

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
ผสมกับพอลิแซ็กคาไรด์

DEGRADABLE POLYMERS FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE
MIXED WITH POLYSACCHARIDES

สมเจตน์ เชี่ยววานิช
SOMJATE CHANGVANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-551-2

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
ผสมกับพอลิแซ็กคาไรด์

DEGRADABLE POLYMERS FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE
MIXED WITH POLYSACCHARIDES

สมเจตน์ เชียงวานิช
SOMJATE CHANGVANICH

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 42566
วัน, เดือน, ปี 3 1 พ.ศ. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-551-2

DEGRADABLE POLYMERS FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE
MIXED WITH POLYSACCHARIDES

SOMJATE CHANGVANICH

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2002
ISBN 974-648-551-2

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสม กับพอลิแซ็กคาไรด์
นักศึกษา	สมเจตน์ เชียงวานิช
รหัสประจำตัว	42065102
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้พลาสติกมากขึ้นทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากขยะพลาสติกมีการย่อยสลายได้ช้าจึงก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม วิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยใช้สารตัวเติมประเภทแป้งในพอลิเมอร์เพื่อช่วยให้มีการย่อยสลายของพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้เร็วกว่าปกติ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากการย่อยสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตและย่อยสลายตามธรรมชาติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใส่สารตัวเติมประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและลิกโนเซลลูโลสจากชานอ้อย โดยมีกลีเซอรอลเป็นสารช่วยกระจายตัวภาวะที่ทำการศึกษ ได้แก่ ปริมาณกลีเซอรอล แป้ง ลิกโนเซลลูโลสและกระบวนการผสมสารตัวเติมทำการทดลองโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเปรียบเทียบกับ การฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 เดือนทำการศึกษา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมที่สลายตัวด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการฝังกลบในดินที่มีความชื้นน้อย ความชื้นมากและเบส การผสม HDPE กับ แป้ง และกลีเซอรอล พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งจะทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงดึง ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ HDPE ที่ไม่ได้ผสม สำหรับ HDPE ที่ผสมเส้นใย และกลีเซอรอล เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงดึง ลดลง เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ได้ผสม จาก SEM พบว่า กลีเซอรอลช่วยให้แป้งกับ HDPE เข้ากันได้ดี

ผลการทดลอง พบว่า การฉายแสง UV ทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การฝังกลบ ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าการฉายแสงทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ลดลง เนื่องจากเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ขณะที่การฝังกลบทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) สูงขึ้น ผลการหาปริมาณหมู่คาร์บอนิล พบว่า การฉายแสงเกิดหมู่คาร์บอนิล

เนื่องจากแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับพอลิเอทิลีนและปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทำการทดลอง แต่การฝังกลบไม่พบหมู่คาร์บอนิลเพิ่มเนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายแป้งและลิกโนเซลลูโลส เมื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกโดย XRD พบว่า ทุกสภาวะที่ใช้ทำการทดลองไม่มีผลกับโครงสร้างผลึก

ผลการศึกษาโดย SEM พบว่า แสง UV ทำให้พื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นรูพรุน แตกร้าวเปราะ การฝังกลบพบว่าพื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งเกิดรูพรุน แต่ไม่แตกร้าวจึงเปราะเหมือนการฉายแสง UV จากผลการทดลองทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่าการย่อยสลายทางแสงของ HDPE เร็วกว่าการย่อยสลายโดยการฝังกลบ แสง UV ทำให้เกิดการสลายตัวของ HDPE เพราะเกิดออกซิเดชัน ส่วนการฝังกลบในดินสภาวะเบสจะทำให้แป้งและลิกโนเซลลูโลสเกิดการย่อยสลายได้ดีเป็นการเพิ่มรูพรุนให้มากขึ้น

Thesis Title	Degradable Polymers from High Density Polyethylene Mixed with Polysaccharides
Student	Somjate Changvanich
Student ID	42065102
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof.Malinee Chaisupakijsin

ABSTRACT

Nowadays plastics are worldwide used materials. Many plastic wastes have been increased due to their stability and slow degradation. One of the methods for solving this problem is to mix starch into polymers for increasing polymer degradation.

