

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้ ตอนที่หนึ่งทำการศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในตอนที่สองได้ทำการปรับปรุงแคลปาคาราจีแนให้มีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้นโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์แล้วทำการศึกษาผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปาคาราจีแนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และในตอนที่สามเป็นการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปาคาราจีแน ด้วยสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก ทั้งนี้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้นำมาศึกษาสมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และยังมอดุลัส) สมบัติทางกายภาพ (ปริมาณการดูดซับน้ำ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_d)) สัณฐานวิทยา (Morphology) สมบัติการย่อยสลาย โดยสมบัติต่างๆที่นำมาศึกษาจัดเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการนำพอลิเมอร์ผสมไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งรายละเอียดของการทดลองในแต่ละตอนจะได้กล่าวถึงต่อไป

4.1 การศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้

อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เนื่องจากในการทดลองต้องการเติมแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่มากลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีน คือ 70 phr จึงทำให้เกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูป เช่น ลูกโป่งฟิล์ม (Bubble) มีความเปราะไม่สามารถดึงยืดได้ต่อเนื่องทำให้ฟิล์มขาดเป็นช่วง ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยการเติมแคลปาคาราจีแนลงไปเพื่อช่วยทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดการขาด ในการทดลองตอนที่ 1 เป็นการศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนที่มีต่อ

ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ โดยเน้นการศึกษาสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ ดัชนีการไหล และสมบัติการย่อยสลาย โดยรายละเอียดของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	PE/TPS	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์
2	PE/TPS/K3	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีปริมาณแคปปาการาจีแนน 3 phr
3	PE/TPS/K5	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีปริมาณแคปปาการาจีแนน 5 phr
4	PE/TPS/K7	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีปริมาณแคปปาการาจีแนน 7 phr
5	PE/TPS/K9	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีปริมาณแคปปาการาจีแนน 9 phr

หมายเหตุ PE คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น

70:30

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการสังเกตพอลิเมอร์ผสมขณะทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ออกมาจากหัวคายของสูตร PE/TPS ขาดง่ายและไม่สามารถดึงเป็นเส้นยาวด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ แต่เมื่อเติมแคปปาการาจีแนนลงไปปริมาณ 3,5,7 และ 9 phr ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากหัวคายมีความเหนียวและสามารถดึงได้เป็นเส้นยาวได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแคปปาการาจีแนนมีสมบัติเหนียวยืดหยุ่น (Viscoelastic) [65] ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีความเหนียวยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สามารถถูกดึงยึดได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ดีขึ้น แต่ยังคงบางเป็นบางช่วง และยังพบว่าสูตร PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ทำให้พอลิเมอร์หลอม

เหลวถูกดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ยาวต่อเนื่องมากที่สุด ซึ่งลักษณะของเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีผิวขรุขระเล็กน้อยและมีสีเหลืองอ่อนตามสีของแคปปาการาจีแนน โดยลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

จากการศึกษาค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมแคปปาการาจีแนนในปริมาณที่ต่างกัน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg พบว่า การเติมการาจีแนนทำให้ค่า MFI ลดลงและเมื่อเติมแคปปาการาจีแนนในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ความหนืดสูงขึ้น โดยค่า MFI ของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 มีค่าต่ำกว่า MFI ของสูตร PE/TPS ทั้งนี้เนื่องจากแคปปาการาจีแนนที่เติมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ทำให้มีความหนืดสูง [66] โดยแคปปาการาจีแนนถือได้ว่าเป็นสารตัวเติม ดังนั้นเมื่อเติมลงไปจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเอทิลีน ขณะหลอมเหลวส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ค่า MFI จึงมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จากการสังเกตการเป่าขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล(PE/TPS) ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มยาวต่อเนื่อง โดยจะขาดเป็นช่วงๆ แต่เมื่อเติมแคปปาการาจีแนนลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มในการเป่าฟิล์มได้สมบูรณ์และต่อเนื่องมากขึ้น เพราะแคปปาการาจีแนนที่เติมลงไปทำให้ลูกโป่งฟิล์ม (Bubble) ที่ออกมาจากหัวดายวงแหวน (annular die) มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น [65] และสามารถดึงด้วยความเร็วลูกกลิ้งที่มากโดยไม่เกิดการขาด และลักษณะของฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลืองอ่อน ตามสีของการาจีแนน และพบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ที่เติมแคปปาการาจีแนนลงในปริมาณ 7 และ 9 phr สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์และต่อเนื่องมากที่สุด โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของพอลิเมอร์หลอมเหลวและเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

สูตร	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมานอกหัวคาย	ลักษณะของเม็ดคอมปาวด์ที่ได้
PE/TPS	มีผิวเรียบ ขาดง่าย ไม่สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้	เป็นเม็ดของแข็งสีขาวขุ่น ทึบแสง ผิวขรุขระ
PE/TPS/K3	มีผิวเรียบ มีความเหนียวมากขึ้น ขาดยากขึ้นแต่ไม่สามารถ process ได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K5	ผิวเรียบ เหนียวและเหนียวมากขึ้น ขาดยากขึ้น แต่ไม่สามารถ process ได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7	ผิวเรียบ มีความเหนียวและเหนียว สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดแต่ยังคงขาดเป็นช่วงๆ	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K9	ผิวเรียบ มีความเหนียวและเหนียว สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดแต่ยังคงขาดเป็นช่วงๆ	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมานอกหัวคายของเครื่อง Melt Flow Indexer
PE/TPS	1.30±0.61	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K3	0.98±0.60	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K5	0.87±0.56	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7	0.82±0.58	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K9	0.79±0.54	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะของ Bubble ที่ออกมาจากหัวตายวงแหวนคู่ของเครื่องเป่าฟิล์ม	ลักษณะของฟิล์มที่ได้และความหนาของฟิล์ม (μm)
	ได้	ไม่ได้		
PE/TPS	✓		มีความหนืด ผิวเรียบเนียน มีความเปราะ ดังนั้นไม่สามารถถูกดึงด้วยความเร็วลูกกลิ้งที่สูง จึงขาดเป็นช่วงๆ และได้ฟิล์มที่มีความยาวไม่ต่อเนื่อง ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้สมบูรณ์	ผิวขรุขระ มีสีขาวขุ่น การกระจายตัวดี แต่เนื่องจากขาดง่ายจึงทำให้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ ความหนา: 70-80 μm
PE/TPS/K3	✓		มีความหนืด ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นแต่ยังคงขาดเป็นช่วงๆ และได้ฟิล์มที่มีความยาวไม่ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75μm
PE/TPS/K5	✓		มีความหนืด เหนียว ชืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง แต่ยังคงขาดเป็นบางช่วง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75 μm
PE/TPS/K7	✓		มีความหนืด เหนียว ชืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มาก โดยไม่เกิดการขาด เป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์ และยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75μm
PE/TPS/K9	✓		มีความหนืด เหนียว ชืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มาก โดยไม่เกิดการขาด เป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์ และยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75μm

4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

4.1.2.1 Optical Microscope (OM)

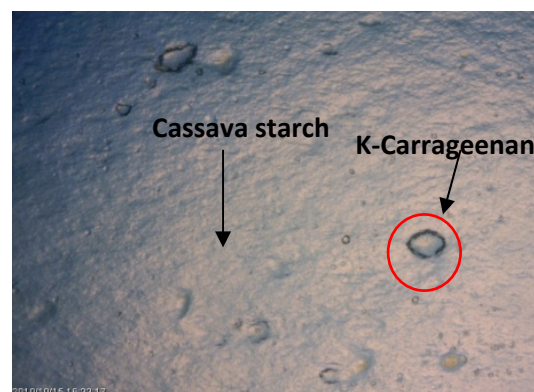
ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อดูการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลัง และแคลปาคาราจิแนนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (OM) จากการทดลองพบว่าพื้นผิวของฟิล์มสูตร PE/TPS ซึ่งไม่เติมคาราจิแนน มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ และมีเม็ดแป้งมันสำปะหลังกระจายอยู่ทั่วฟิล์ม แต่ไม่พบเม็ดใสกระจายตัวอยู่บนฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.1 ก แต่สำหรับฟิล์มสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ที่มีการเติมแคลปาคาราจิแนนในปริมาณ 3, 5, 7 และ 9 phr ตามลำดับ มีพื้นผิวที่ขรุขระ มีเม็ดแป้งมันสำปะหลังกระจายตัวอยู่ และพบเม็ดใสที่มีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลัง กระจายอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.1 ข-จ ซึ่งเม็ดใสนี้ คือ แคลปาคาราจิแนน ทั้งนี้เนื่องจากแคลปาคาราจิแนนมีสมบัติในการเกิดโซล-เจล [67] ดังนั้นเมื่อมีกลีเซอรอลอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตรทำให้แคลปาคาราจิแนนดูดซับกลีเซอรอลได้บางส่วนจากเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์และจากนั้นเมื่อได้รับความร้อนในกระบวนการผสมหรือจากกระบวนการเป่าขึ้นรูป จึงเกิดการเปลี่ยนรูปจากผงสีเหลืองอ่อนเป็นเจลแข็งใส ส่งผลให้เกิดเม็ดใสขึ้นในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ซึ่งพบว่าพื้นผิวของฟิล์มที่เติมแคลปาคาราจิแนนในปริมาณ 3, 5, 7 และ 9 มีความขรุขระมากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมแคลปาคาราจิแนน (PE/TPS) ดังรูปที่ 4.3-4.7



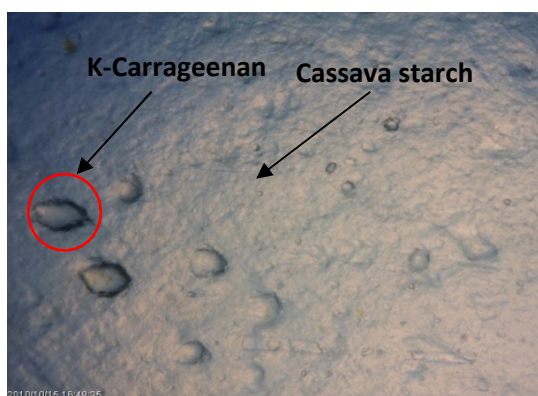
(ก)



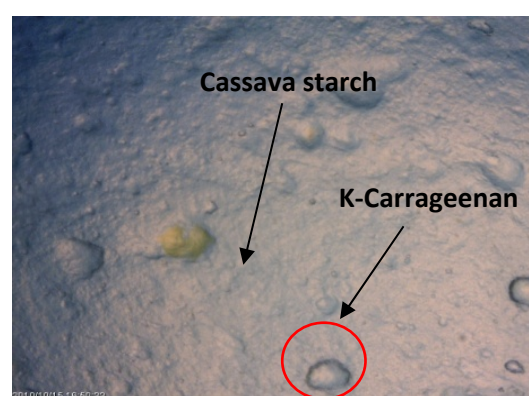
(ข)



(ค)



(ง)

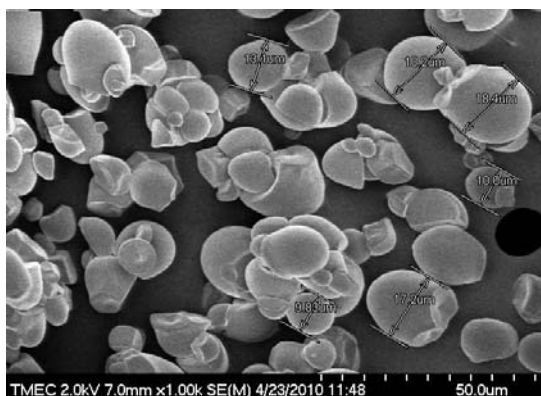


(จ)

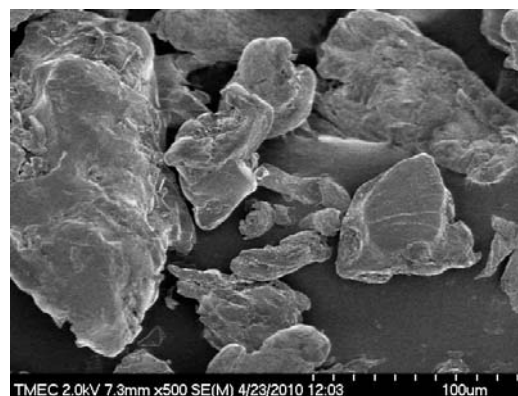
รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของแคปซาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ ในสูตรต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 200 เท่า: (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5 (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9

4.1.2.2 Scanning electron microscope

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อดูการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนน และศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปาคาราจีแนน โดยใช้เทคนิค SEM ซึ่งผลการศึกษแสดงดังรูป 4.2-4.7

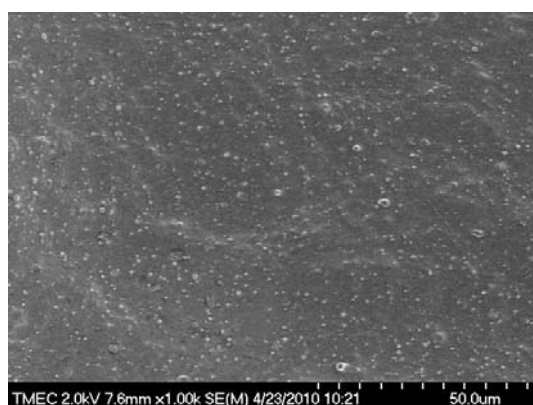


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช : (ก) แป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) แคลปาคาราจีแนน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

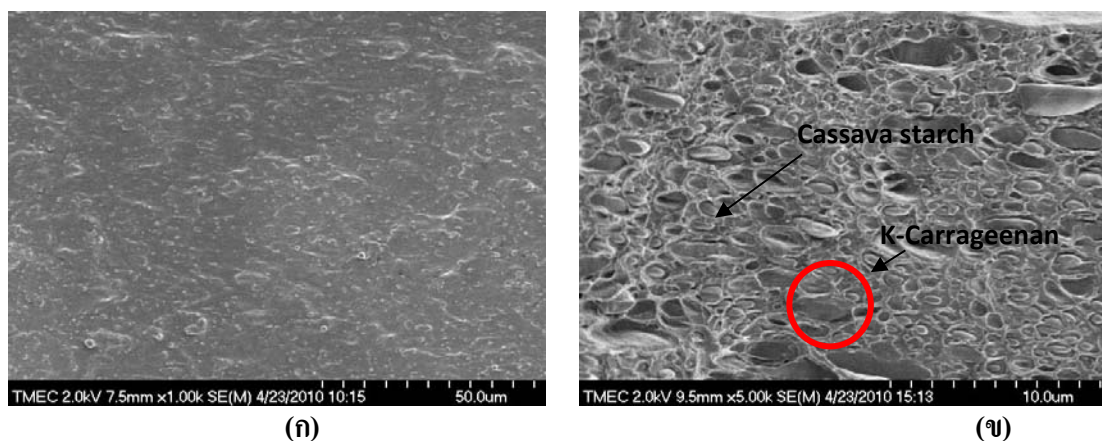


(ก)

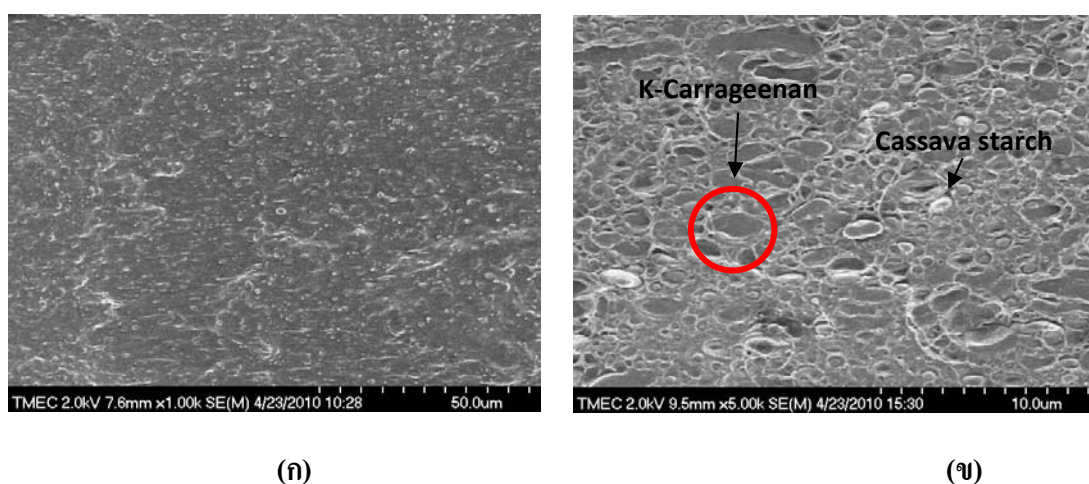


(ข)

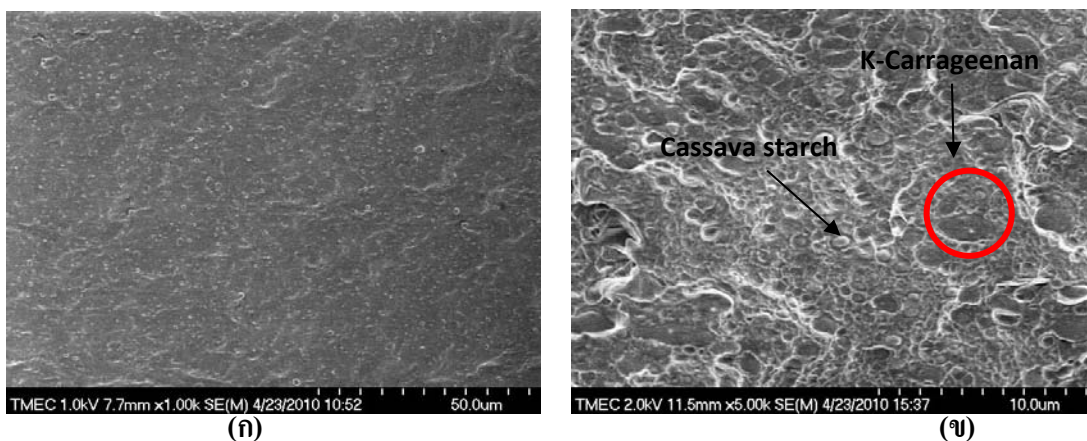
รูปที่ 4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (PE/TPS) :
(ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



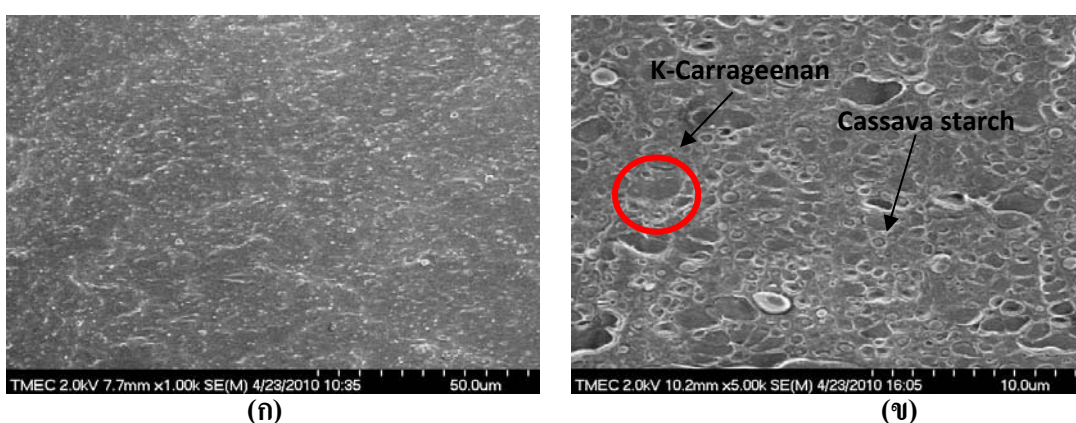
รูปที่ 4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปคาราจีแนน ปริมาณ 3 phr (PE/TPS/K3) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปคาราจีแนน ปริมาณ 5 phr (PE/TPS/K5) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.6 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปการาจีแนน ปริมาณ 7 phr (PE/TPS/K7) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.7 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปการาจีแนน ปริมาณ 9 phr (PE/TPS/K9) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.2(ก) แสดงสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลังโดยพบว่ามีความหนาของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ $18\text{ }\mu\text{m}$ และรูปร่างค่อนข้างกลม มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย ส่วนรูปที่ 4.2 (ข) เป็นสัณฐานวิทยาของแคลปการาจีแนน ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ $120\text{-}200\text{ }\mu\text{m}$

