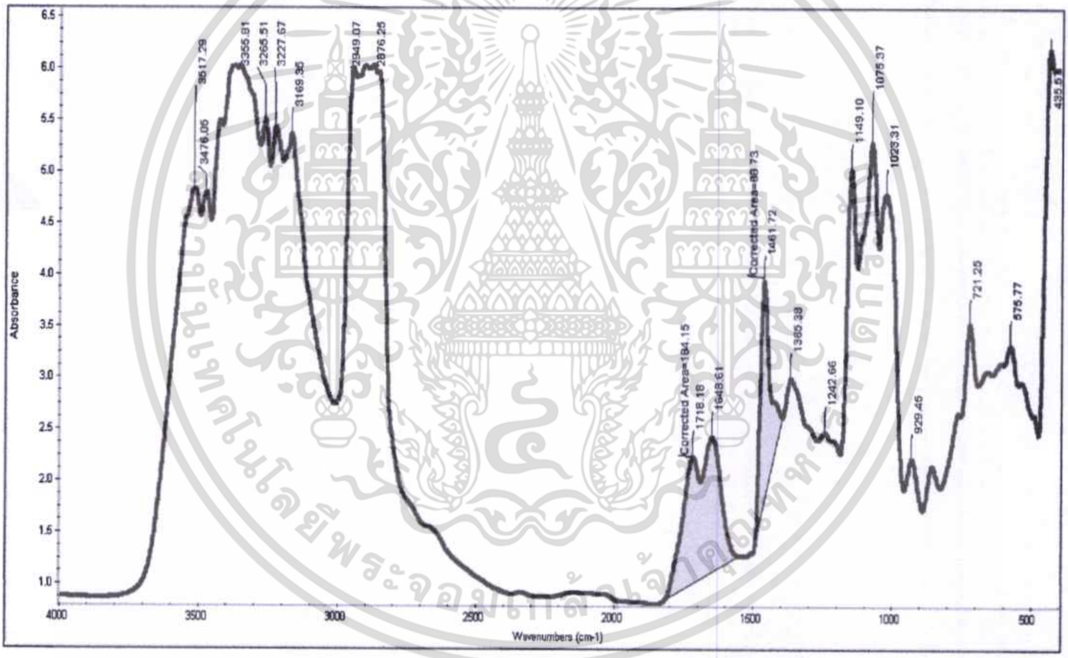


รูปที่ ข-6 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 ก่อนฉายรังสียูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