In this thesis, we studied the degradation of high density polyethylene (HDPE) mixed with and without fillers under UV exposure and bury conditions. Two kinds of polysaccharides ,i.e., starch and lignocellulose from bagasse fiber were used as the fillers. Glycerol was also used as a dispersing agent. The amount of filled glycerol, starch, and lignocellulose were studied. After preparing mixtures of HDPE and the fillers, samples of all formulas were divided into 2 groups. First group was treated with UV light and second group was buried in soil. Soil conditions were studied including low moisture, high moisture and alkali.

Results from the mixture of HDPE blended with starch or lignocellulose and glycerol showed that elongation at break and tensile strength decreased with increasing starch when compared with those of pure HDPE . The result from SEM showed that glycerol provided the best mixture between starch and HDPE.

The results showed that UV light decreased the elongation at break of the polymer much more than bury conditions. Data from thermal properties found that T_m of all samples decreased under UV exposure due to chain scission. On the other hand , T_m of all samples slightly increased under bury conditions. The amount of carbonyl groups was found to increase with increasing exposure time. No carbonyl group was increased under bury conditions. On the other hand, hydroxyl groups was found to

decrease caused by microorganism. The data gained from XRD indicated that both UV light and bury conditions showed no effect on polymer crystal structures. The picture received from SEM showed that UV treated samples showed porous and cracked surface while buried samples showed porous and crazed surfaces.

Our results showed that UV light induced oxidation reaction of HDPE faster than bury conditions. By contrast , alkali condition produced porous surface more than UV light condition due to starch and lignocellulose degradation.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.มาลินี เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ ความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ที่ได้รับ เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ดร.ภัทรารุณ มนต์วิเศษ และ คุณ วรธรรม อุ่นจิตติชัย และคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธนิศ ผิวนิม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ SEM

ขอขอบคุณ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง DSC

ขอขอบคุณ คุณ กฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณ สุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ แผนกระบบสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ พี่สาว พี่เขย คุณดวงหทัยและเพื่อนๆที่เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆที่ช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สมเจตน์ เชียงวานิช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
คำย่อ	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 สารเติมและสารเสริมแรง	9
2.2.1 คำจำกัดความ	9
2.2.2 ประวัติ	9
2.2.3 ทฤษฎีและสมบัติทั่วไป	10
2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	17
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	18
2.4.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์	18
2.5 ชานอ้อย	19
2.5.1 เซลลูโลส	19
2.6 คุณสมบัติของกาลีเซอรอล	21
2.7 องค์ประกอบทางเคมีแป้ง	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่3 การวิจัยและการดำเนินงาน	30
3.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง	32
3.3.1 เตรียมวัตถุดิบตั้งต้นและผสม	32
3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน	33
3.3.3 การทดลอง.....	38
3.4 การทดสอบสมบัติคอมพอสิต	39
3.4.1 การทดสอบเชิงกล	39
3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	39
3.4.3 การหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน	39
3.4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	39
บทที่4 ผลการทดลอง	40
4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล	40
4.2 การหาปริมาณการออกซิเดชัน	57
4.2.1 การหาดัชนีคาร์บอนิล (ΔCI)	65
4.2.2 การหาดัชนีไฮดรอกซิล	67
4.3 สมบัติทางความร้อน	71
4.3.1 ความเป็นผลึก	77
4.4 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์มพอลิเมอร์	79
4.5 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	87
4.5.1 สัณฐานวิทยาของตัวอย่าง	87
4.5.2 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการฝังดิน	88
4.5.3 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการฉายแสง UV	94