จากรูปที่ 4.3-4.7 แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณแคลปาคาราจีแนนต่างกันๆ กัน คือ พื้นผิวของฟิล์ม (รูป ก) และภาคตัดขวางฟิล์ม (รูป ข) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มสูตร PE/TPS/K3 ซึ่งมีแคลปาคาราจีแนนในปริมาณ 3 phr ดังรูปที่ 4.5 (ก) มีความขรุขระมากกว่าสูตร PE/TPS ซึ่งไม่ได้เติมแคลปาคาราจีแนน (รูปที่ 4.4(ก)) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการจีแนน 3 , 5 ,7 และ 9 phr ที่เติมลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล พบว่าปริมาณแคลปาคาราจีแนนส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ดังรูปที่ 4.3-4.7(ก)

จากรูปที่ 4.3 (ข) แสดงสัณฐานวิทยาในแนวภาคตัดขวางของฟิล์ม สูตร PE/TPS ที่ไม่ได้เติมแคลปาคาราจีแนน จะเห็นว่ามีเม็ดแป้งกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นซึ่งทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และยังพบว่าแป้งมันสำปะหลังยึดเกาะกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้ดีโดยเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ปริมาณน้อย ทั้งนี้เนื่องจากในพอลิเมอร์ผสมสูตรมีการเติมสารช่วยผสมลงไป โดยสารช่วยผสมจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมยึดระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเอทิลีน ทำให้เม็ดแป้งมันสำปะหลังเกิดการยึดเกาะและกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องได้ดี แต่เมื่อเติมแคลปาคาราจีแนนลงไปปริมาณ 3, 5, 7 และ 9 phr ดังรูป 4.4-4.7 (ข) พบว่ามีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนนกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และเมื่อปริมาณการจีแนนมากขึ้นเห็นได้ว่ามีรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตรเพียงพอที่จะช่วยยึดเกาะแคลปาคาราจีแนนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้ และยังพบว่าฟิล์มผสมสูตร PE/TPS, PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ที่ได้จากการทดลองเกิดการผสมที่ดี เพราะจากรูปร่างภาคตัดขวาง จะเห็นว่าแป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนนมีขนาดอนุภาคเล็กลง และสังเกตได้ว่าแป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนนมีรูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนไปคือจากทรงกลมเปลี่ยนเป็นทรงรี ทั้งนี้การที่แป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนนเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) เนื่องจากในงานวิจัยได้ทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blown film process) โดยมีการให้แรงแก่ฟิล์มสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บ และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์ม ซึ่งเม็ดแป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนนค่อนข้างนิ่ม จึงถูกดึงและเปลี่ยนรูปได้ง่าย

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค OM และ SEM จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าแคลปาคาราจีแนนไม่สามารถเข้ากันได้กับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แต่สามารถเกิดการกระจายตัวใน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติก
สตาร์ชได้เท่านั้น

4.1.3 สมบัติเชิงกล

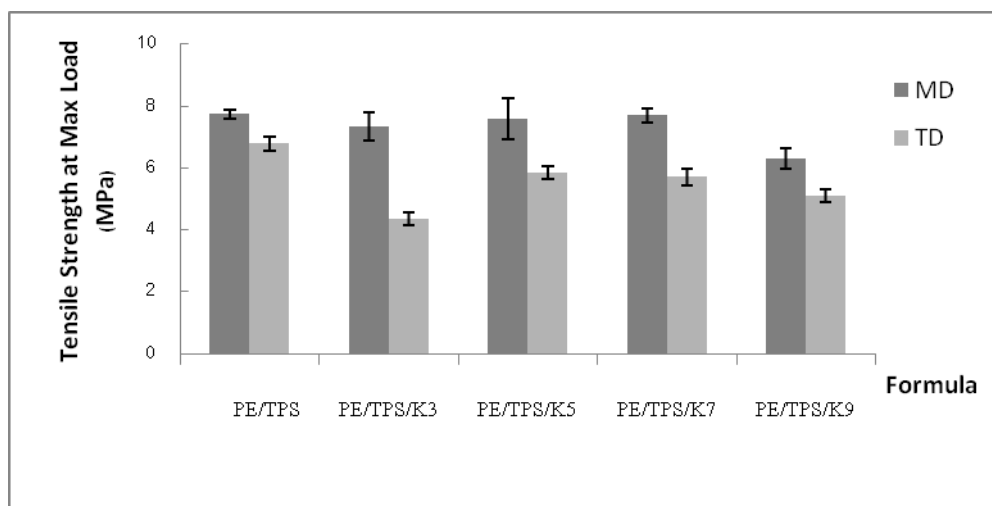
ทำการทดสอบสมบัติสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยใช้เครื่อง Universal testing machine เพื่อหา
ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (Tensile strength at Max Load) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุด
ขาด (% Elongation at break) และค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) ทั้งในแนวตามเครื่องจักร
(Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) ตามมาตรฐาน
ASTM D 882

จากรูปที่ 4.8 พบว่าสูตร PE/TPS ซึ่งไม่ได้เติมการาจีแนนมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรง
สูงสุด ในแนวตามเครื่องจักร เท่ากับ 7.74 MPa และในแนวขวางเครื่องจักรเท่ากับ 6.78 MPa แต่
เมื่อเติมการาจีแนนลงไป 3 phr (PE/TPS/K3) จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด
ลดลง ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ในแนวตามเครื่องจักรมีค่าเท่ากับ 7.35 MPa และ
ในแนวขวางเครื่องจักร มีค่า เท่ากับ 4.46 MPa ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแคลปการาจีแนนจะไปแทรก
ตัวอยู่ในส่วนที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความ
หนาแน่นต่ำเชิงเส้น) ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากขึ้นซึ่งรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้น
เป็นบริเวณที่มีแรงยึดเกาะกันไม่แข็งแรงจึงเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน [68] ซึ่งสอดคล้องกับ
ผลทางสัณฐานวิทยาที่พบว่าแคลปการาจีแนน ที่เติมลงไปไม่มีความเข้ากันกับแป้งมันสำปะหลัง
และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แต่จะกระจาย
ตัวในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โม
พลาสติกสตาร์ช จึงทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคขึ้น ดังแสดงโดยสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.4ซึ่ง
เป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้รับแรงกระทำได้น้อย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรง
สูงสุด มีค่าลดลง และพบว่าค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึง ณ จุดขาด
(% Elongation at Break) ของสูตร PE/TPS/K3 ที่เติมการาจีแนน 3 phr มีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่า
ความแข็งแรงดึง ดังรูปที่ 4.9-4.10

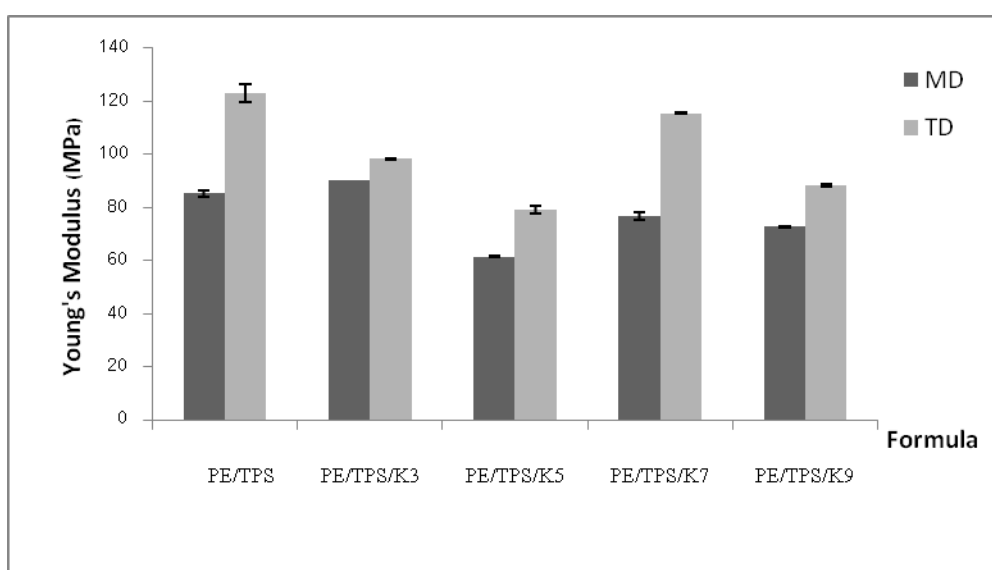
จากรูปที่ 4.8-4.10 เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่เติมแคลปการาจีแนนในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 3,
5, 7 และ 9 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ได้ไม่แตกต่างกันตามปริมาณแคลปการาจีแนนที่
เพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลปการาจีแนนกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องได้ดี และจากสัณฐานวิทยา
พบว่ารอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการาจีแนนทำให้เกิด
จุดบกพร่องในชิ้นงานในปริมาณที่ไม่มาก ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำ จึงสามารถรับแรงกระทำได้
ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดไม่แตกต่างกัน และพบว่าค่ายังมอดุลัสของสูตร
PE/TPS/K3, PE/TPS/K5 ซึ่งเติมแคลปการาจีแนน 3 และ 5 phr มีค่าลดลงแต่เมื่อเติมแคลปการา

จีแนน 7 phr (PE/TPS/K7) ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นและลดลงอีกครั้งเมื่อเติมแคลปการจีแนน 9 phr (PE/TPS/K9) ซึ่งค่ามอดุลัสมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ทำให้ไม่สามารถสรุปแนวโน้มได้ แต่พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5 และ PE/TPS/K9 ที่เติมแคลปการจีแนน 3, 5 และ 7 phr ตามลำดับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมแคลปการจีแนน 9 phr ทั้งนี้เนื่องจากแคลปการจีแนนมีสมบัติวิสโคอิลาสติก ดังนั้นสามารถถูกยืดได้ดี ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการจีแนนเพิ่มขึ้น และยังพบว่าปริมาณแคลปการจีแนน 7 phr (PE/TPS/K7) ให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดุลัส สูงที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการสังเกตลักษณะทางกายภาพขณะทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และขณะทำการเป่าขึ้นรูปซึ่งพบว่าสูตรที่เติมแคลปการจีแนน 7 phr ทำให้สามารถดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ยาว และสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ยาวต่อเนื่องและสมบูรณ์

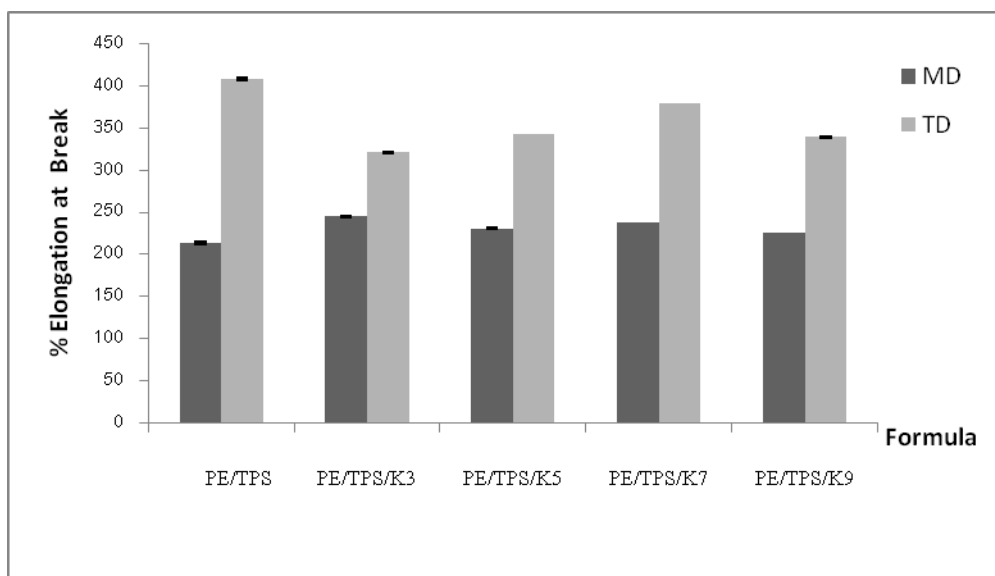
เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดุลัส แนวตามเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักรของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตร พบว่าค่าความแข็งแรงดึงในแนวตามเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่องจักรเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป โดยมีการให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บในแนวตามเครื่องจักร และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์มในแนวขวางเครื่องจักรทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนทั้งสองทิศทาง โดยแรงที่ใช้ในการดึงม้วนในแนวตามเครื่องจักรอาจมีมากกว่าแรงที่ใช้ในการเป่าขยายในแนวขวางเครื่องจักรจึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางตามเครื่องจักรได้มากกว่า นอกจากนี้ค่ายังมอดุลัสและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ในแนวขวางเครื่องจักรมีค่ามากกว่าแนวตามเครื่องจักร คาดว่าขณะทำการเป่าอาจใช้แรงลมในการเป่าน้อยทำให้พอลิเมอร์ยังถูกขยายตัวได้ไม่เต็มที่ ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์จึงทำให้มีความสามารถในการดึงยืดในแนวขวางเครื่องจักรได้มากกว่าแนวตามเครื่องจักร



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคลาไรจีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคลาไรจีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนนในปริมาณต่างๆทั้งในแนวตามเครื่องจักร(MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

4.1.4 สมบัติทางความร้อน

4.1.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC เพื่อหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก ($T_{c\ onset}$) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมแคลปาคาราจีแนน มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ที่ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่เติมแคลปาคาราจีแนน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าแคลปาคาราจีแนนไม่มีผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) จึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามแคลปาคาราจีแนนมีผลต่อค่าเอนทัลปี (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ซึ่งพบว่าเมื่อเติมแคลปาคาราจีแนนจะทำให้ค่าเอนทัลปีลดลง ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากแคลปาคาราจีแนนจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์(พอลิเอทิลีน)ในส่วนที่เป็นผลึก ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการการจัดเรียงตัวได้ลดลง ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง

จากตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณแคปปาราคีแนน (3, 5, 7 และ 9 phr) ให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ไม่แตกต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณ แคปปาราคีแนนไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) มีค่าไม่แตกต่างกัน และยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) มีค่าไม่แตกต่างกัน คาดว่าปริมาณแคปปาราคีแนน 3 phr เป็นปริมาณที่เพียงพอสามารถที่สามารถเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลส่วนที่เป็นผลึก ของพอลิเอทิลีนแต่เมื่อเติมแคปปาราคีแนนมากขึ้น คือ 5, 7 และ 9 phr คาดว่าเกิดความไม่เข้ากันของแคปปาราคีแนนและพอลิเอทิลีน จนทำให้แคปปาราคีแนนไม่สามารถเข้าแทรกส่วนเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนได้มากนัก เพียงแค่กระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนส่วนที่เป็นอสัณฐานดังนั้นความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่งผลให้ค่าเอนทัลปี (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณแคปปาราคีแนนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร จากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว $T_m(^{\circ}\text{C})$	อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก $T_{c\ onset}(^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)
PE/TPS	110	91	174.2	29.61
PE/TPS/K3	108	91	140.4	23.83
PE/TPS/K5	108	91	147.8	24.85
PE/TPS/K7	110	91	162.8	25.45
PE/TPS/K9	108	91	140.1	23.12

4.1.4.2 Thermogravimetric analysis (TGA)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร จากเทคนิค TGA

Formula	Onset thermal degradation temperature (°C)			
	Glycerol	K-Carrageenan	Cassava starch	LDPE/LLDPE
K-Carrageenan	-	245	-	-
Polyethylene	-	-	-	445
Cassava starch	-	-	303	-
Glycerol	150	-	-	-
PE/TPS	157	-	306	443
PE/TPS/K3	159	247	288	428
PE/TPS/K5	155	248	281	415
PE/TPS/K7	153	246	281	434
PE/TPS/K9	158	247	277	450

จากตารางที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวขององค์ประกอบที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตร โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของกลีเซอรอล เท่ากับ 150 °C อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแคปทาการา จีแนนเท่ากับ 245 °C อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งมันแป้งสำปะหลังเท่ากับ 303 °C และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 445 °C และจากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมสูตร(ภาคผนวก ข) พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 5 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนัก

ของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิในช่วง 0-100 °C ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150-159 °C ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการของแข็งคาร์โบไฮเดรตในช่วงอุณหภูมิ 247 °C ช่วงที่สี่เป็นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังในช่วงอุณหภูมิประมาณ 270-306 °C และช่วงที่ 5 เป็นการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นในช่วงอุณหภูมิ 415-450 °C

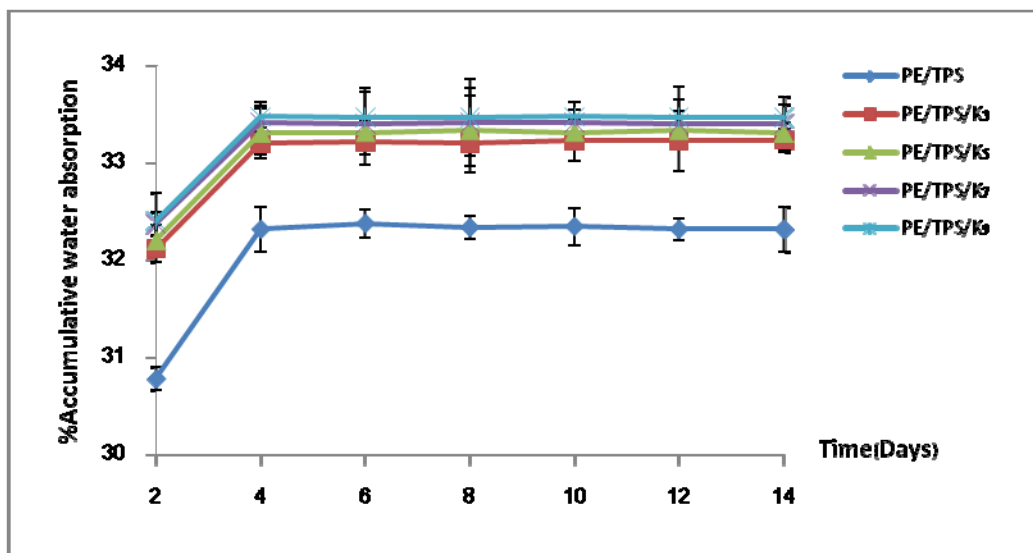
จากเทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible) เนื่องจากเทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารแต่ละองค์ประกอบที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตร เช่น พอลิเอทิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแคลปคาร์ราจีแนน และจากการที่ทุกสูตรมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่เหมือนกันทำให้ลักษณะของเทอร์โมแกรมที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน และยังพบว่า การเติมคาร์ราจีแนนลงไปจะทำให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลง เนื่องจากแคลปคาร์ราจีแนนที่ใส่ลงไปไม่เข้ากับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แต่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งผลสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังได้กล่าวในข้างต้น และเนื่องจากแคลปคาร์ราจีแนนมีเสถียรภาพสูง เกิดการสลายได้ยากซึ่งสังเกตได้จากเทอร์โมแกรมในภาคผนวก ข (รูปที่ ข-12) ดังนั้นคาดว่าแคลปคาร์ราจีแนนดูดความร้อนแล้วสะสมความร้อนไว้ในระยะนานได้โดยไม่เกิดการสลายตัวทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนไปยังแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้ ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้รับความร้อนได้มากขึ้นจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิลดลงและคาดว่าแคลปคาร์ราจีแนนไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของส่วนที่เป็นผลึกของสายโซ่พอลิเอทิลีน ทำให้พอลิเอทิลีนมีความเป็นผลึกลดลง จึงต้านทานความร้อนได้น้อยลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ลดลง (ดังตารางที่ 4.5) ดังนั้นเมื่อพอลิเอทิลีนได้รับความร้อนจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ดังตารางที่ 4.6 พบว่าสูตรที่การเติมแคลปคาร์ราจีแนน 3, 5 และ 7 (PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7) ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมแคลปคาร์ราจีแนน (PE/TPS) และยังพบว่าปริมาณแคลปคาร์ราจีแนน ที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ผสมทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่พบว่าสูตร PE/TPS/K5 ซึ่งเติมแคลปคาร์ราจีแนน 5 phr ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งคาดว่าแคลปคาร์ราจีแนนสามารถเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเอทิลีนได้มากจึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง ดังนั้นพอลิ

เอทิลีนจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง และสูตร PE/TPS/K9 จะทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเพิ่มขึ้น คาดว่าแคปปีการาจีแนปริมาณ 9 phr เป็นปริมาณที่มากซึ่งอาจแยกวัฏภาคออกมาจากพอลิเอทิลีนจึงส่งผลให้ค่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้น

4.1.5 การศึกษาการดูดซับน้ำ (Water Absorption)

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ที่มีปริมาณการาจีแนที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อเติมแคปปีการาจีแนลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของแคปปีการาจีแน มีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้ว ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน (H-bond) กับน้ำได้ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

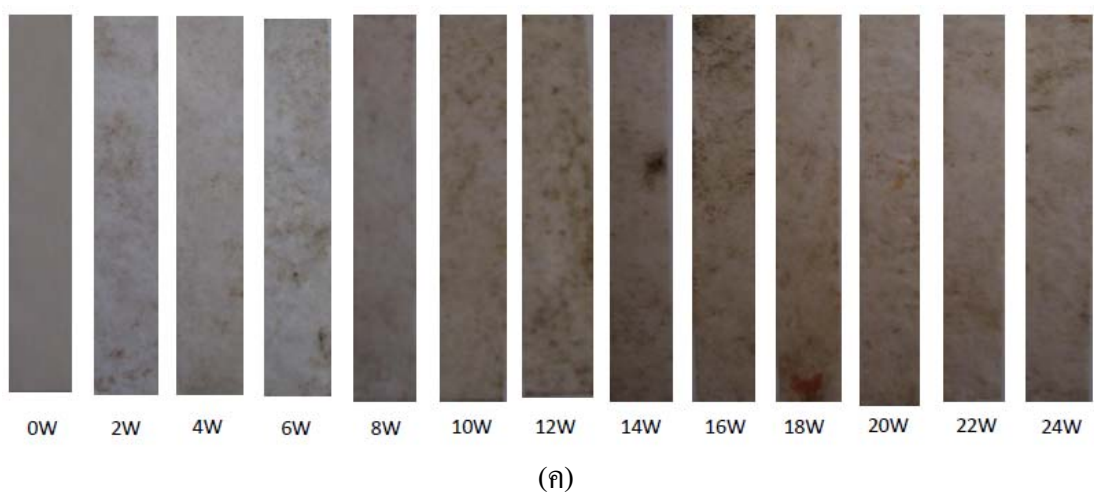
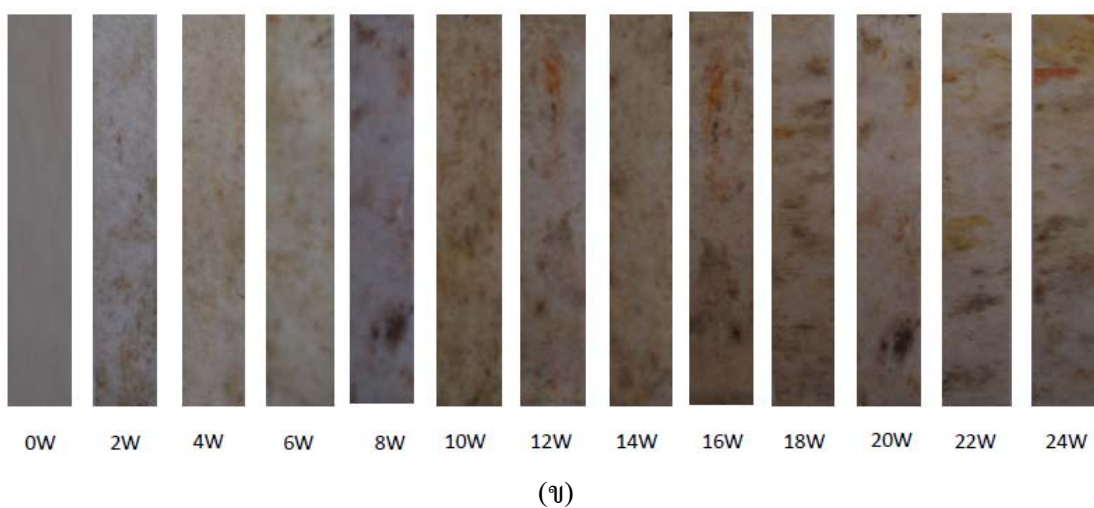
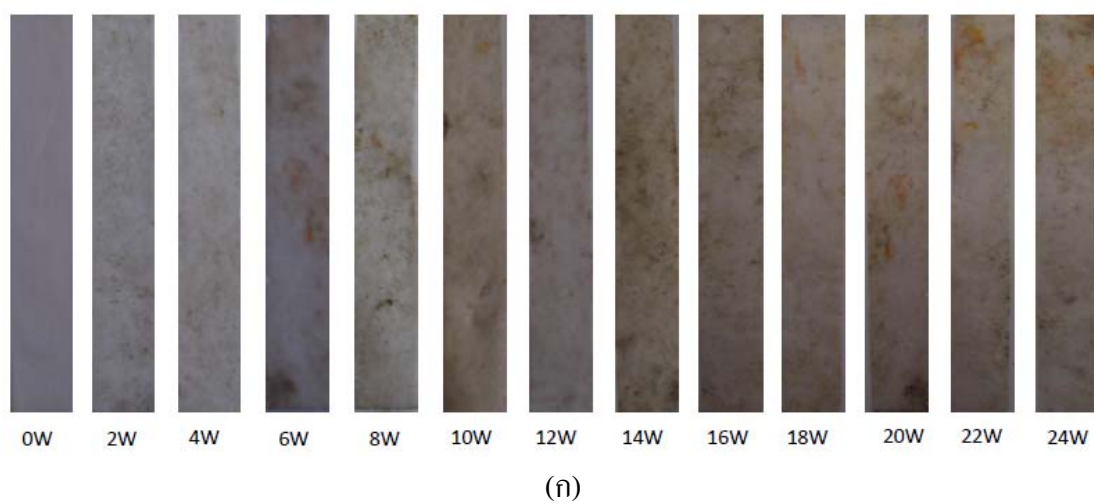
และในช่วง 4 วัน แรกของการแช่ฟิล์มในน้ำ พบว่าฟิล์มในแต่ละสูตรสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว และหลังจากวันที่ 4 พบว่าฟิล์มในแต่ละสูตรสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังและแคปปีการาจีแนสามารถดูดซับน้ำได้ และจะเกิดการบวมตัว (Swell) จนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคแป้งมันสำปะหลังและแคปปีการาจีแน เกิดการอึดตัวไปด้วยน้ำ จึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก ดังนั้นหลังจากวันที่ 4 ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าคงที่ และยังพบว่าปริมาณแคปปีการาจีแนที่ใส่ลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณแคปปีการาจีแนที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ผสมไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแคปปีการาจีแนที่ใส่ลงในพอลิเมอร์ผสมมีความแตกต่างกันน้อย คือ 3, 5, 7 และ 9 phr ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 จึงไม่แตกต่างกัน

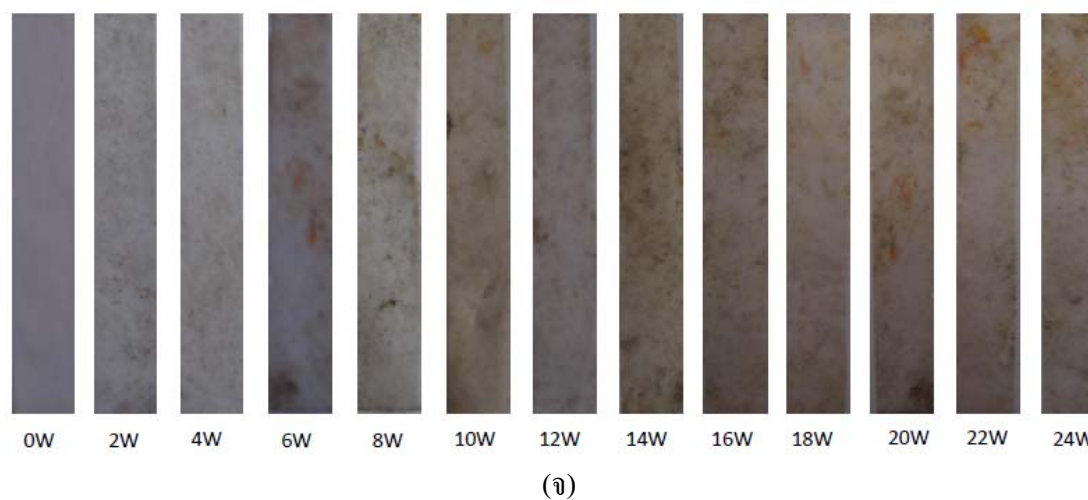
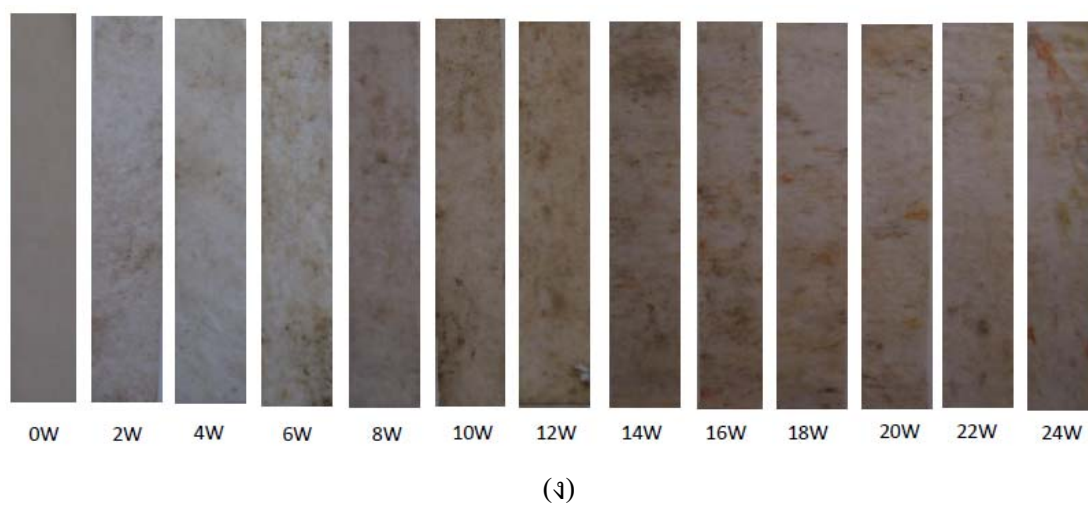


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่แตกต่างกัน

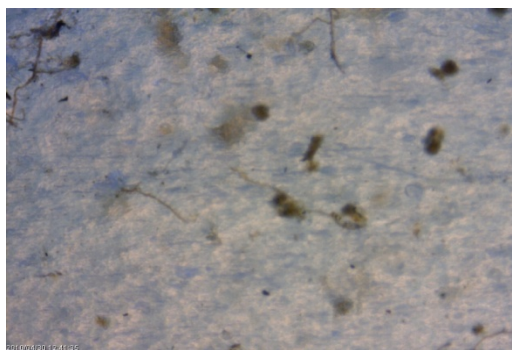
4.1.6 สมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน (Soil Burial test)

ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในระดับเบื้องต้นด้วยการฝังชิ้นงานในดิน โดยดินที่ใช้ฝังชิ้นงานเป็นแบบสภาวะธรรมชาติคือกลางแจ้ง (out door) โดยจะขุดชิ้นงานขึ้นมาสังเกตการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 เดือน (แสดงดังรูปที่ 4.12) และเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่างโดยการกัดกินของจุลินทรีย์ จึงสุมนำชิ้นงานบางสูตรไปทำการส่องดูพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (OM) พบว่ามีรอยสีดำ น้ำตาล เกิดขึ้นที่พื้นผิวของชิ้นงานซึ่ง เกิดจากเชื้อรากัดกินบริเวณที่เป็นส่วนของแป้งและการจากเน่าซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ดังนั้นทำให้ชิ้นงานโดยรวมมีสีน้ำตาลดำและมีผิวที่ขรุขระ และมีรูเล็กๆ เกิดขึ้น ดังแสดงในรูป 4.13





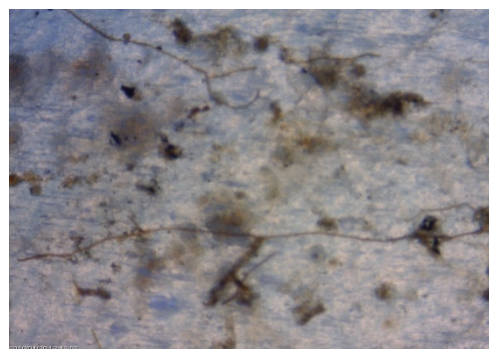
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการผิ่ดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%,
pH 7 : (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ
(จ) PE/TPS/K9



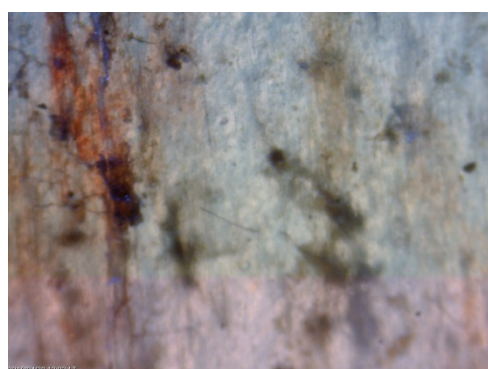
(ก)



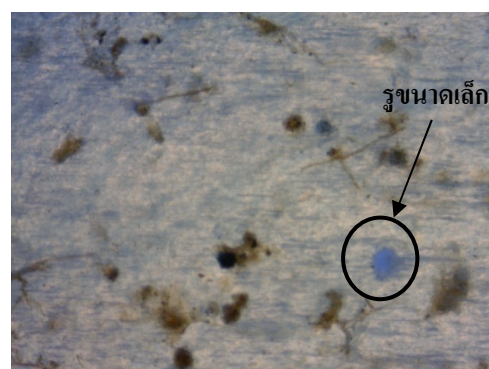
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.13 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 600 เท่า : (ก) PE/TPS , (ข) PE/TPS/K3 , (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9

จากรูปที่ 4.12 (ก-จ) แสดงภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์พบว่าฟิล์มสูตรที่เติมการาจีแนนสามารถเกิดรอยดำน้ำตาลในชิ้นงานได้เช่นเดียวกับฟิล์มสูตรที่ไม่ได้เติมการาจีแนน(PE/TPS) ทั้งนี้เนื่องจากการาจีแนนสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ [67] และสามารถย่อยสลายโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นจึงยังช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการย่อยสลายได้มากยิ่งขึ้น และเนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups, -OH) จำนวนมาก ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง และแคลปการาจีแนนมีโครงสร้างที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิลเช่นกัน จึงสามารถยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และมีสมบัติชอบน้ำ ทำให้สามารถดูดซึมความชื้นได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบวนการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของจุลินทรีย์ในดินซึ่งต้องอาศัยความชื้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการาจีแนน จึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น ซึ่งกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของพอลิเมอร์มี 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นที่ 1 น้ำจะแพร่เข้าไป เป็นผลให้ฟิล์มเกิดการบวมและเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นบนฟิล์ม และ ขั้นที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์

จากรูปที่ 4.13 (ก-จ) พบว่า พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร PE/TPS/K3 , PE/TPS/K5 , PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 หลังจากฝังดินมีรอยจุลินทรีย์ เกิดจุดสีน้ำตาลดำมากกว่า สูตร PE/TPS ที่ไม่ได้เติมการาจีแนนแสดงว่าแคลปการาจีแนนมีส่วนช่วยให้ฟิล์มถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในดินได้มากยิ่งขึ้น โดยจุดสีดำที่เกิดขึ้นคือการเกิดสปอร์ของเชื้อราและการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อราซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่ปริมาณแคลปการาจีแนนที่เติมลงไปไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณแคลปการาจีแนนที่เติมลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรมีปริมาณน้อย จึงเห็นการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน ดังรูป 4.13 (ข-จ)

จากการทดลองใน ตอนที่ 1 พบว่าการาจิแนนช่วยทำให้ลูกโป่งฟิล์มมีความเหนียว (sticky) มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง และจากสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (Tensile Strength at Max Load) ค่าเปอร์เซ็นต์ดิ่งยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และ ค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) ลดลง และจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า แคปปาคาราจิแนนจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง แต่แคปปาคาราจิแนนที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมช่วยให้กระบวนการเป่าขึ้นรูปเกิดได้สมบูรณ์ และยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการาจิแนนที่เติมลงไป ในพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาวิช พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการาจิแนนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณแคปปาคาราจิแนนไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนแต่จากการทดลองพบว่าสูตร PE/TPS/K7 ซึ่งเติมแคปปาคาราจิแนน 7 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยต่อไป เพราะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไม่มากเมื่อเทียบกับสูตร PE/TPS และเป็นปริมาณที่ถูกดิ่งยืดและสามารถเป่าขึ้นรูปได้ดี

ดังนั้นในตอนที่ 1 ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติได้มากยิ่งขึ้นโดยถ่วงรวมปริมาณแคปปาคาราจิแนนที่เติมลงไป 7 phr กับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 70 phr ทำให้มีส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติเพิ่มขึ้นคือ คือ 77 phr ดังนั้นแนวโน้มการย่อยทางชีวภาพจึงดีขึ้น

4.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปการจีแนในฟิล์มพอลิ

เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน

จากการทดลองตอนที่ 1 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแคลปการจีแนในขั้นตอนการผสม โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นั้น มีความหนืด ไหลช้า ทำให้ไม่สามารถดึงเข้าเครื่องตัด เม็ดอัดโนมิตได้ โดยจะเกิดการขาดเป็นช่วงๆ ส่งผลให้กระบวนการผลิตไม่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องนี้จึงได้ทำการผสมกลีเซอรอลลงในแคลปการจีแนเพื่อให้มีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปการจีแนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน โดยเน้นการศึกษาดัชนีการไหล สมบัติเชิงกล ซึ่งผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้ และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจึงใช้อักษรย่อเพื่อแสดงสูตรดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	PE/TPS/K7	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน
2	PE/TPS/K7/G10	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 10% ของ แคลปการจีแน
3	PE/TPS/K7/G20	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 20% ของ แคลปการจีแน
4	PE/TPS/K7/G30	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 20% ของ แคลปการจีแน
5	PE/TPS/K7/G40	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 40% ของ แคลปการจีแน
6	PE/TPS/K7/G50	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 50% ของ แคลปการจีแน

หมายเหตุ PE คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น 70:30

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการสังเกตพอลิเมอร์ผสมสูตรในระหว่างกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียว หนองคู่พบว่า การเติมกลีเซอรอลลงในแคลปการาจีแนนช่วยทำพอลิเมอร์ผสมที่ออกมาหน้าหัวคายไหลได้ต่อเนื่องมากกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอล (PE/TPS/K7) โดยสามารถดึงได้เป็นเส้นยาวโดยไม่ขาด และเมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่ใส่ลงในแคลปการาจีแนนมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ออกมาจากหน้าหัวคาย มีความเหนียว ไหลได้ดี และสามารถดึงเข้าเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ดีขึ้น โดยไม่เกิดการขาด และผิวของเม็ดคอมปาวด์ที่ได้มีผิวขรุขระเล็กน้อยและมีสีเหลืองอ่อน โดยลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่อยู่ระหว่างขั้นตอนการผสมแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมและเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนองคู่