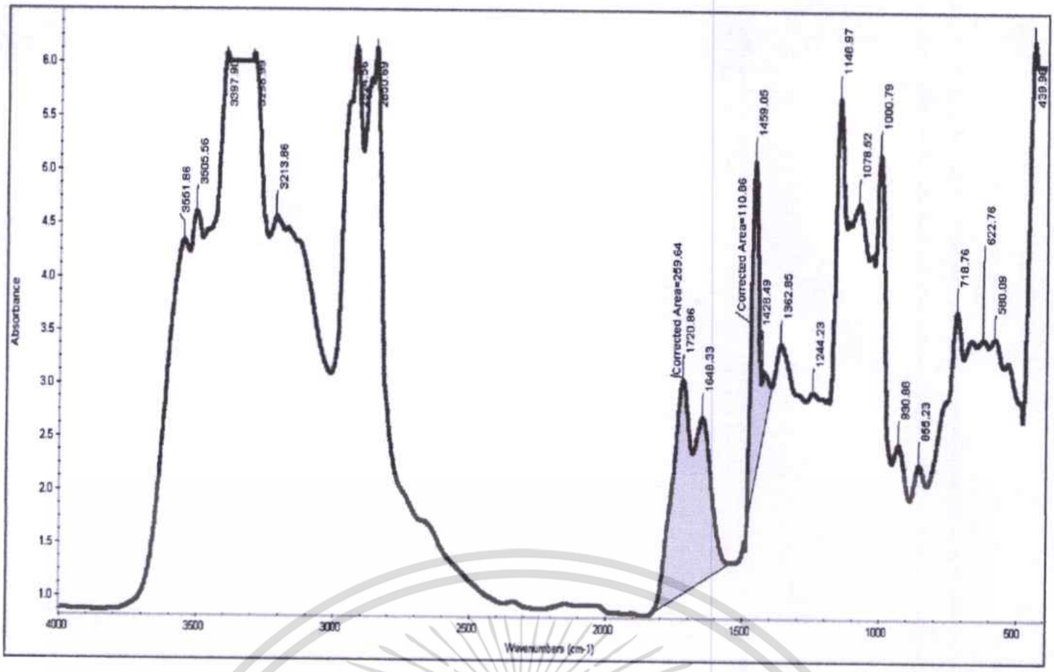


รูปที่ ข-7 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 หลังฉายรังสียูวี 1 เดือน

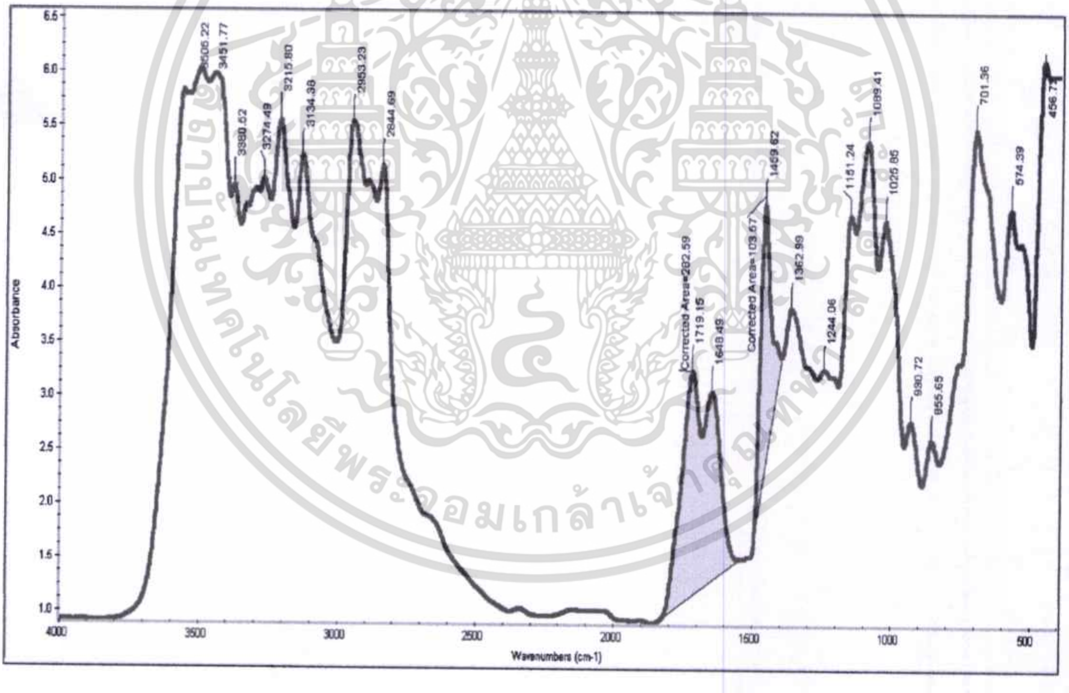


รูปที่ ข-8 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 หลังฉายรังสียูวี 2 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