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	98
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก	104
ภาคผนวก ข	105
ภาคผนวก ค	110
ภาคผนวก ง	111
ประวัติผู้เขียน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของพลาสติกเติมและสารเสริมแรง	14
2.2 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีของชานอ้อย	19
3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสม	34
ค.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนและหลังทำการทดลอง ในสภาวะต่างๆ	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยผลึก	17
2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	20
2.3 แสดงฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีแป้ง 15 %ก่อนอยู่ในเชื้อรา	23
2.4 แสดงฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีแป้ง 15 %หลังจากอยู่ในเชื้อรา 6 เดือน	24
2.5 การย่อยสลายเม็ดแป้งของพอลิเอทิลีนในสิ่งแวดล้อมต่างๆ	24
2.6 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเสถียรภาพทางออกซิเดชันของฟิล์มบางที่มีระดับความต่างของตัวเติมในการเสถียรภาพของ Master batch	25
2.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลกับเวลา	26
2.8 การเสถียรภาพทางแรงดึงของฟิล์มที่มีแป้ง 6 %ในสิ่งแวดล้อมต่างๆ	26
2.9 ผลของการฝังกลบที่มีผลต่อความทนแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	27
2.10 ผลของการฉายแสงที่มีผลร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดในการเสถียรภาพของสูตรต่างๆ	27
2.11 การเสถียรภาพทางแสงหลังจากการฝังกลบ 30 วัน	28
2.12 แสดงการเสถียรภาพโดยการออกซิเดชันของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	28
2.13 แสดงผลของออกซิเดชันที่มีต่ออัตราการเสถียรภาพโดยการออกซิเดชัน	29
3.1 รูปร่างแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง	31
3.2 แผนผังขั้นตอนการผลิต	33
3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	35
3.4 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการอัดร้อนของ HDPE+แป้ง30%	36
3.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการอัดร้อนของ HDPE+เส้นใย10%+กลีเซอรอล30%	36
3.6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัดเป็นรูป Dumbbell ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	37
3.7 แผนผังขั้นตอนการทดลอง	38
4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงและ ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ	40
4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของ HDPE(A) ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	41
4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของ HDPE +แป้ง30%(B)ในสภาวะการทดลองต่างๆ	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของ HDPE+แป้ง10%+ ก्लीเซอรอล30%(C)ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	42
4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของ HDPE+แป้ง20%+ ก्लीเซอรอล30%(D)ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	43
4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด ของ HDPE +แป้ง30%+ ก्लीเซอรอล30% (E)ในสภาวะการทดลองต่างๆ	43
4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของ HDPE +เส้นใย10%+ ก्लीเซอรอล30%(F)ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	44
4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของ HDPE +เส้นใย20%+ ก्लीเซอรอล30%(G)ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	44
4.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด ของ HDPE +เส้นใย30%+ ก्लीเซอรอล30%(H)ในสภาวะการทดลองต่างๆ	45
4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด ของ HDPE +เส้นใย30%(I)ใน สภาวะการทดลองต่างๆ	45
4.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด ของ HDPE +แป้ง15%+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%(J)ในสภาวะการทดลองต่างๆ	46
4.12 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE (A)ในสภาวะการทดลองต่างๆ	47
4.13 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE +แป้ง30%(B)ในสภาวะการทดลองต่างๆ	47
4.14 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE +แป้ง10%+กลีเซอรอล30%(C) ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	48
4.15 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE +แป้ง20%+กลีเซอรอล30%(D) ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	48
4.16 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE +แป้ง30%+กลีเซอรอล30%(E) ในสภาวะการทดลองต่างๆ	49
4.17 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE +เส้นใย10%+กลีเซอรอล30%(F) ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย20%+กลีเซอรอล30%(G) ในสภาวะการทดลองต่างๆ.....	50
4.19 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%(H) ในสภาวะการทดลองต่างๆ	50
4.20 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย30%(I) ในสภาวะการทดลองต่างๆ	51
4.21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงของ HDPE + แป้ง15%+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%(J) ในสภาวะการทดลองต่างๆ	51
4.22 เปรียบเทียบร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะ ความชื้นน้อย	52
4.23 เปรียบเทียบร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะ ความชื้นมาก	53
4.24 เปรียบเทียบร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะเบส	53
4.25 เปรียบเทียบร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในแสง UV	54
4.26 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะความชื้นน้อย	55
4.27 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะความชื้นมาก	55
4.28 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะเบส	56
4.29 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในแสง UV	56
4.30 กราฟ FTIR แสดงการเปรียบเทียบช่วง1500-2000 cm^{-1} ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	58
4.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE ในสภาวะต่างๆ	59
4.32 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+แป้ง30%ในสภาวะต่างๆ	60
4.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% ในสภาวะต่างๆ	61
4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+เส้นใย30% ในสภาวะต่างๆ	62
4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30% ในสภาวะต่างๆ	63