สูตร	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมานอกหัวคาย	ลักษณะของเม็ดคอมปาวด์ที่ได้
PE/TPS/K7	มีผิวเรียบ ขาดง่าย ไม่สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระ
PE/TPS/K7/G10	มีผิวเรียบ มีความเหนียวมากขึ้น ขาดยากขึ้นแต่ไม่สามารถดึงได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G20	ผิวเรียบ เหนียวและเหนียวมากขึ้น ขาดยากขึ้น แต่ไม่สามารถดึงได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G30	ผิวเรียบ มีความเหนียวและเหนียว สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดโดยไม่ขาด	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G40	ผิวเรียบ มีความเหนียวและเหนียว สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดโดยไม่ขาด	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G50	ผิวเรียบ มีความเหนียวและเหนียว สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดโดยไม่ขาด	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหล (MFI) พบว่าค่าดัชนีการไหล(MFI)ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์/แคลปการาจีแนน ที่มีการเติมกลีเซอรอลลงในส่วนของแคลปการาจีแนน มีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่เติมกลีเซอรอลลงในแคลปการาจีแนน และเมื่อปริมาณ

กลีเซอรอลในการจีแน่มากขึ้นจะทำให้ค่า MFI เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลที่ใส่ลงในคาราจีแนเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของคาราจีแน ทำให้สายโซ่โมเลกุลขยับเขยื้อนได้มากขึ้น มีความยืดหยุ่น(Flexible) มากขึ้น [41] ดังนั้นเมื่อเคลปาคาราจีแนที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมมีความยืดหยุ่น จึงทำให้เกิดการไหลที่ดีด้วย โดยพิจารณาจากค่า MFI ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ค่า MFI ไม่ได้เพิ่มอย่างเห็นได้ชัดเจนนัก เนื่องจากในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณเคลปาคาราจีแนผสมอยู่น้อย ทำให้กลีเซอรอลที่เติมลงในคาราจีแนมีผลต่อกระบวนการผสมและกระบวนการเป่าขึ้นรูป ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป โดยผลการทดสอบดัชนีการไหลแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมาจากหัวคายของเครื่อง Melt Flow Indexer
PE/TPS/K7	0.82±0.58	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G10	0.83±0.43	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G20	0.84±0.51	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G30	0.86±0.47	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G40	0.88±0.52	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G50	0.91±0.46	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง

จากการสังเกตการเป่าขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม พบว่า สูตรที่เติมกลีเซอรอลลงไปในการจีแนในพอลิเมอร์ผสม มีความสามารถในการดึงยืดระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปได้มากขึ้น เนื่องจากเคลปาคาราจีแนดูดซับกลีเซอรอลไว้ ส่งผลให้กลีเซอรอลเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของคาราจีแน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลงทำให้สายโซ่เคลปาคาราจีแนมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อีกทั้งในกระบวนการผสมและกระบวนการเป่าขึ้นรูปมีการให้ความร้อนดังนั้นเคลปาคาราจีแนที่มีกลีเซอรอลอยู่สามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้คือเมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นสายโซ่อิสระ และเมื่ออุณหภูมิลดลงสายโซ่อิสระจะเปลี่ยนเป็นสายโซ่เกลียวและจากนั้นจะเกิดการรวมตัวของกลุ่มสายโซ่เกลียวเกิดเป็นเจลที่มีโครงสร้างร่างแหได้ (รูปที่ 4.14) ส่งผลให้มีความเหนียวมากขึ้น [41] ดังนั้นจึงสามารถดึงยืดได้ระหว่างกระบวนการผลิตและช่วยให้เป่าลมได้มากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มมีความบางลงเล็กน้อย โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะของ Bubble ที่ออกมาจากหัวดาวยง แหวนคู้ของเครื่องเป่าฟิล์ม	ลักษณะของฟิล์มที่ได้ และความหนาของฟิล์ม (μm)
	ได้	ไม่ได้		
PE/TPS/K7	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้ มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระ มีสีขาว เหลืองอ่อน การกระจาย ตัวดี แต่เนื่องจากขาด ความหนา : 60-75μm
PE/TPS/K7/G10	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้ มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสี เหลืองอ่อน การ กระจายตัวดี ความหนา: 60-72μm
PE/TPS/K7/G20	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้ มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสี เหลืองอ่อน การ กระจายตัวดี ความหนา: 60-72μm
PE/TPS/K7/G30	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้ มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสี เหลืองอ่อน การ กระจายตัวดี ความหนา: 60-72 μm
PE/TPS/K7/G40	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้ มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสี เหลืองอ่อน การ กระจายตัวดี ความหนา: 60-72 μm

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะของ Bubble ที่ออกมาจากหัวตายวงแหวนคู้ของเครื่องเป่าฟิล์ม	ลักษณะของฟิล์มที่ได้และความหนาของฟิล์ม (μm)
	ได้	ไม่ได้		
PE/TPS/K7/G50	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระ มีสีขาวเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี แต่เนื่องจากขาด ความหนา: 60-75 μm

4.2.2 สมบัติทางความร้อน

ในการทดลองได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนเบื้องต้นของแคปปาคาราจีแนบบริสุทธิ์และแคปปาคาราจีแนบที่ผสมกลีเซอรอลในอัตราส่วนผสมระหว่างแคปปาคาราจีแนบ : กลีเซอรอลเท่ากับ 1:1 โดยใช้เครื่อง DSC จากการทดลองพบว่าแคปปาคาราจีแนบบริสุทธิ์มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) เท่ากับ 105 °C และค่าเอนทัลปี เท่ากับ 220.9 J/g แต่เมื่อผสมกลีเซอรอลไปในแคปปาคาราจีแนบ ให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและค่าเอนทัลปีที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแคปปาคาราจีแนบบริสุทธิ์ โดยค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และค่าเอนทัลปี ของแคปปาคาราจีแนบที่ผสมกลีเซอรอล เท่ากับ 128 °C และ 287 J/g ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลจะไปลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แคปปาคาราจีแนบทำให้สายโซ่แคปปาคาราจีแนบมีโอกาสรกขยับเขยื้อนสายโซ่ได้มากขึ้น และเนื่องจากแคปปาคาราจีแนบมีประจุทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงเกิดแรงดึงดูดกับกลีเซอรอล [41] ส่งผลให้สายโซ่แคปปาคาราจีแนบสามารถเกิดการเปลี่ยนโครงรูปจากสายที่ไม่เป็นระเบียบเป็นสายโซ่เกลียวที่เป็นระเบียบและยืดหยุ่นได้มากยิ่งขึ้น ทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเติมกลีเซอรอลส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและค่าเอนทัลปีจึงมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นแนวทางเบื้องต้นในการที่เลือกใช้กลีเซอรอลมาปรับปรุงสมบัติความเป็นพลาสติกของแคปปาคาราจีแนบ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

แต่หลังจากทำการเตรียมฟิล์มและศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/แคปปาคาราจีแนบ ที่ผสมกลีเซอรอลลงไปในส่วนที่เป็นคาราจีแนบในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนบ (สูตร PE/TPS/K7/G10 , PE/TPS/K7/G20 , PE/TPS/K7/G30 , PE/TPS/K7/G40 และ PE/TPS/K7/G50 ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/แคปปาคาราจีแนบ (PE/TPS/K7) พบว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไป

ในส่วนของการแปรสภาพการจี้แนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/แคลปการจี้แน ให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก ($T_{c \text{ onset}}$) แตกต่างกันเล็กน้อย อาจกล่าวได้ว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในการแปรสภาพการจี้แนไม่มีผลต่อคุณสมบัติของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c \text{ onset}}$) จึงมีค่าต่างกันเล็กน้อย แต่กลีเซอรอลที่เติมลงไปในการแปรสภาพการจี้แนมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก โดยพบว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในการแปรสภาพการจี้แนจะทำให้ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลทำให้แคลปการจี้แนที่อยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดแรงकुอล โดยการเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่อิสระเป็นสายโซ่เกลียวที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15) และแคลปการจี้แนอาจเหนี่ยวนำให้สายโซ่ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของพอลิเอทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความเป็นผลึกมากขึ้น ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

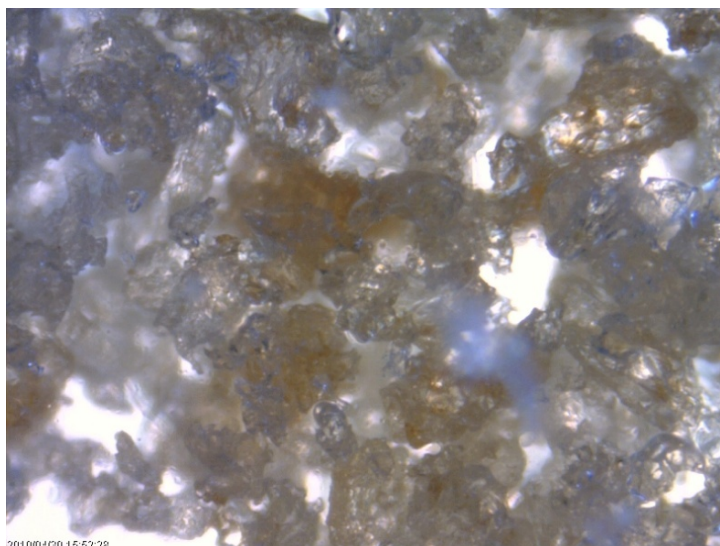
เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่เติมกลีเซอรอลลงในแคลปการจี้แนในปริมาณที่แตกต่างกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก ($T_{c \text{ onset}}$) ไม่แตกต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไปในการแปรสภาพการจี้แนไม่มีผลต่อคุณสมบัติของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c \text{ onset}}$) มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงในแคลปการจี้แนมีผลต่อเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก โดยพบว่า สูตร PE/TPS/K7/G30, PE/TPS/K7/G40 และ PE/TPS/K7/G50 ซึ่งเติมกลีเซอรอลลงในแคลปการจี้แน ปริมาณ 30%, 40% และ 50 % โดยน้ำหนักของแคลปการจี้แน ให้ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงกว่า สูตร PE/TPS/K7/G10, PE/TPS/K7/G20 ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปในการแปรสภาพการจี้แนปริมาณมาก (30%, 40%, 50 %) ทำให้สายโซ่ของแคลปการจี้แนมีโอกาสเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่อิสระเป็นสายโซ่เกลียวมากขึ้น ดังนั้นอาจเหนี่ยวนำให้สายโซ่ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของพอลิเอทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น ดังนั้นความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเอนทัลปีและค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว และเอนทัลปีของแคลปการจีแนจากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการ หลอมเหลว $T_m(^{\circ}\text{C})$	อุณหภูมิเริ่ม การตกผลึก $T_{c\text{ onset}}(^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็น ผลึก (%Crystallinity)
K-carrageenan	104	-	220.9	-
K-carrageenan + Glycerol (ratio of K-carrageenan: Glycerol = 1:1)	128	-	287	-

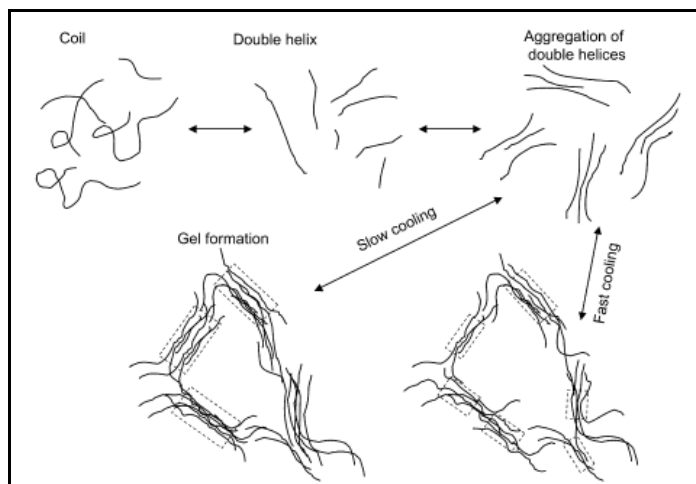
ตารางที่ 4.12 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์ม
พอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆจากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการ หลอมเหลว $T_m(^{\circ}\text{C})$	อุณหภูมิเริ่ม การตกผลึก $T_{c\text{ onset}}(^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็น ผลึก (%Crystallinity)
PE/TPS/K7	110	91	162.8	25.45
PE/TPS/K7/G10	110	86	157	26.09
PE/TPS/K7/G20	111	85	157.2	26.02
PE/TPS/K7/G30	114	86	192.3	31.23
PE/TPS/K7/G40	114	86	190.8	30.86
PE/TPS/K7/G50	114	85	186.7	30.77



รูปที่ 4.14 ภาพการเกิดการบวมตัวของผงแคปปลาคาราจีแนนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในปริมาณ 30% ของแคปปลาคาราจีแนน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 600 เท่า

จากรูปที่ 4.14 แสดงภาพการเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของแคปปลาคาราจีแนนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในปริมาณ 30% ของแคปปลาคาราจีแนน โดยในการทดลองทำการให้ความร้อนแก่แคปปลาคาราจีแนนที่ผสมกลีเซอรอล 30% แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (OM) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่าผงแคปปลาคาราจีแนนสีเหลืองอ่อนเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่มีสีใส ซึ่งโดยทั่วไปแคปปลาคาราจีแนนมีสมบัติในการเกิดเจล โดยเมื่อแคปปลาคาราจีแนนถูกทำให้อยู่ในรูปของสารละลายจะเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Coil) และขณะเย็นตัวลงจะเกิดโครงสร้างที่เป็นสายโซ่เกลียวคู่ (Double helix) เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะเกิดโครงสร้างที่เป็น 3 มิติ โดยสายโซ่พอลิเมอร์แต่ละเส้นจะรวมตัวเข้ามาใกล้กันและเกิดเป็นจุดเชื่อมโยง ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดความแข็งตัวเป็นเจล ซึ่งกลไกการเกิดเจลของคาราจีแนนแสดง [70] ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบจำลองกลไกการเกิดเจลของแคปพาคาริจีนแน [70]

ในการทดลองแคปพาคาริจีนแนไม่ได้ถูกทำให้ในรูปของสารละลายดังนั้นกลไกการเกิดเจลที่กล่าวข้างต้นอาจไม่เกิดขึ้นกับแคปพาคาริจีนแนได้อย่างสมบูรณ์ แต่การที่เติมกลีเซอรอลลงไปจะทำให้แคปพาคาริจีนแนดูดซับกลีเซอรอลแล้วเกิดการบวมตัวขึ้นและเมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการผสม เช่น มีอุณหภูมิเกิดขึ้นประมาณ 60°C ในขณะที่ผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ซึ่งแคปพาคาริจีนแนที่มีกลีเซอรอลสามารถเกิดการหลอมละลายได้บางส่วน ทำให้มีโอกาสเกิดกลไกดังที่กล่าวข้างต้น และเมื่อทำให้เย็นลงจึงเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นไฮโดรเจล ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแคปพาคาริจีนแนที่มีการผสมกลีเซอรอลลงไปสามารถเกิดไฮโดรเจลได้ แล้วหลังจากนั้นมีการจัดเรียงตัวของฟลิกที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าเอนทัลปีที่สูงขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเติมกลีเซอรอลในส่วน of แคปพาคาริจีนแนจึงทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น

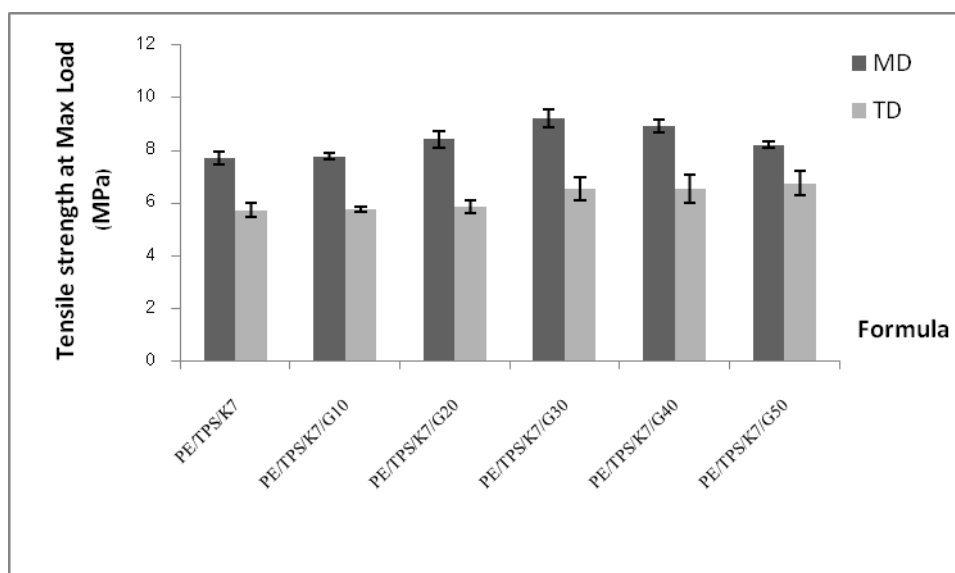
4.2.3. สมบัติทางกล

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ของฟิล์มสูตรที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลลงในแคปลาการาจีแนน (PE/TPS/K7) มีค่าสูงกว่าสูตรที่เติมกลีเซอรอลในการาจีแนนเล็กน้อย เนื่องจากในสูตรที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในแคปลาการาจีแนนนั้นเมื่อผ่านกระบวนการผสมและการขึ้นรูปจะทำให้แคปลาการาจีแนนเกิดเจล และหลังจากการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม การาจีแนนมีสมบัติเป็น thermal reversible อาจเปลี่ยน โครงรูปเป็นสายเกลียวได้อีกครั้ง [71] ซึ่งคาดว่าเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของโครงรูปที่ไม่เหมือนเดิม ทำให้ความเปราะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จึงรับแรงกระทำได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลในการาจีแนนมากขึ้นจึงส่งผลให้รับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเติมกลีเซอรอลลงในการาจีแนนในปริมาณที่มากเกินไป(40 และ 50%) อาจทำให้แรงยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ลดลงเพราะกลีเซอรอลสามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของการาจีแนนมากโดยจะลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน จึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง ความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้ทนแรงกระทำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค DSC พบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงยึด ณ จุดรับแรงสูงสุดมีค่ามากที่สุด และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของสูตรPE/PS/K7/G40 และ PE/TPS/K50 ลดลงเล็กน้อย ดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงยึด ณ จุดรับแรงสูงสุด จึงมีค่าลดลงเล็กน้อยด้วย