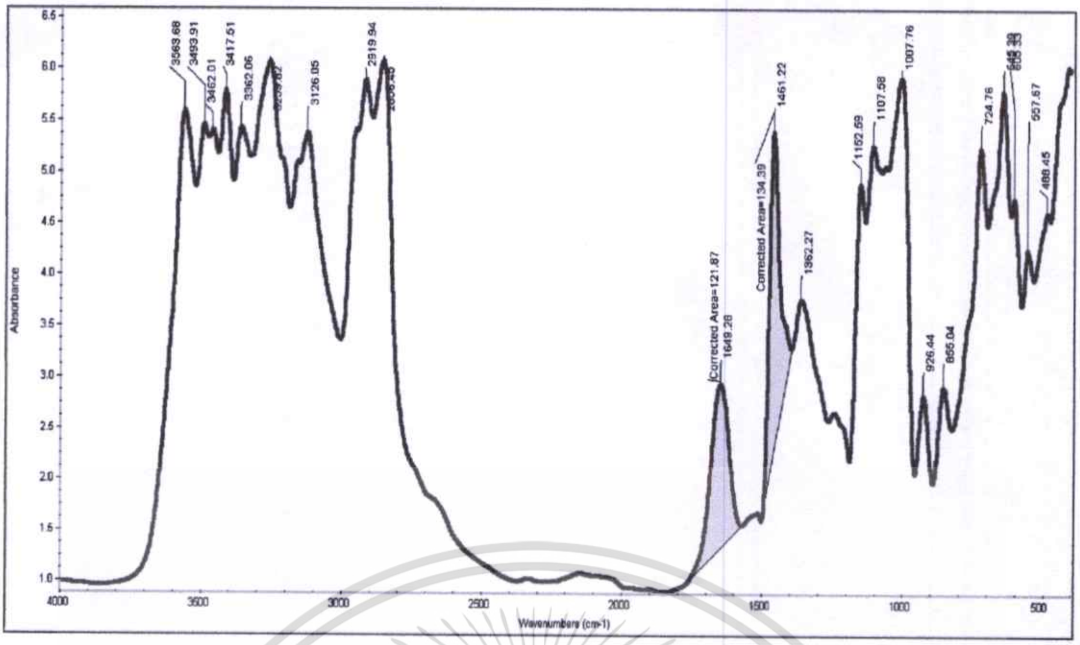


รูปที่ ข-9 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 หลังฉายรังสียูวี 3 เดือน

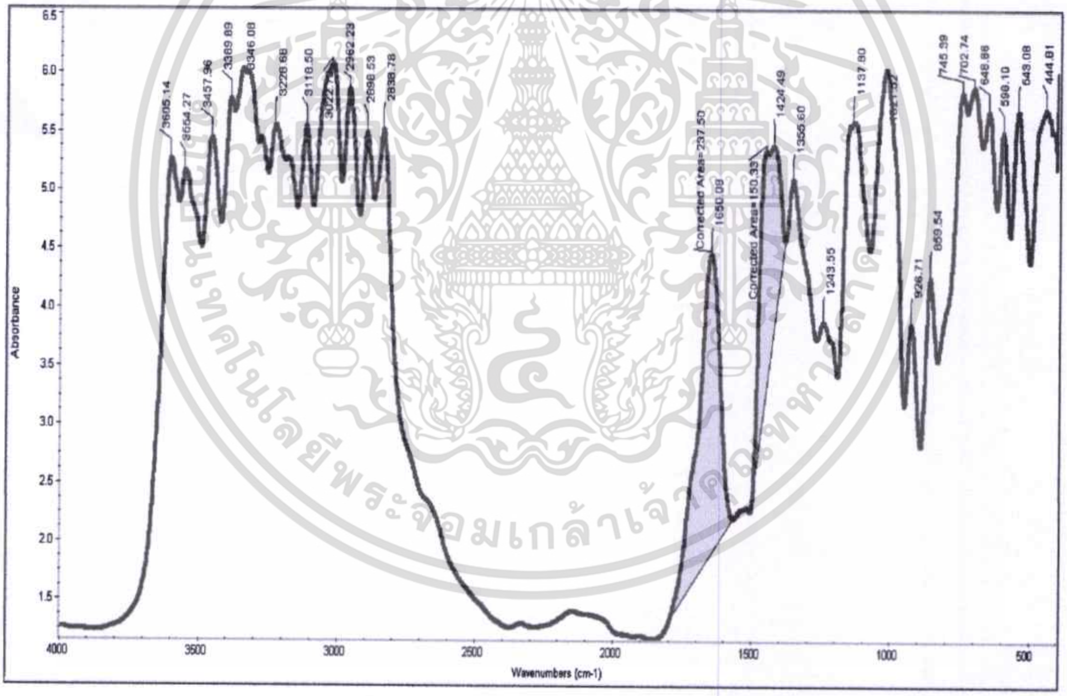


รูปที่ ข-10 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B1 หลังฉายรังสียูวี 4 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