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+เส้นใย15%+แป้ง15%+กลีเซอรอล 30%ในสภาวะต่างๆ	64
4.37 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPEผสม แป้ง เส้นใยที่มี และไม่มีกลีเซอรอลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน	65
4.38 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE ผสมเส้นใยที่มี และไม่มีกลีเซอรอลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน	66
4.39 กราฟ FTIR หมู่ไฮดรอกซิลของ กลีเซอรอล แป้งหรือเส้นใย และไฮโดรเพอร์ออกไซด์	67
4.40 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นน้อยเป็น เวลา 4 เดือน	68
4.41 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นมากเป็น เวลา 4 เดือน	68
4.42 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฝังกลบในสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน	69
4.43 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน	69
4.44 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการทดลอง	71
4.45 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นน้อย เป็นเวลา 4 เดือน	72
4.46 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นมาก เป็นเวลา 4 เดือน	73
4.47 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบในสภาวะเบส เป็นเวลา 4 เดือน	74
4.48 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน	76
4.49 กราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในสภาวะต่างๆ	77
4.50 กราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในสภาวะก่อนและ หลังฉาย UV	78
4.51 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์มพอลิเมอร์สูตรต่างๆก่อนทำการ	79
4.52 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPEก่อนและหลังการทดลอง	80
4.53 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+แป้ง 30% ก่อนและหลังการทดลอง	81

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% ก่อนและ หลังการทดลอง	82
4.55 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30% ก่อนและหลังการทดลอง	83
4.56 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% ก่อนและ หลังการทดลอง	84
4.57 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% ก่อน และหลังการทดลอง	85
4.58 ภาพจาก SEM แสดงการกระจายตัวของแป้ง เส้นใยโดยมีกลีเซอรอลและไม่มีกลีเซอรอล ในพอลิเมอร์ผสม.....	87
4.59 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบ ในดินที่มีความชื้นน้อยเป็นระยะเวลา 4 เดือน	88
4.59(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝัง กลบในดินที่มีความชื้นน้อยเป็นระยะเวลา 4 เดือน	89
4.60 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบ ในดินที่มีความชื้นมากเป็นระยะเวลา 4 เดือน	90
4.60(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝัง กลบในดินที่มีความชื้นมากเป็นระยะเวลา 4 เดือน	91
4.61 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบ ในดินที่มีเบสเป็นระยะเวลา 4 เดือน	92
4.61(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝัง กลบในดินที่มีเบสเป็นระยะเวลา 4 เดือน	93
4.62 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฉาย แสง UV เป็นเวลา 4 เดือน	95
4.62(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการ ฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน	96
5.1 แสดงการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง	99
ก.1 ขนาดของเส้นใยอ้อยที่ผ่านการขึ้นรูป(กำลังขยาย 25 เท่า)	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 แสดงพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการขึ้นรูป(กำลังขยาย165เท่า)	104
ข.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาวะความชื้นน้อย	105
ข.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะความชื้นน้อย	105
ข.3 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด เบส ในสภาวะความชื้นน้อย	106
ข.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาวะความชื้นมาก	106
ข.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะความชื้นมาก	107
ข.6 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด เบส ในสภาวะความชื้นมาก	107
ข.7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาวะเบส	108
ข.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะเบส	108
ข.9 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด เบส ในสภาวะเบส	109
ง.1 กราฟ FTIR ของ HDPE (A) ก่อนทำการทดลอง	111
ง.2 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%(B) ก่อนทำการทดลอง	111
ง.3 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30%(E) ก่อนทำการทดลอง	112
ง.4 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30%(H) ก่อนทำการทดลอง	112
ง.5 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30% (I) ก่อนทำการทดลอง	113
ง.6 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 15%+เส้นใย 15%+กลีเซอรอล 30% (J) ก่อนทำการทดลอง	113
ง.7 กราฟ FTIR ของ HDP(A) หลังฉายแสง UV 4 เดือน	114
ง.8 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%(B) หลังฉายแสง UV 4	114
ง.9 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30%(E) หลังฉายแสง UV 4 เดือน	115
ง.10 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30%(H) หลังฉายแสง UV 4เดือน	115
ง.11 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30%(I) หลังฉายแสง UV 4เดือน	116
ง.12 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 15%+เส้นใย 15%+กลีเซอรอล 30%(J) หลังฉายแสง UV 4 เดือน	116