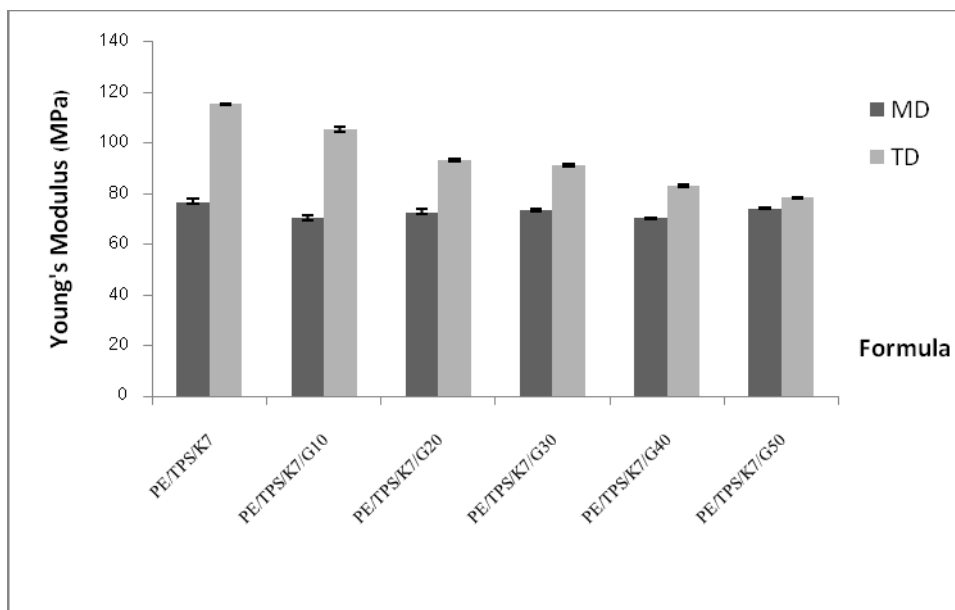
จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่ายังมอดุลัสมีค่าลดลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากกลีเซอรอลจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของการาจีแนนโดยจะไปลดแรงดึงดูดระหว่างพันธะ เช่น พันธะไฮโดรเจน ทำให้การาจีแนนมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ฟิล์มมีความนิ่มมากขึ้นดังนั้นค่ามอดุลัสจึงลดลง และจากรูปที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด มีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลในการาจีแนนมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของการาจีแนนสามารถเคลื่อนที่ได้ไ้อิสระมากขึ้นเพราะกลีเซอรอลจะไปแทรกกระหว่างสายโซ่ของการาจีแนนโดยจะลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน ดังนั้นสายโซ่มีความยืดหยุ่น(Flexible) มากขึ้นทำให้เมื่อรับแรงกระทำ(แรงดึง) แล้วสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากขึ้น ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดจึงมีค่ามากขึ้น แต่ สูตรPE/TPS/K7/G40 และ PE/TPS/K7/G50 ที่มีปริมาณกลีเซอรอลมากเกินไปทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ลดลงเล็กน้อย

และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรพบว่าค่าความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนวตามเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่องจักร ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มทำให้เกิดการเรียงโมเลกุลในสองทิศทาง คือแรงดึงจากลูกกลิ้งและแรงลมจากการเป่าฟิล์ม และในการทดลองใช้อัตราเร็วในการดึงลูกกลิ้งมากดังนั้นสายโซ่พอลิเมอร์จึงมีการจัดเรียงตัวในแนวตามเครื่องมากกว่าจึงทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ส่งผลให้รับแรงกระทำได้มาก ค่าความแข็งแรงดึงในแนวตามเครื่องจักรจึงมีค่ามาก และยังพบว่าค่ายังมอดุลัส

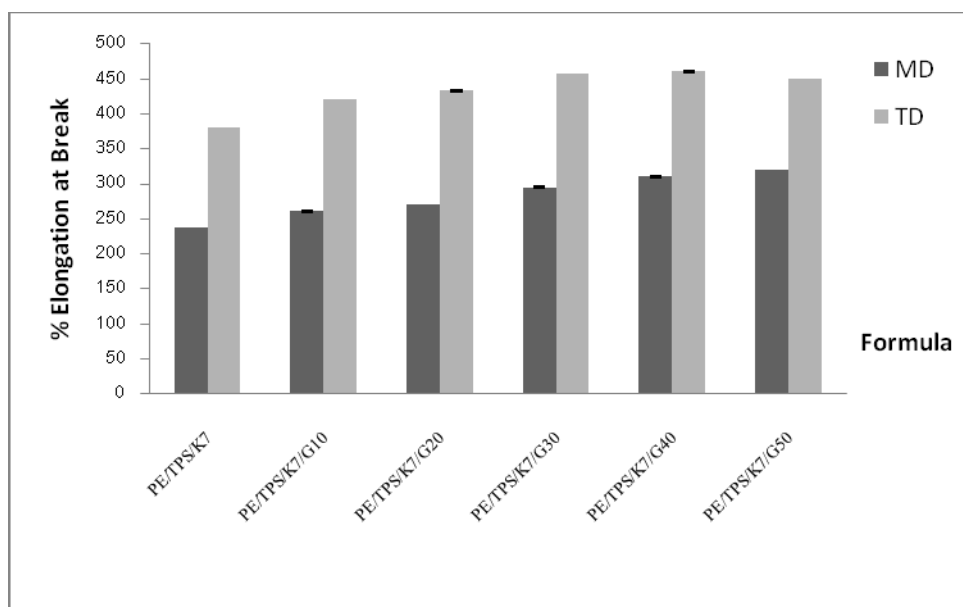
และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ในแนวขวางเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวตามเครื่อง คาดว่าเกิดจากการใช้ลมในการเป่าขยายฟิล์มน้อย ทำให้ฟิล์มยืดขยายตัวได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล จึงสามารถดึงยืดออกได้มากกว่าแนวตามเครื่องจักร



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์พลาสติคสตาร์ช/แคลปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณต่างๆผสมอยู่ในแคลปาคาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์ม/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณ ต่างๆผสมอยู่ในแคลปาคาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณ ต่างๆผสม อยู่ในแคลปาคาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร(TD)

จากผลการทดลองในตอนที 2 พบว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคลปาคาราจีแนนที่อยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์/แคลปาคาราจีแนน ช่วยปรับปรุงทำให้กระบวนการผสมในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ได้ดีขึ้น คือ สามารถดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ต่อเนื่องมากขึ้นโดยไม่เกิดการขาด และปริมาณกลีเซอรอลที่สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ด คือ 30 % , 40 % และ 50 % โดยน้ำหนักของแคลปาคาราจีแนน จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคลปาคาราจีแนนไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แต่จะมีผลต่อค่าเอนทัลปี และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และพบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคลปาคาราจีแนน ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แต่จะมีผลต่อค่าเอนทัลปี และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และเมื่อเติม 30% , 40% และ 50 % โดยน้ำหนักของแคลปาคาราจีแนน จะให้ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ากลีเซอรอลและปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลของสมบัติเชิงกลที่ได้สอดคล้องกับสมบัติทางความร้อนที่พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมกลีเซอรอลในแคปลาการาจีแน่มากขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ ในขณะที่ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ กลีเซอรอลช่วยให้แคปลาการาจีแนมีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้น ทำให้มีความยืดหยุ่นดี และสามารถดึงยืดและเป่าได้ดีขึ้น

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคปซูลการจีแนจะทำให้แคปซูลการจีแนมีสมบัติความเป็นพลาสติกเพิ่มขึ้น มีความยืดหยุ่นที่ดี โดยสามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากหัวดายในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ถูกดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ ส่งผลให้การผลิตเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง และปริมาณกลีเซอรอลที่มากขึ้นไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มลดลง ดังนั้นจากการทดลองได้เลือกใช้สูตร PE/TPS/K7/G30 เพื่อนำไปปรับปรุงสมบัติทางการย่อยสลายในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากสูตร PE/TPS/K7/G30 เป็นปริมาณที่เริ่มสามารถทำการดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงที่สุด จึงมีความเหมาะสมที่จะไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

4.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก

ในการทดลองได้นำพอลิเมอร์ผสม สูตร PE/TPS/K7/G30 จากตอนที่ 2 มาทำการเตรียมฟิล์ม โดยเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) ลงไปในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเน้นศึกษาปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีไลฟ์) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน เพื่อให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น โดยนำชิ้นงานไปทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนโดยการเอจิงที่อุณหภูมิ 70 °C เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Thermal oxidation)และทดสอบการย่อยสลายทางแสงโดยนำชิ้นงานไปฉายแสงยูวี จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกล และปริมาณออกซิเดชันด้วยการหาดัชนีคาร์บอนิล เพื่อเป็นการยืนยันเบื้องต้นว่าเกิดการย่อยสลายจริง และสำหรับสูตรที่มีการเติมฟีไลฟ์ในปริมาณ 5 phr มีปัญหาในขั้นตอนการผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ออกจากหัวดายขาดง่ายและเมื่อนำไปเป่าเป็นฟิล์มพบว่าเกิดการขาด คาดว่าเกิดจากปริมาณฟีไลฟ์ที่มีมากเกินไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดขึ้นทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ไม่สามารถดึงยืดและเป่าเป็นฟิล์มได้ ดังนั้นการทดลองตอนที่กล่าวต่อไปจึงเป็นการศึกษาปริมาณฟีไลฟ์ที่ 1 phr และ 3 phr เท่านั้น โดยอักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง

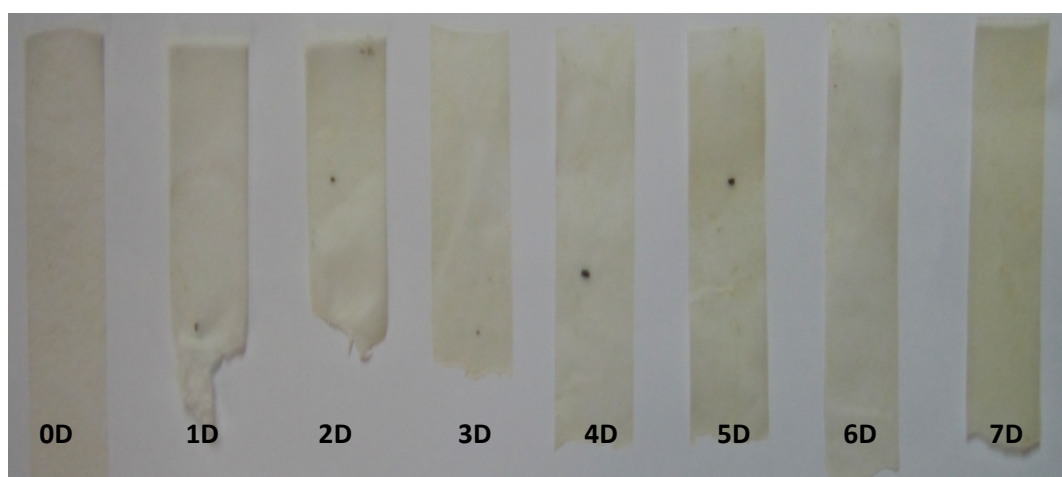
ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	PE/TPS/K7/G30	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน และกลีเซอรอลปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนน
2	PE/TPS/K7/G30/P1	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน และกลีเซอรอลปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนน และสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) 1 phr
3	PE/TPS/K7/G30/P3	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน และกลีเซอรอลปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนน และสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) 3 phr

หมายเหตุ PE คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น 70:30

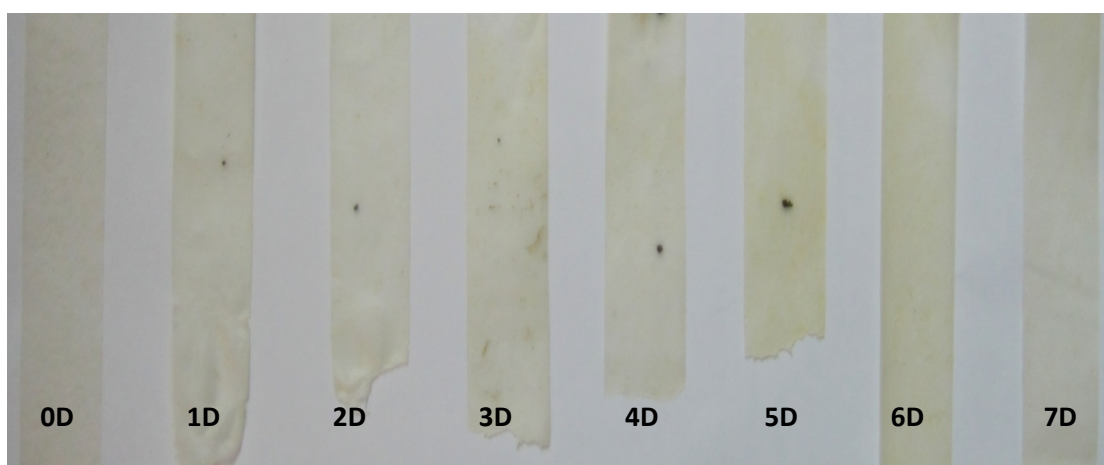
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

4.3.1.1 หลังเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C

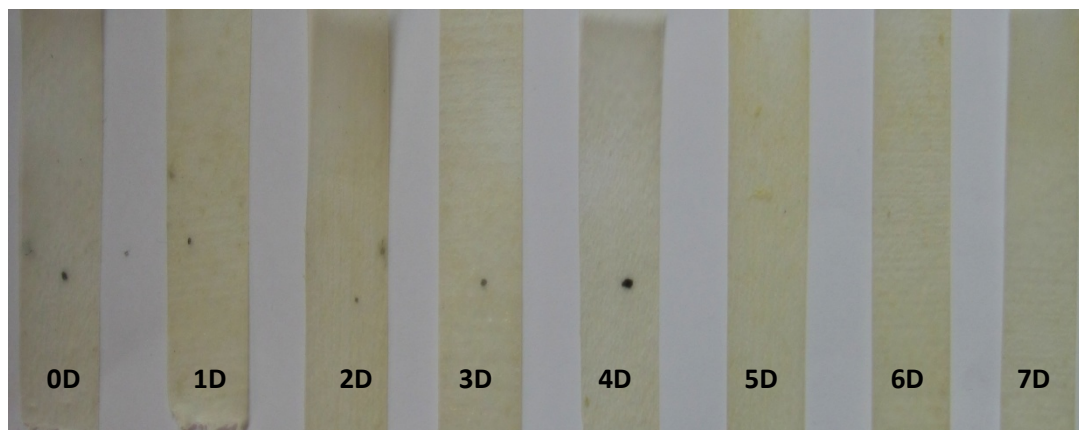
จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วันพบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/K7/G30/P3 ที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณ 1 และ 3 phr จะทำให้ฟิล์มมีสีเหลืองมากกว่าสูตร PE/TPS/K7/G30 ซึ่งการที่ฟิล์มที่เปลี่ยนไปแสดงว่า ฟิล์มสูตรที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพเริ่มย่อยสลายได้เมื่อถูกความร้อน โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.19 ก-ค



(ก)



(ข)

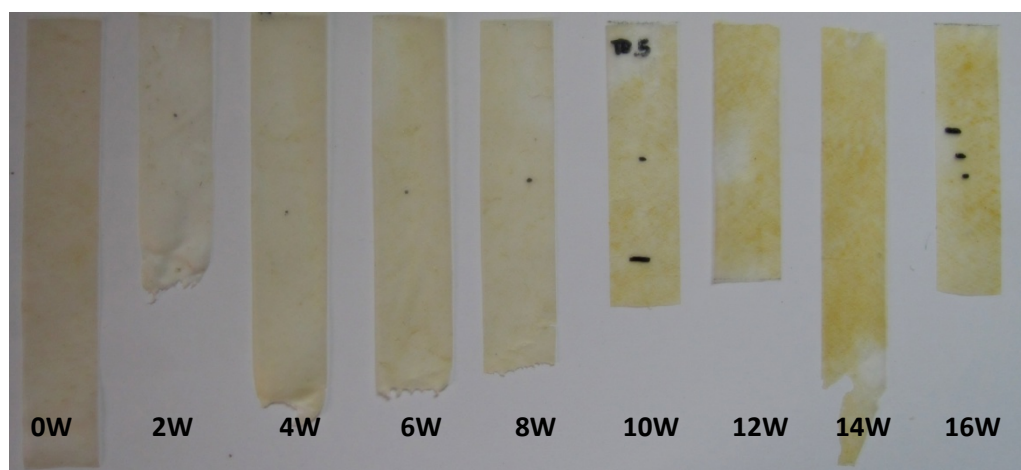


(ค)

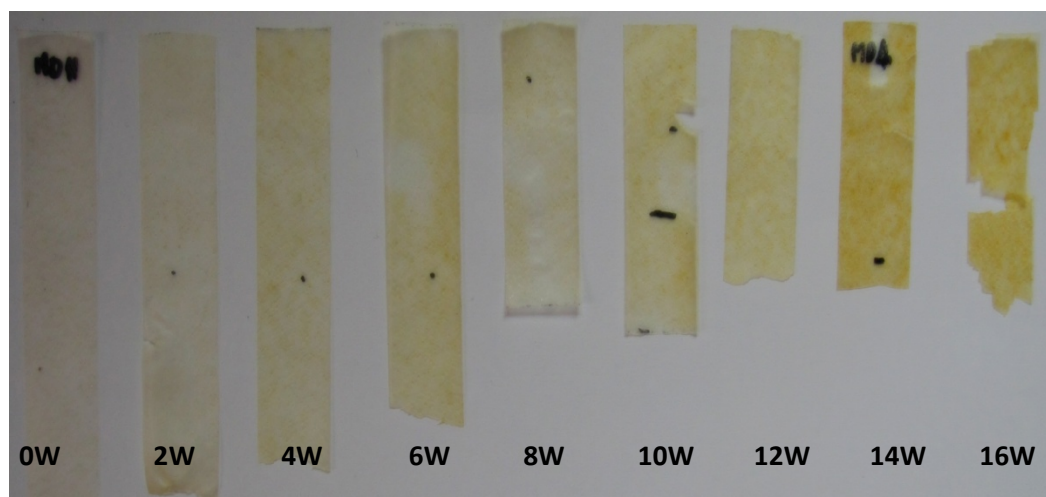
รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการทำเอจิงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3

4.3.1.2 หลังฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน

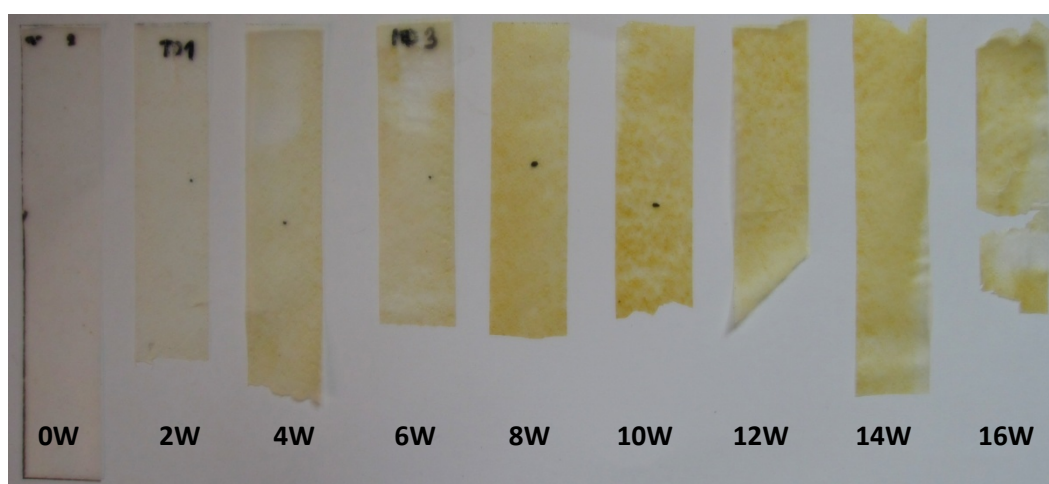
หลังจากการทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า ฟิล์มสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/K7/G30/P3 ที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1 และ 3 phr มีความกรอบ เปราะ และสีเหลืองเข้มกว่า สูตร PE/TPS/K7/G30 และยังพบว่าหลังจากฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 2 เดือน ฟิล์มในทุกสูตรมีความเปราะแตกหักได้ง่ายจนไม่สามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากฉายแสงยูวีแสดงดังรูปที่ 4.20 ก-ค



(ก)



(จ)



(ค)