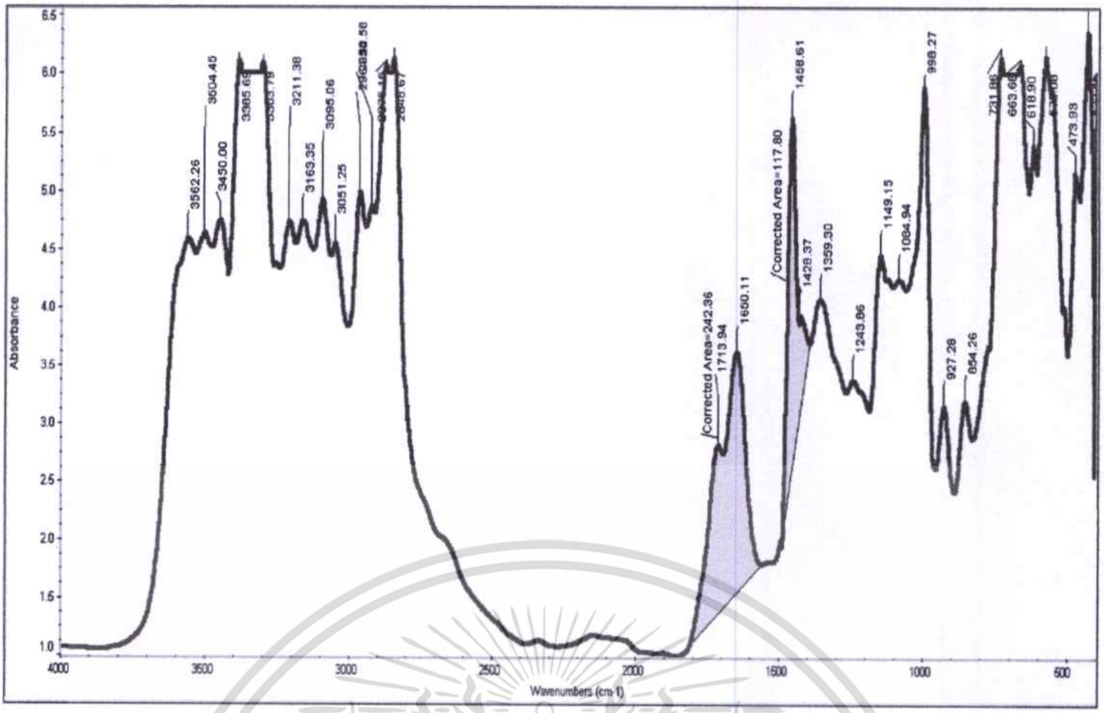


ที่ ข-11 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 ก่อนฉายรังสียูวี

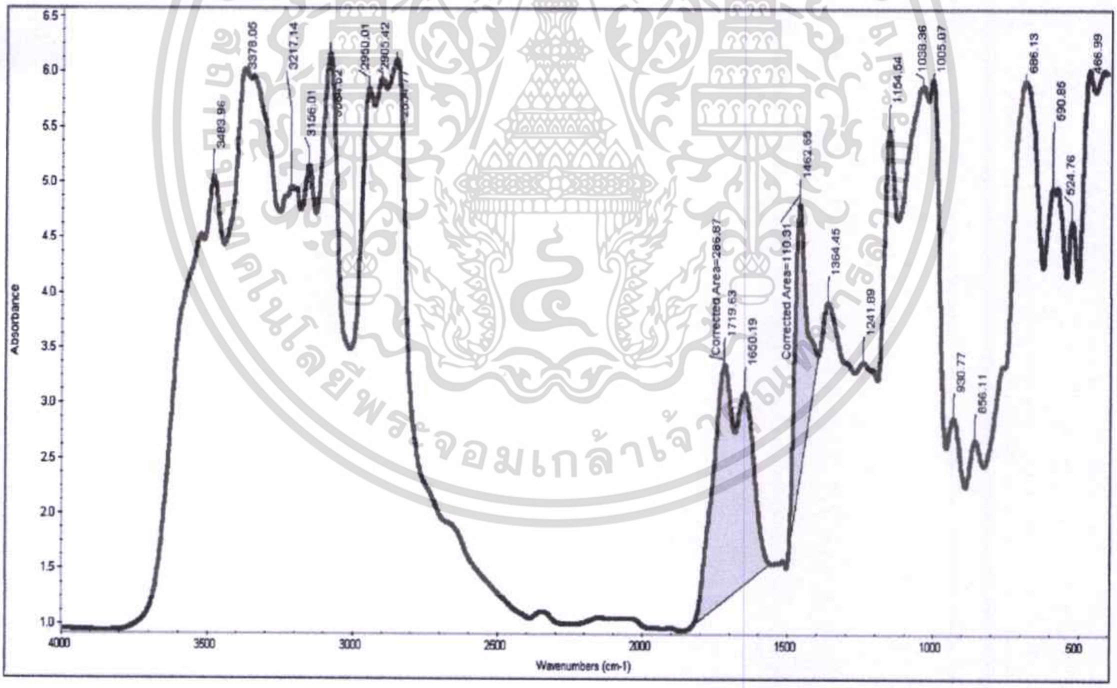


รูปที่ ข-12 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 หลังฉายรังสียูวี 1 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

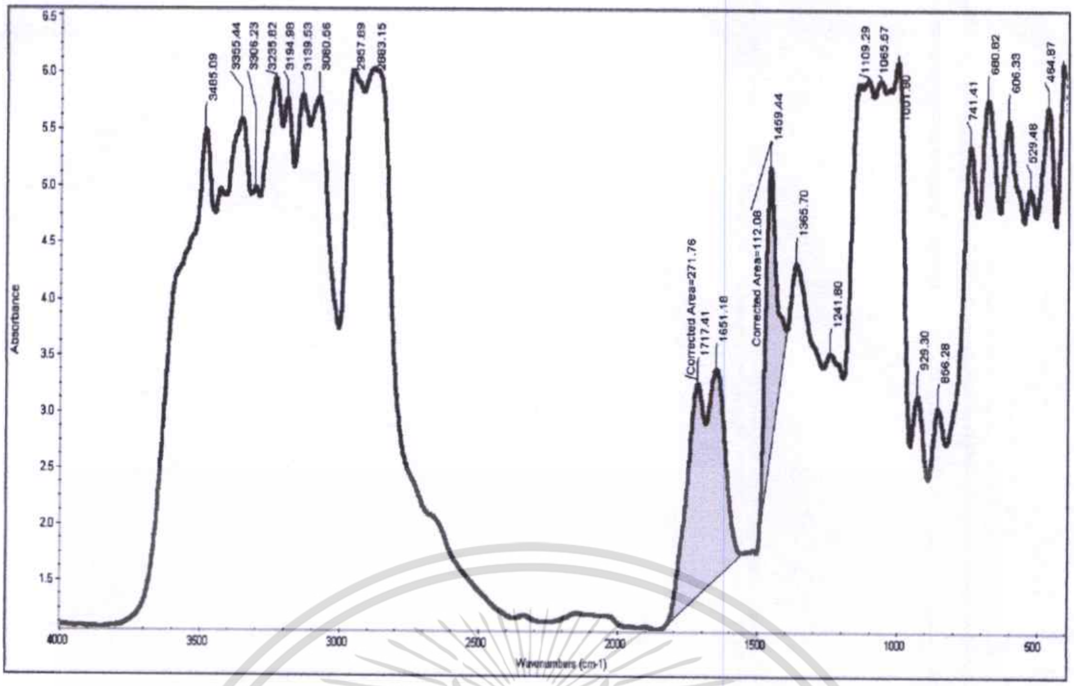


รูปที่ ข-13 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 หลังฉายรังสียูวี 2 เดือน



รูปที่ ข-14 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 หลังฉายรังสียูวี 3 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-15 กราฟ FTIR ของฟิล์ม LDPE/LLDPE/TPS/WG5/B3 หลังฉายรังสียูวี 4 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นางสาววิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร
วัน เดือน ปีเกิด	3 มกราคม 2528
ที่อยู่	7/1 หมู่ 4 ต.ทับปุด อ.ทับปุด จ.พังงา 82180
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2549	วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2549	การสังเคราะห์ การเตรียม และการหาลักษณะของวัสดุประกอบแบบ 0-3 ระหว่างแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (Synthesis, preparation and characterization of 0-3 composite type between calcium copper titanate and high desity polyethylene)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้