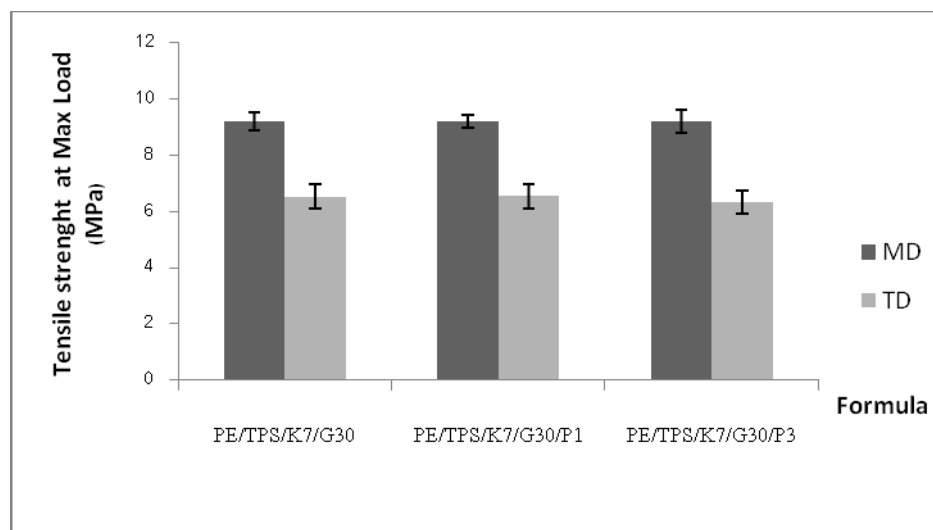
รูปที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่
 ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการฉายรังสีเป็นระยะเวลา 4 เดือน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30
 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3

4.3.2 สมบัติเชิงกล

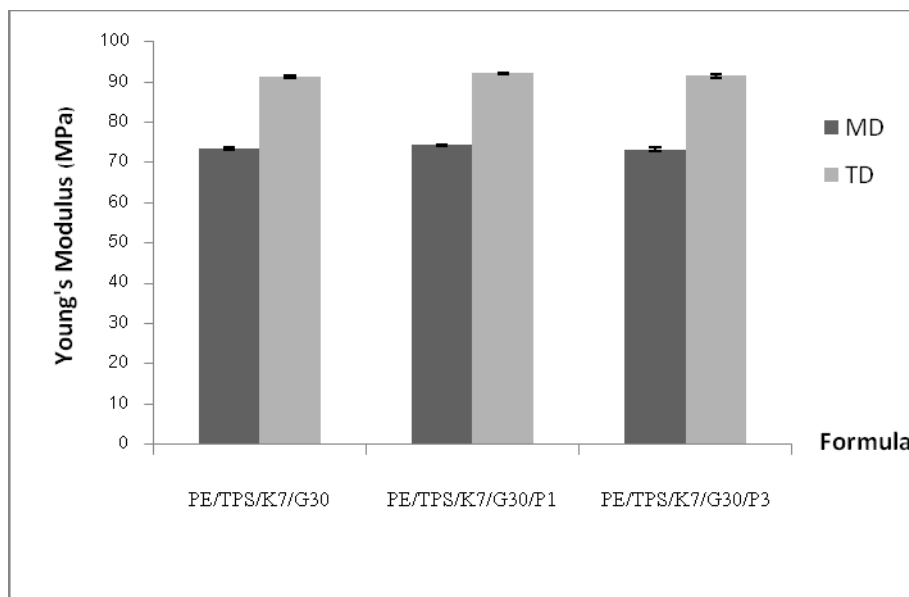
4.3.2.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนที่จะนำไปทดสอบการย่อยสลายทาง

ความร้อนและทางแสง

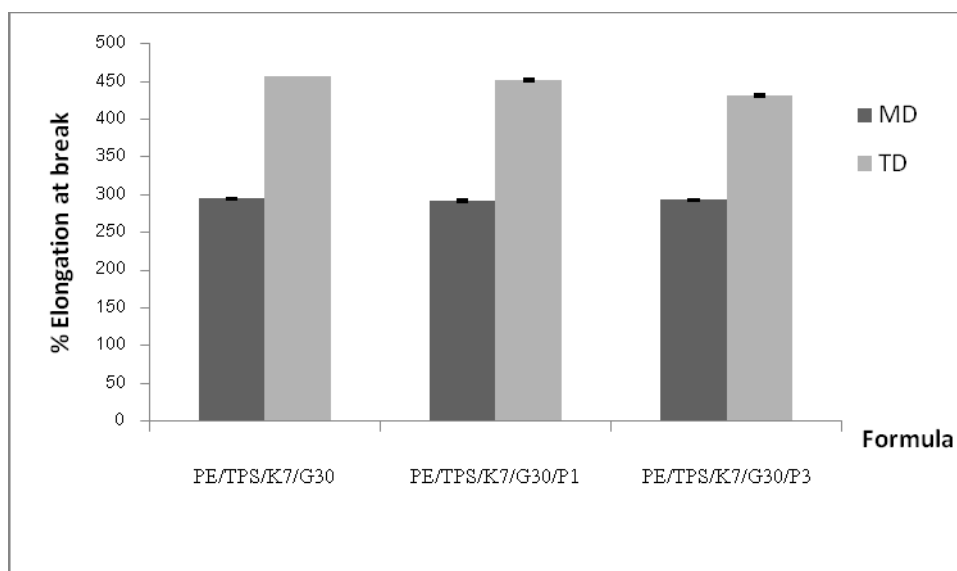
จากรูปที่ 4.21-4.23 พบว่าเมื่อเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณมากขึ้น ทำให้ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากปริมาณฟิล์ฟที่ใส่ลงไปมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณสารทั้งหมด และสารฟิล์ฟกระจายตัวอยู่ในฟิล์มได้ดีจึงไม่เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมฟิล์ฟอยู่ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ยาก เพราะฟิล์ฟจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อรับความร้อน แสงยูวี และออกซิเจนเท่านั้น [26] ดังนั้นปริมาณฟิล์ฟจึงไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สภาวะก่อนทำการเอจจึงและก่อนฉายแสงยูวี



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟิล์ฟ) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจจึงและก่อนฉายแสงยูวี



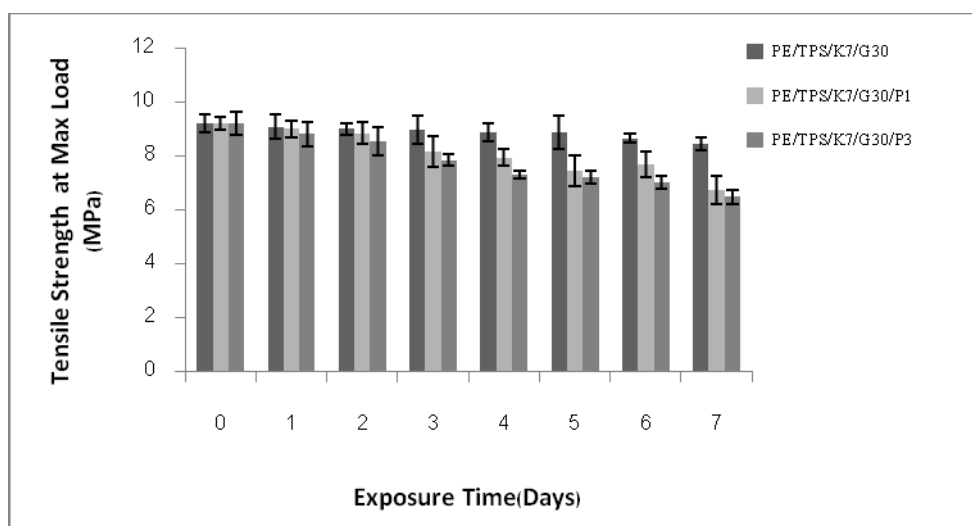
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปทาลาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก (ฟูลไฟ) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจจึงและก่อนฉายแสงยูวี



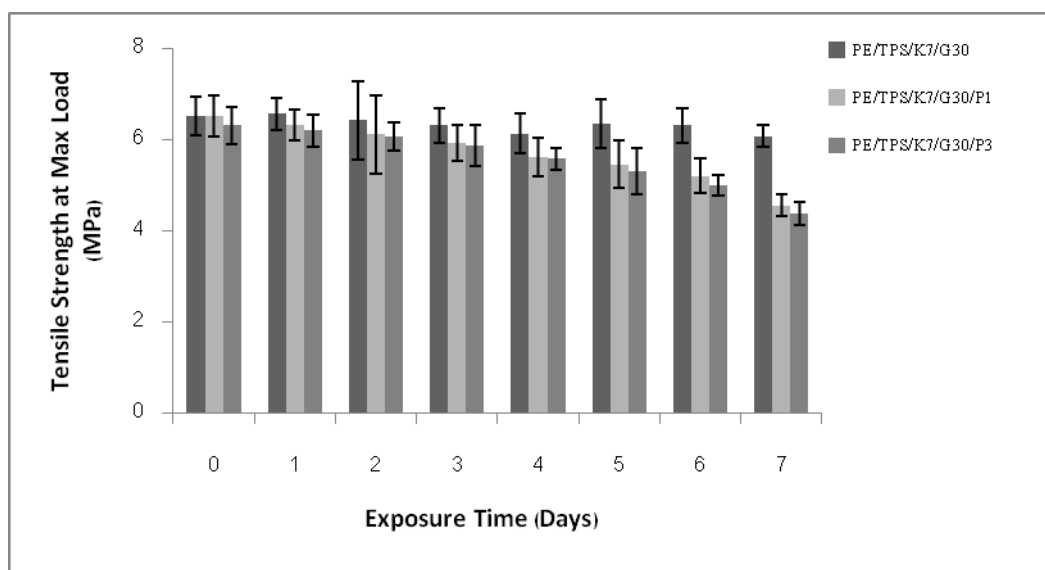
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปทาลาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก (ฟูลไฟ) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจจึงและก่อนฉายแสงยูวี

4.4.3.2 การย่อยสลายทางความร้อนโดยการเองจิง

จากรูปที่ 4.24- 4.26 (ก-ข) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาการเองจิงมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีการสะสมพลังงานความร้อนมากขึ้นและภายในสูตรผสมมีส่วนประกอบที่เป็นแป้งกับการาจิแนนซึ่งสามารถดูดความร้อนได้ จึงช่วยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์รับความร้อนได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นจึงทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียหาย ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยและพบว่าการเติมสารเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) ลงในพอลิเมอร์ผสมสูตร ช่วยส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์)ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (Oxidative Degradation) ทำให้เกิดตัดของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain scission) [50] โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง แตกต่างกันตรงที่สารมัธยันต์ (Intermediate) ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความร้อนจะเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเอทิลีน (β -scission) และเกิดปฏิกิริยาไคยากกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง (Photo-oxidation) ดังนั้นการเสียหายของพอลิเมอร์สูตรในช่วงการเองจิงที่ระยะเวลา 1-4 วันจึงไม่เห็นการเปลี่ยนของสมบัติเชิงกลมากนัก แต่ในการทดลองพบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเองจิงเป็นเวลา 7 วันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณฟีไลฟ์ที่เพิ่มขึ้นจะไปช่วยกระตุ้นให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเกิดเป็นอนุมูลอิสระมากขึ้น และจากนั้นจึงเกิดออกซิเดชันแล้วการตัดขาดของสายโซ่ได้ผลิตภัณฑ์ได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์เสียหาย สมบัติเชิงกลจึงลดลง โดยสามารถแสดงกลไกของปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 4.27 [61]

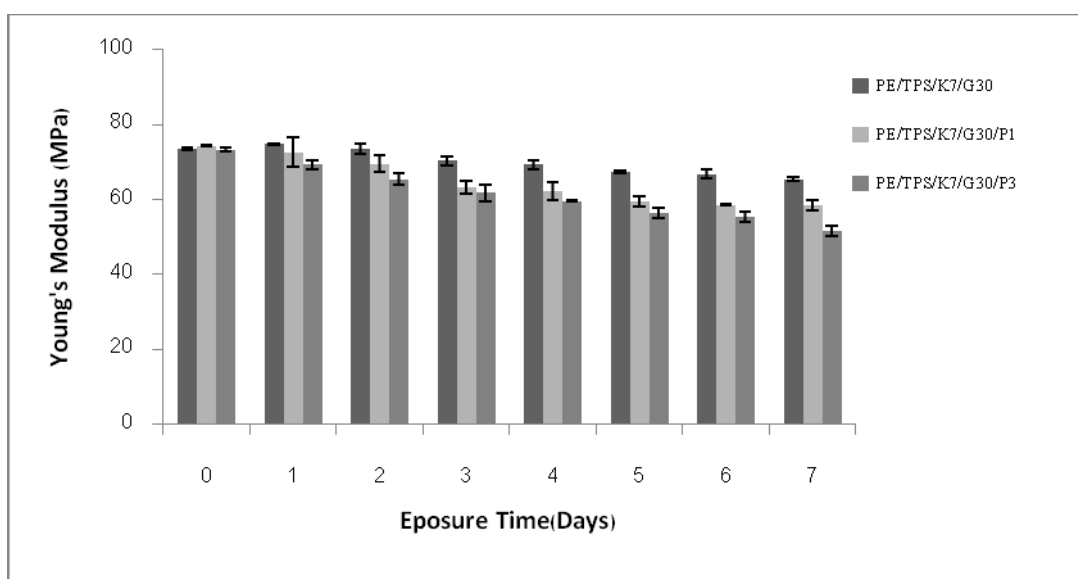


(ก)

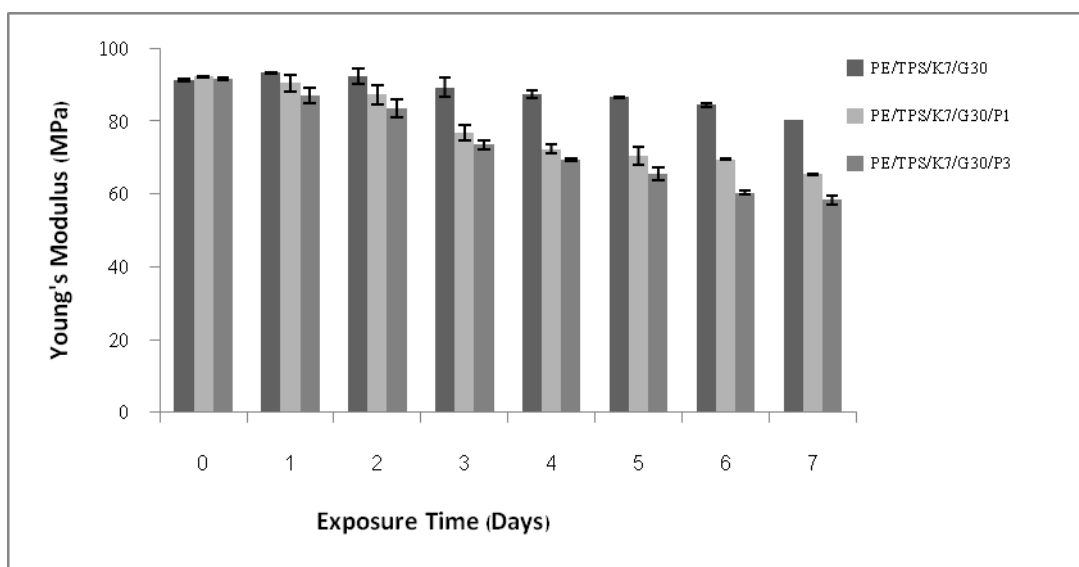


(ข)

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปการจีแนน ที่มีปริมาณสารการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไอลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากเอจิงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน

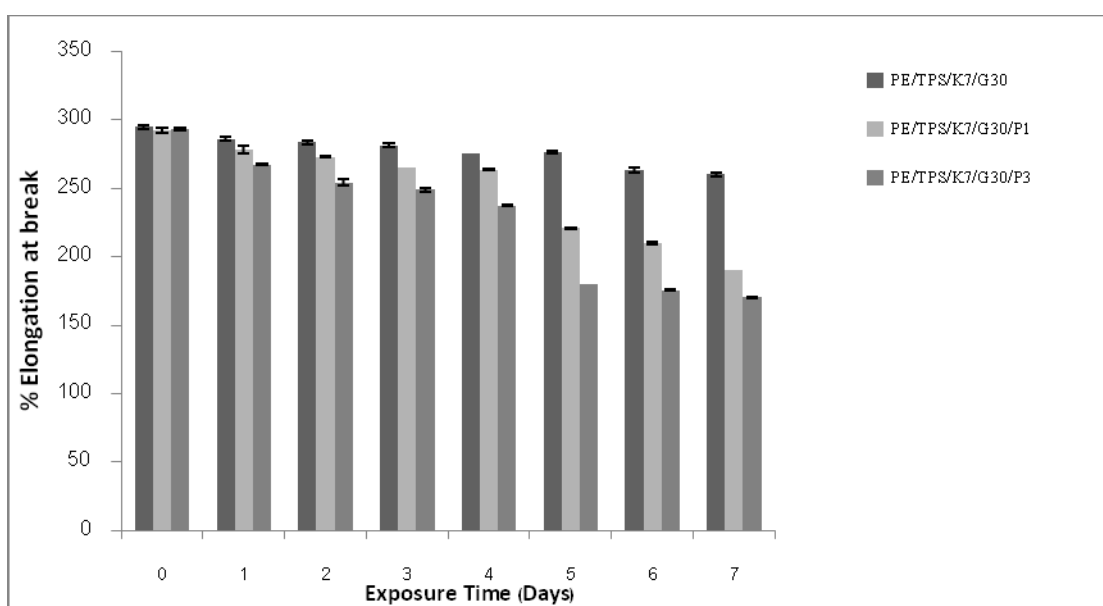


(ก)

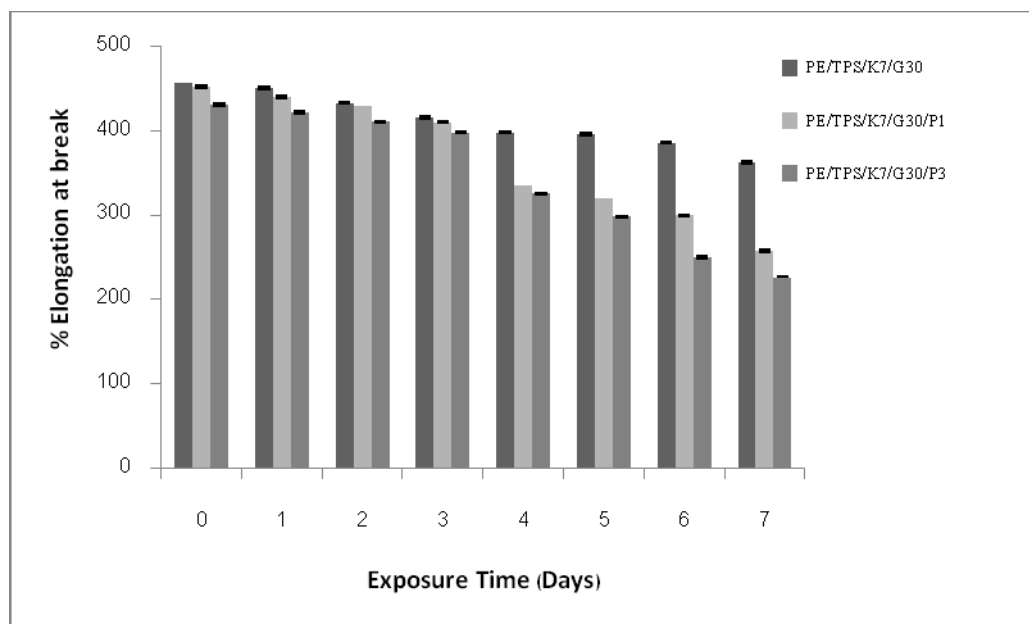


(ข)

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคปทาการา จีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (ฟูลไฟ) ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวตามเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจิงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน

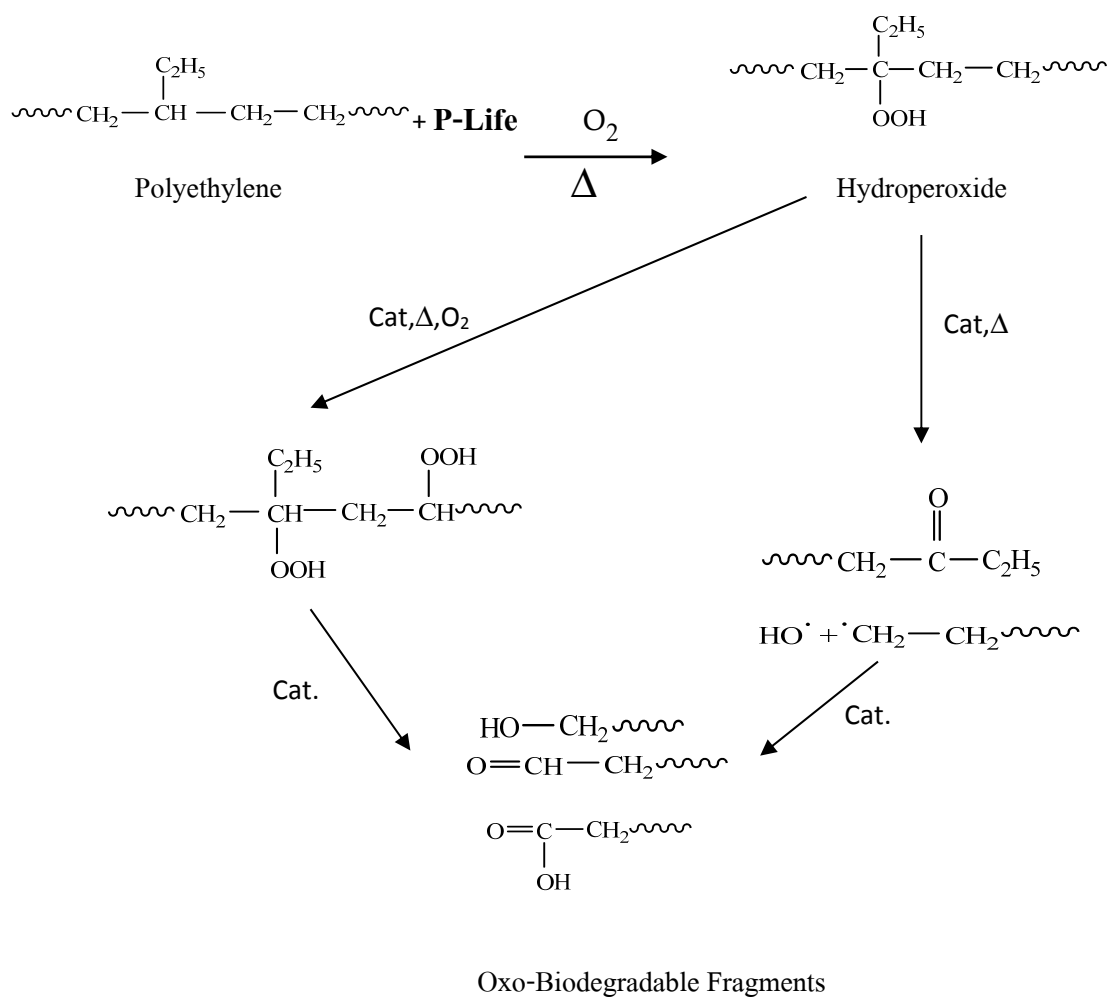


(ก)



(ข)

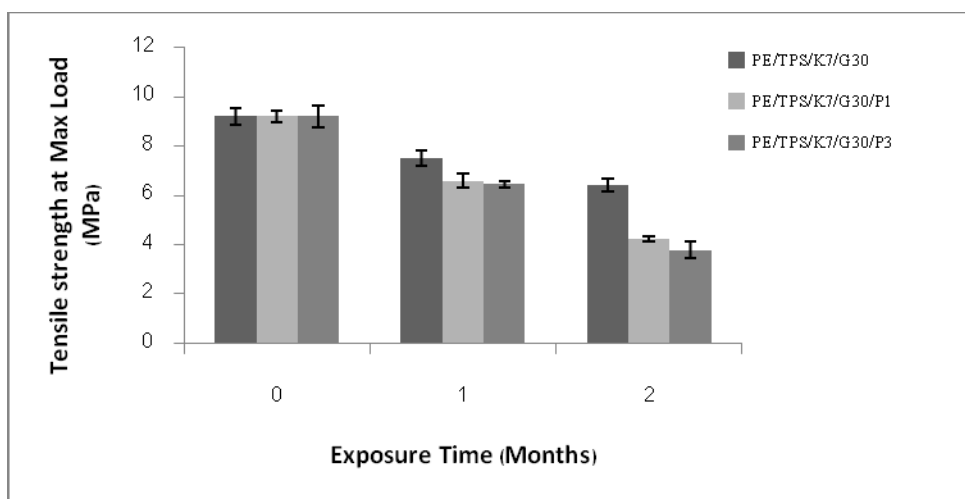
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/ แคปทาคาร์บอน ที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีโลฟี) ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข)แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจิง ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน



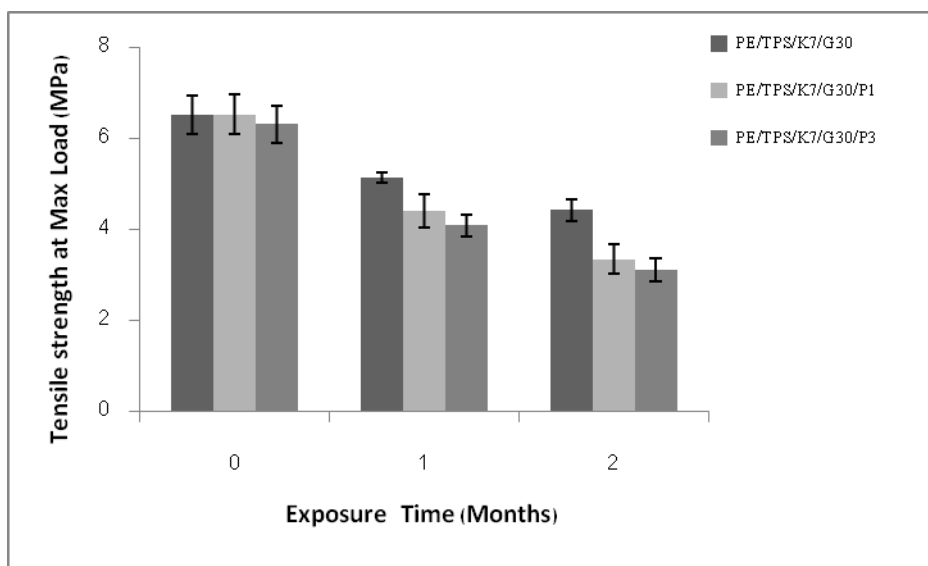
รูปที่ 4.27 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน [61]

4.4.3.3 การย่อยสลายทางแสงโดยการฉายแสงยูวี

จากรูปที่ 4.28-4.30 (ก-ข) พบว่า หลังจากฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 2 เดือน พิล์มทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดุลัส และ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ลดลงทั้งนี้เนื่องจากแสงยูวีจะเข้าไปกระตุ้นให้สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟิโอฟ) แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ และเข้าไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน จากนั้นพอลิเอทิลีนที่เป็นอนุมูลอิสระก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ แล้วสารประกอบเปอร์ออกไซด์ก็จะดึงโครเจนจากโมเลกุลข้างเคียง ทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ จากนั้นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ก็จะสลายตัวทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลขึ้นภายในโครงสร้างของพอลิเอทิลีน และจากนั้นจะเกิดการสลายตัวผ่านกระบวนการออกซิเดชันที่ 1 และ 2 เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเอทิลีนทำให้เกิดสารประกอบประเภทคีโตน คาร์บอกซิลิก และสายโซ่พอลิเอทิลีนที่สั้นลง ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงมีแนวโน้มที่ลดลง และพบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดุลัส และ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ที่ลดลงมากที่สุด โดยปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกที่มากขึ้นจะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้น ดังนั้นสายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดขาด สมบัติเชิงกลจึงลดลง ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.31

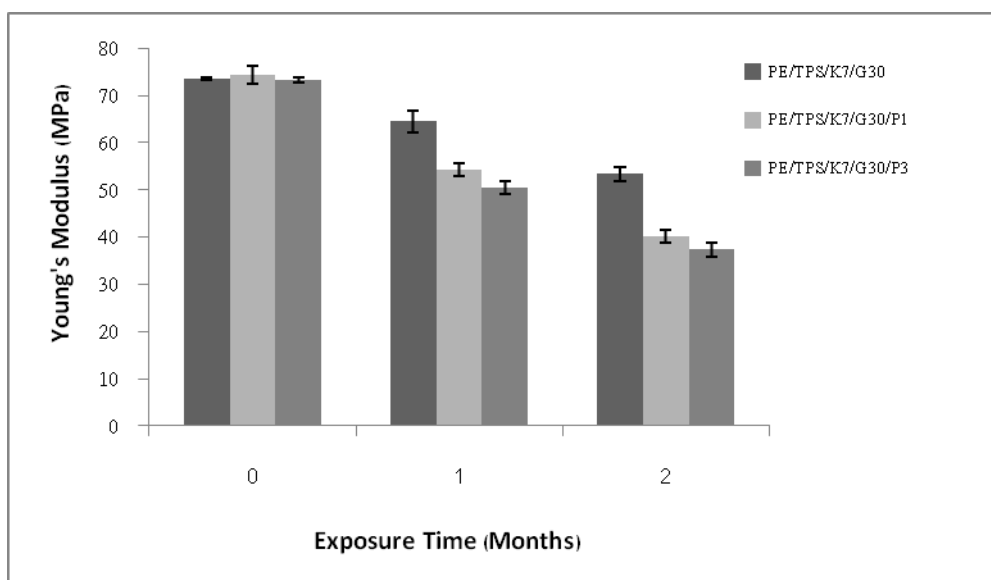


(ก)

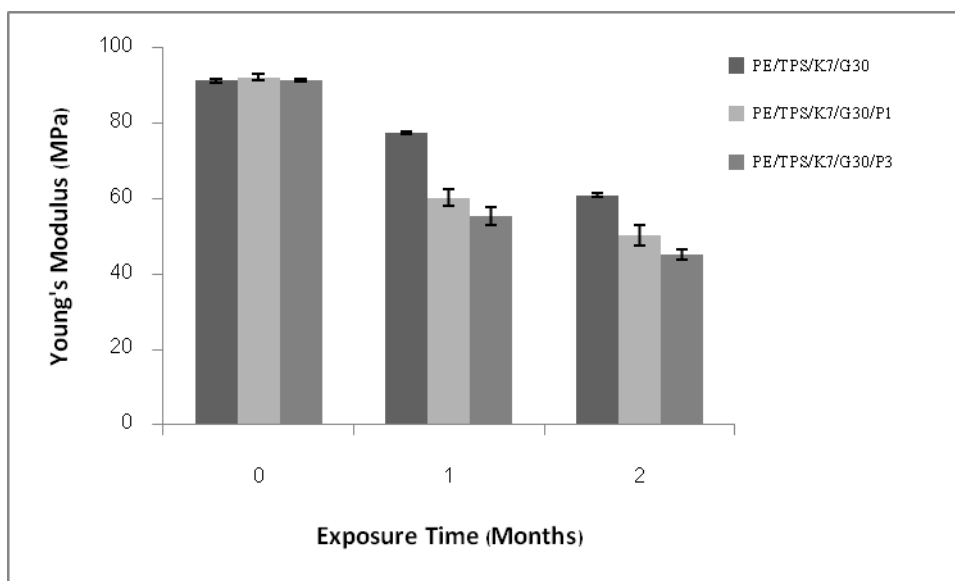


(ข)

รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/แคปทาลาจีเนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก(ฟีโลฟ)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

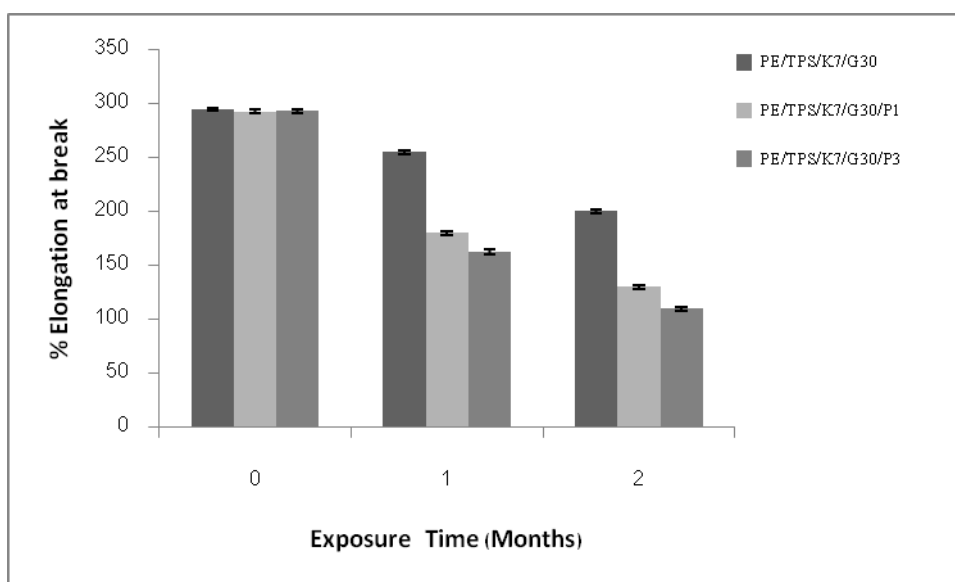


(ก)

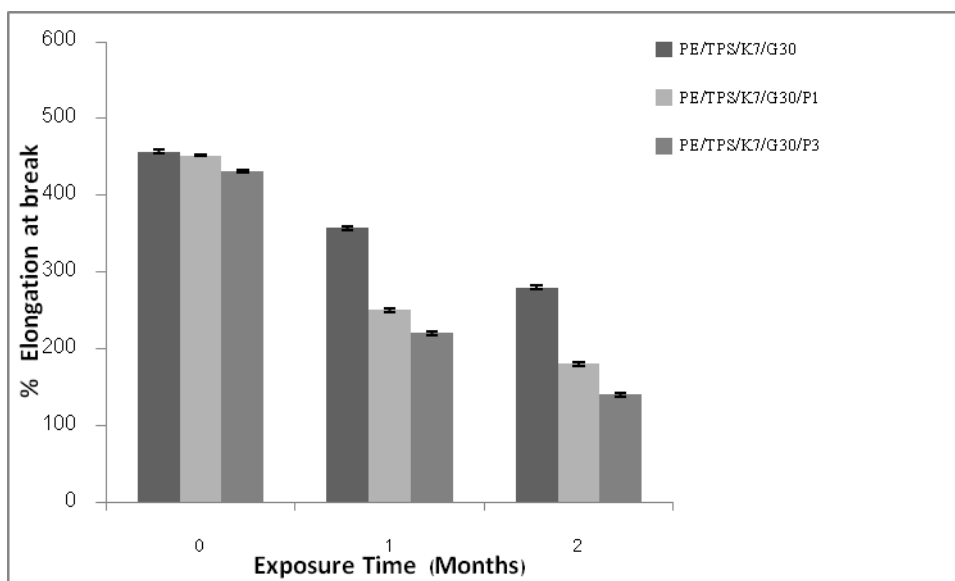


(ข)

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/ แคปปาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(ฟิไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

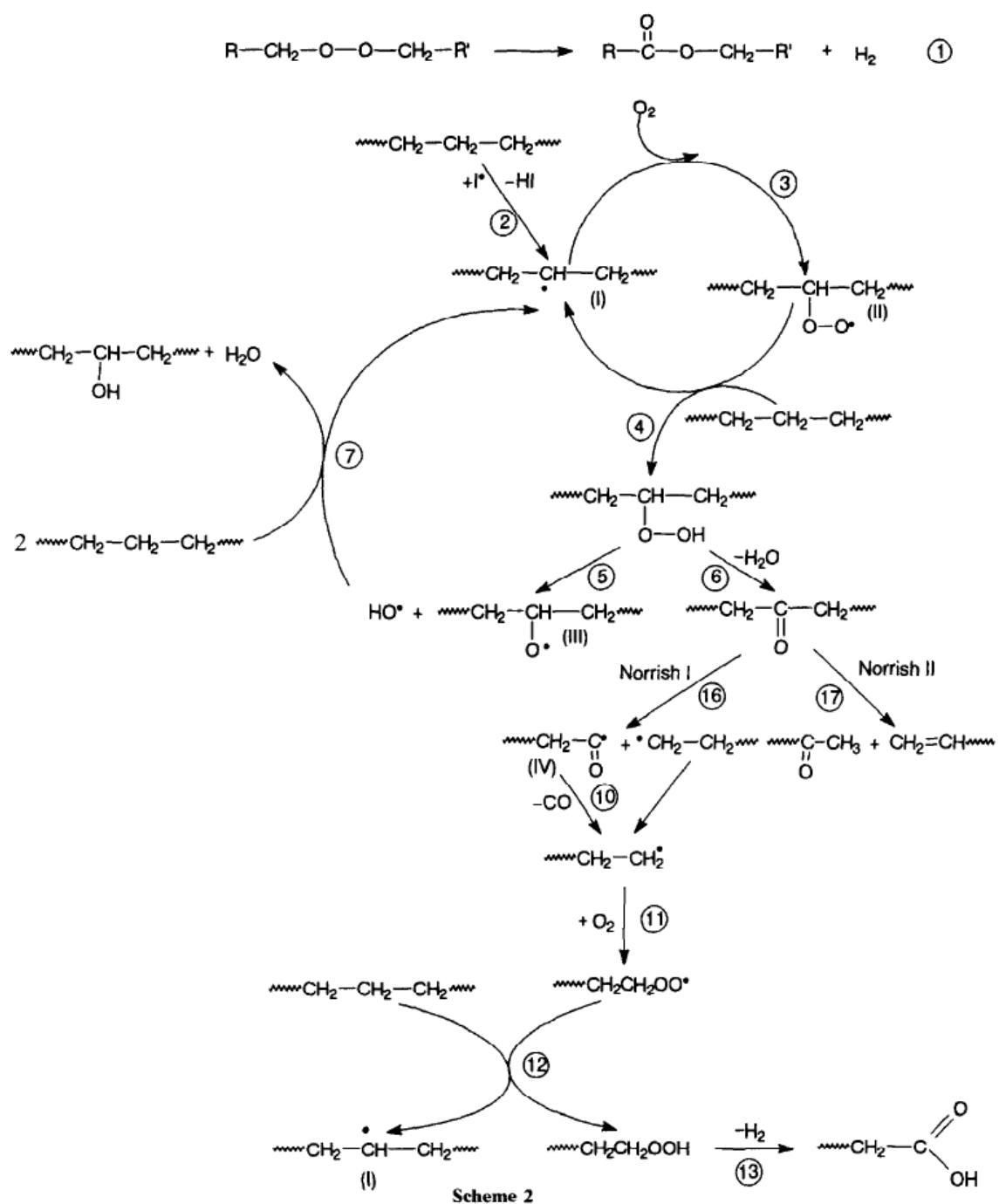


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไอล์ฟ)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน



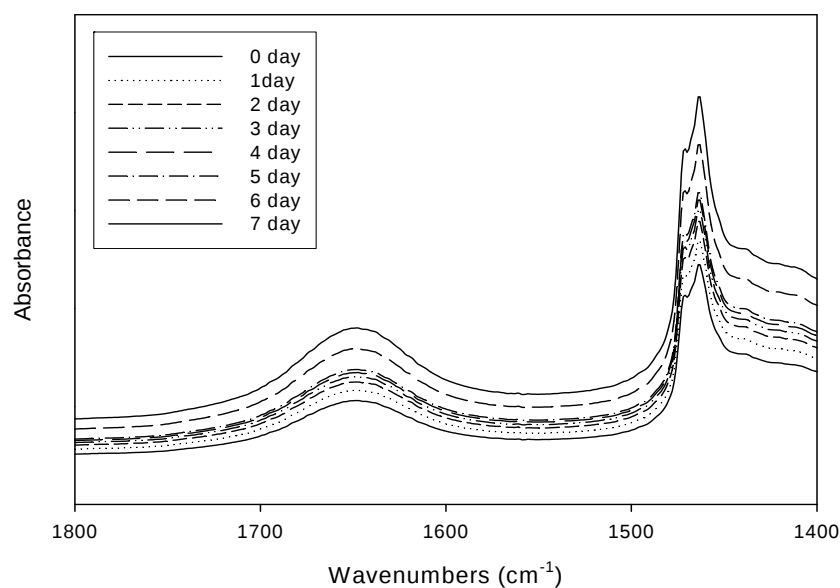
รูปที่ 4.31 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนโดยแสง [72]

4.3.3 การหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl Index)

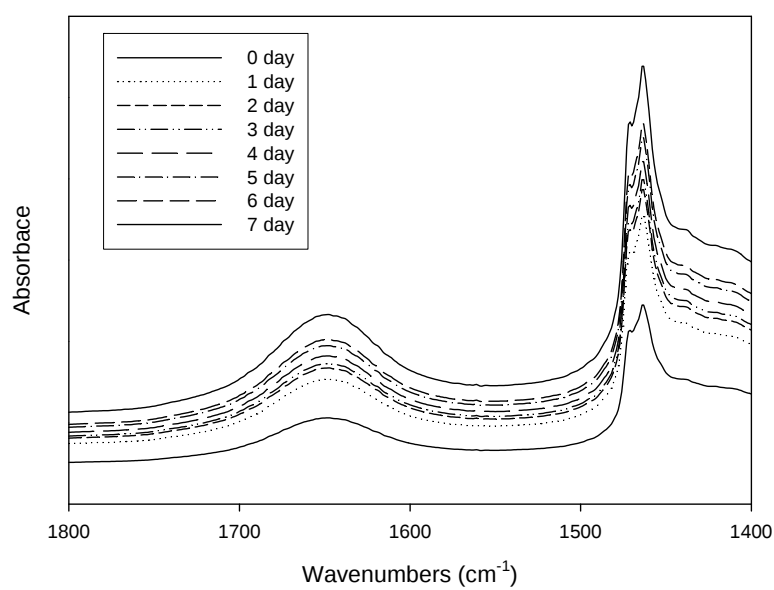
เพื่อเป็นการยืนยันการสลายตัวเนื่องมาจากความร้อนและทางแสงของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก จึงทำการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค FT-IR โดยสนใจวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเลขคลื่น(wave number) ระหว่าง 1400 cm^{-1} ถึง 1800 cm^{-1} ซึ่งสูตรการหาดัชนีคาร์บอนิล แสดงดังนี้

$$\text{Carbonyl Index} = \frac{\text{Absorption band at } 1640\text{-}1840\text{ cm}^{-1}}{\text{Absorption band at } 1463\text{ cm}^{-1}}$$

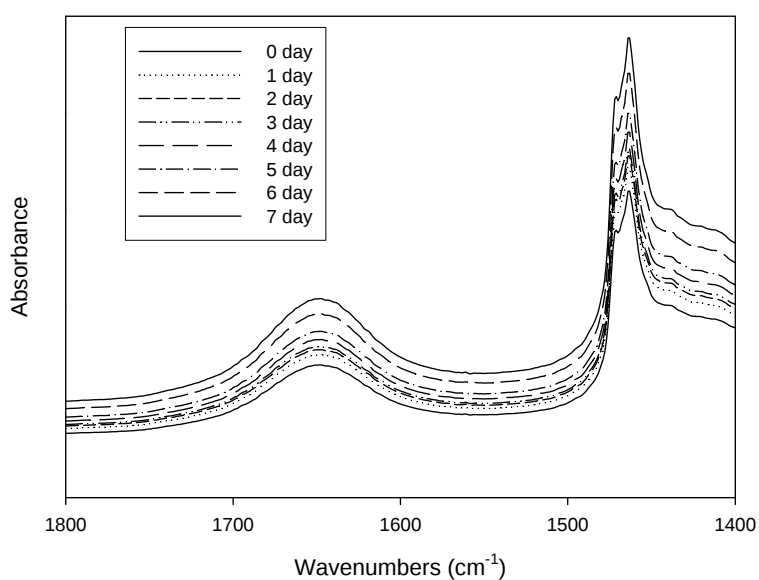
โดยที่เลขคลื่น $1640\text{-}1840\text{ cm}^{-1}$ จะเกิดการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ซึ่งเป็น by-product เช่น คีโตน คาร์บอซิลิก ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน และที่เลขคลื่น 1463 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ CH_2 ซึ่งผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอบจึ่งที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4.32



(ก)



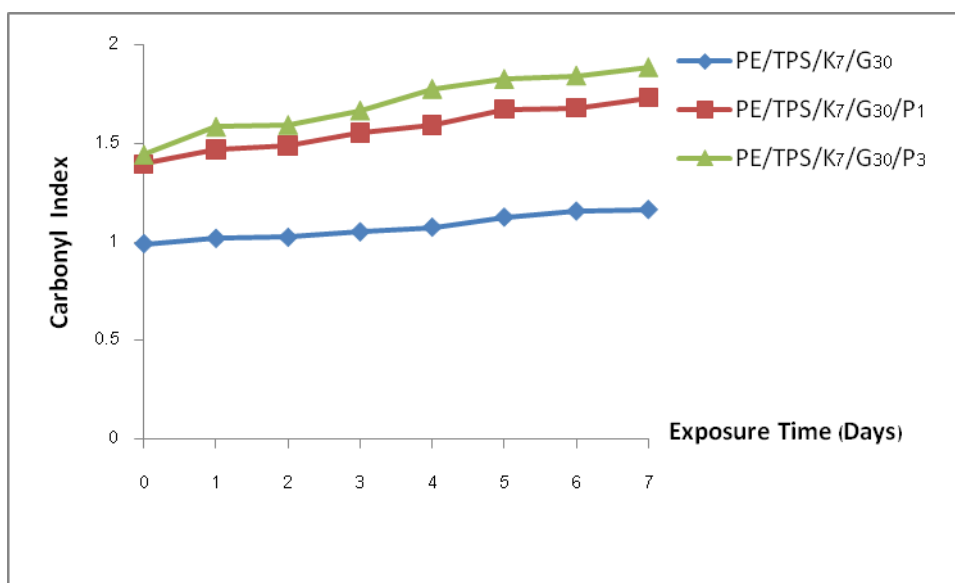
(ข)



(ค)

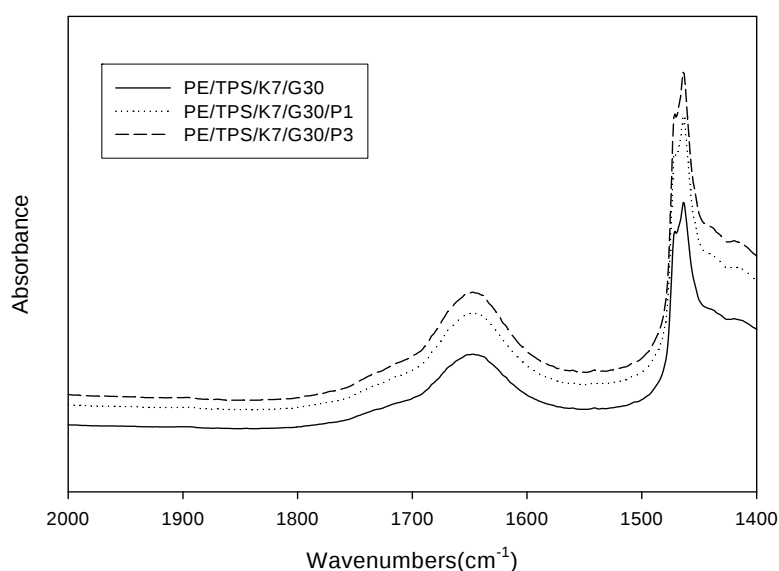
รูปที่ 4.32 แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1800-1400\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่ทำการเอจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะ 7 วัน : (ก) PE/TPS/K7/G30
(ก) PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) PE/TPS/K7/G30/P3

จากรูปที่ 4.32 พบว่า หลังจากฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วจะเกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1600\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$ stretching) และค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น $1300\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงการดูดกลืนของ CH_2 bending มากขึ้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดมาคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (COI) จะได้ค่าดังรูปที่ 4.33 และจากรูปที่ 4.33 เมื่อเปรียบเทียบสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/G30/P3 ที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1 และ 3 phr ตามลำดับ กับสูตร PE/TPS/K7/G30 ที่ไม่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก พบว่าดัชนีคาร์บอนิลของ สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/G30/P3 มีค่ามากกว่าสูตร PE/TPS/K7/G30 โดยค่าดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากความร้อนเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดโครงสร้างที่เป็นหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น [72] ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าการเติมสารเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีโลฟ์) ช่วยทำให้พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยได้จริง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกที่เติมลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่า สูตร PE/TPS/K7/G30/P3 ซึ่งเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 3 phr ช่วยทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เกิดการย่อยสลายได้มากกว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 ซึ่งเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1 phr ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ลดลง

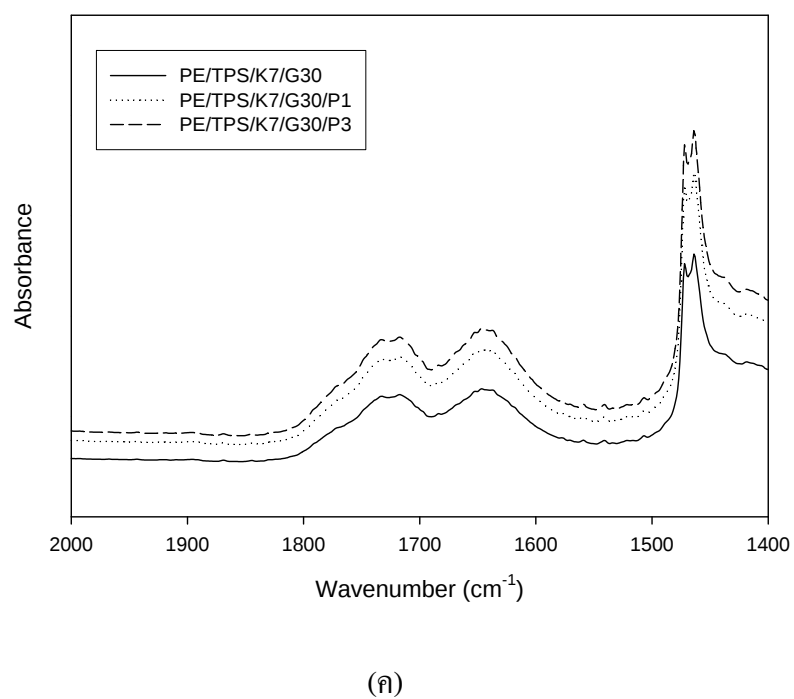
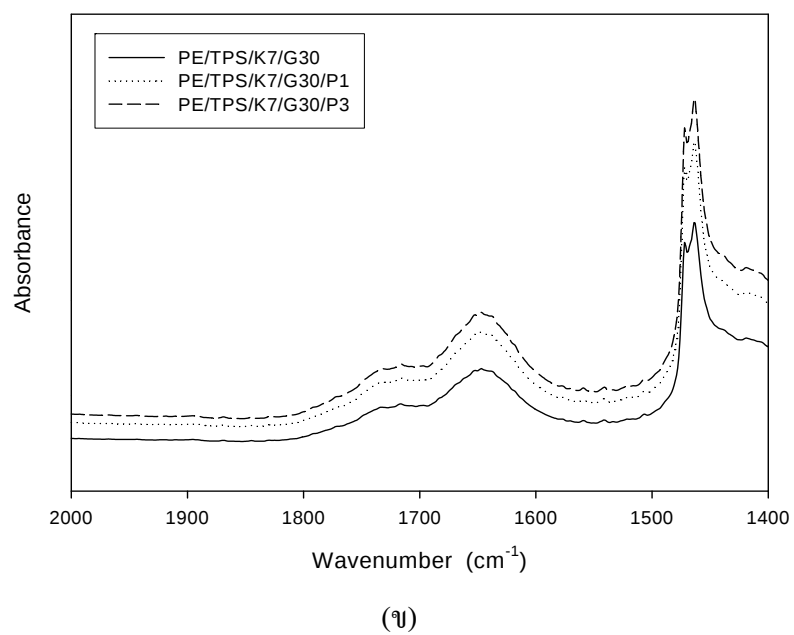


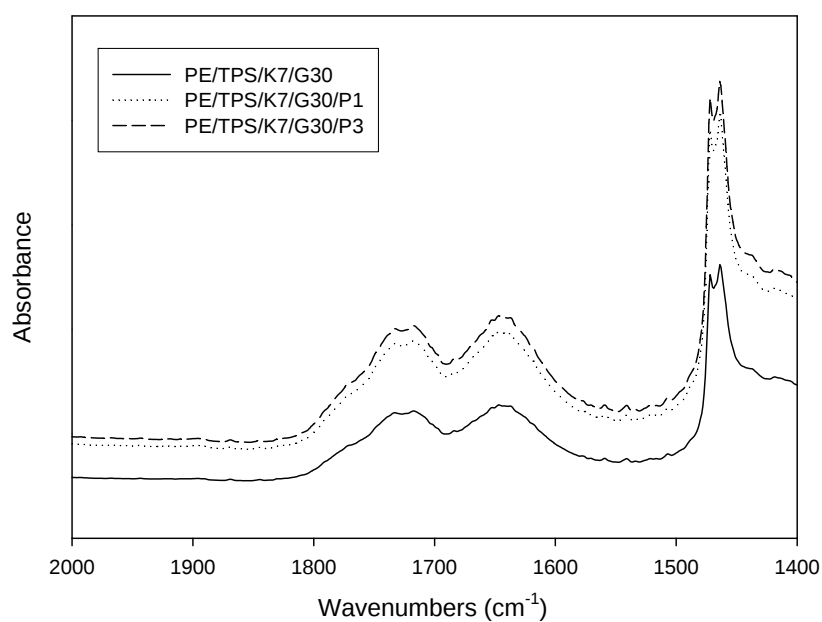
รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างหลังจากทำการเอจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7 วัน

จากรูปที่ 4.34 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1-4 เดือน เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1600-1800\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$ stretching) ซึ่งเกิดเป็นคาร์บอนิลของหมู่คีโตนมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากพีคที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} และค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น $1300-1450\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงการดูดกลืนของ CH_2 bending มากขึ้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิล แสดงดังรูปที่ 4.35 ซึ่งพบว่าค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มสูตรที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/K7/G30/P3) มีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (PE/TPS/K7/G30) และค่าดัชนีคาร์บอนิลของสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกจะไปเร่งให้เกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดโครงสร้างที่เป็นหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และเกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเอทิลีน [72] ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าการเติมสารเสื่อมสภาพ(ฟีไลฟ์) ช่วยทำให้พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์สลายทางแสงยูวีเพราะมีดัชนีคาร์บอนิลเกิดขึ้นมาก และมีสมบัติเชิงกลที่ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟีไลฟ์ 3 phr ช่วยทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางความร้อนที่ดีที่สุดเพราะมีดัชนีคาร์บอนิลเกิดขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ลดลง

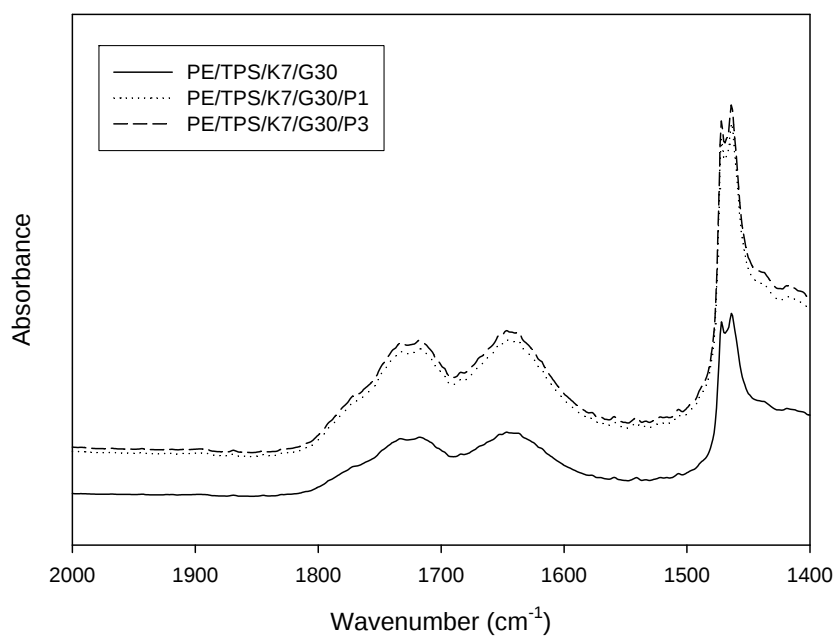


(ก)





(ง)

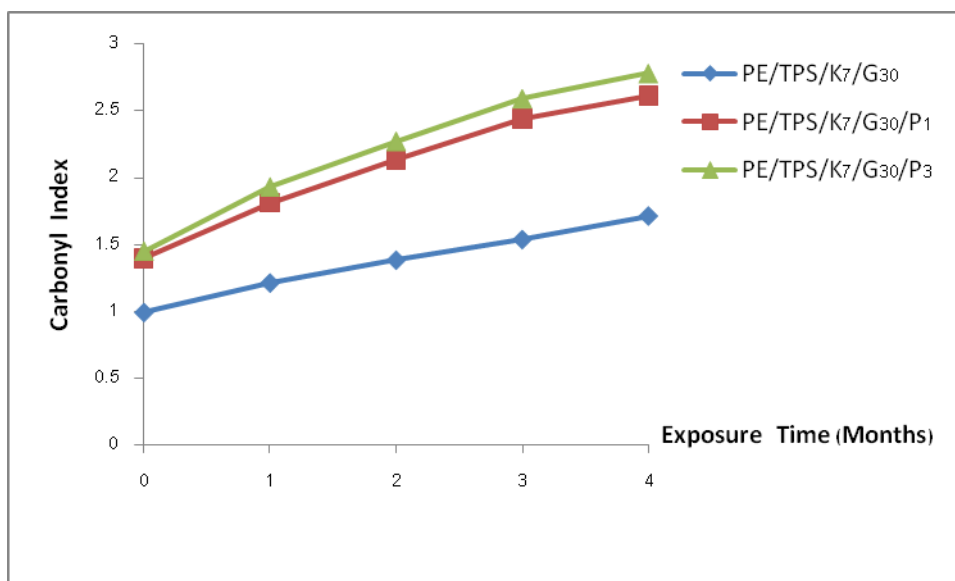


(จ)

รูปที่ 4.34 แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 1800-1400 cm^{-1} ของพอลิ

เมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากที่ทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน: (ก) 0 เดือน

(ข) 1 เดือน (ค) 2 เดือน (ง) 3 เดือน และ (จ) 4 เดือน



รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างหลังจากทำการ
หลังจากฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน

จากการทดลองในตอนที่ 3 พบว่าสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟิโอฟ) ช่วยทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น โดยในการทดลองทำการทดสอบที่ 2 สภาวะคือนำไปเอจิงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาการย่อยสลายทางความร้อนของฟิล์มซึ่งในเบื้องต้นพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายทางความร้อนได้ และยังพบว่าสูตรที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟิโอฟ) มีค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมฟิโอฟ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกช่วยทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางความร้อนได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟิโอฟ) 3 phr ช่วยทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายที่ดีที่สุดซึ่งสังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่ลดลงและค่าดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น แต่จากการศึกษาการย่อยสลายทางความร้อนด้วยการเอจิง อาจให้ผลการทดลองที่ไม่ชัดเจนมากเท่ากับการฉายแสงยูวี อาจเนื่องมาจากช่วงระยะเวลาในการทดสอบยังไม่เหมาะสม แต่การเอจิงสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถเกิดการย่อยสลายทางความร้อนได้และเพื่อศึกษาการย่อยสลายทางแสง ได้นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกไปฉายแสงยูวี เป็นระยะเวลา 4 เดือน จากการทดลองพบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกสามารถเกิดการย่อยสลายทางแสงได้ซึ่งเห็นได้จากสีที่เปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงกลที่ลดลง และดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น และสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกปริมาณ 3 phr จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลงมากที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งสภาวะภายใต้ความร้อนและ

แสงยูวี ทำให้สายโซ่พอลิเอทิลีนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการตัดขาดของสายโซ่ที่มากขึ้นจึงเกิด
เสถียรภาพที่มากขึ้นส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายที่ดีขึ้น