คำย่อ

ABS	: Acrylonitrile Butadiene Styrene
BMC	: Bulk Molding Compound
EPR	: Ethylene Propylene Rubber
EVOH	: Ethylene-Vinyl Alcohol
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
HDPE	: High Density Polyethylene
LDPE	: Low Density Polyethylene
LLDPE	: Linear Low Density Polyethylene
MB	: Master Batch
NaOH	: Sodium Hydroxide
PE	: Polyethylene
PE-g-MA	: Polyethylene-g-Maleic Anhydride Copolymer
PP	: Polypropylene
PS	: Polystyrene
SAXS	: Small Angle X-ray Scattering
SEM	: Scanning Electron Microscopy
SBS	: Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer
SMC	: Sheet Molding Compound
T_g	: Glass Transition Temperature
UV	: Ultraviolet
WAXS	: Wide Angle X-ray Scattering

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุที่ทำจากพอลิเมอร์มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน และมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้มากขึ้นในอนาคต เนื่องจากมีความทนทานและน้ำหนักเบา แต่การนำพอลิเมอร์มาใช้เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปัญหาจากขยะพลาสติกที่มีปริมาณมากขึ้น จากปัญหานี้ทำให้มีการหาวิธีการกำจัดขยะที่เหมาะสม ซึ่งในปัจจุบัน การกำจัดขยะเชิงมี 3 วิธี คือ

1. การฝังกลบ
2. การทำรีไซเคิล
3. การย่อยสลาย

การกำจัดขยะโดยการฝังกลบ พบว่าเกิดปัญหาเรื่องสถานที่ เนื่องจากขยะพลาสติกจะใช้เวลาในการฝังกลบมาก เมื่อขาดแคลนพื้นที่และที่ดินมีราคาแพงทำให้วิธีการกำจัดขยะวิธีนี้มีต้นทุนสูง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำ การกำจัดขยะ โดยนำขยะพลาสติกต่างชนิดกันมาผสมกันแล้วนำกลับมาใช้ใหม่เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ แต่พบว่าอาจก่อให้เกิดพลาสติกผสมชนิดใหม่ที่ย่อยสลายยากกว่าเดิมและปัจจุบันต้นทุนของการทำเช่นนี้ยังไม่เหมาะสม การกำจัดขยะโดยการย่อยสลายของพอลิเมอร์ทั้งโดยแสงและโดยทางจุลินทรีย์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหaxyขยะพลาสติก ปัจจุบันมีความพยายามทำพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยใช้แป้งเป็นสารตัวเติม ในประเทศสหรัฐอเมริกาและยุโรป แป้งเป็นผลิตภัณฑ์ราคาไม่แพงเพราะมีเกินความต้องการ และมีตลอดทั้งปี ทั้งที่ได้จากมันและข้าวโพด การย่อยสลายทางชีวภาพของแป้งเกิดได้ง่ายในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ และสามารถควบคุมการเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดตามที่ตลาดต้องการ การเสถียรภาพหรือการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์แป้งเป็นการรีไซเคิลบรรยากาศของ CO₂ เนื่องจากพืชจะจับ CO₂ แล้วสร้างแป้ง จึงเป็นเหตุผลให้มีความสนใจในการใช้แป้งเป็นหลักในการผสมพลาสติก

แป้งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ Amylose ซึ่งเป็นสายโซ่ตรงของ (1→4)- α -D-glucose และ Amylopectin มี (1→4)- α -D-glucose เป็นสายโซ่ตรงและมี (1→6)- α -D-glucose เป็นกิ่งก้านสาขา ส่วนของ Amylose ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นเส้นตรง มีน้ำหนักโมเลกุล 0.2-2 ล้าน ในขณะที่กิ่งก้านสาขาของ Amylopectin มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 100-400 ล้าน ในธรรมชาติแป้งที่พบทั่วไปมีลักษณะเป็นทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-100 μ m มีการปรับ

ปรุงผลึกเป็น 3 แบบในแบบ A (Cereal) B (Tuber) และ C (Smooth pea และ Various beans)
ทุกลักษณะเป็น Double helices

แป้งเป็นผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติสามารถใช้เติมในพลาสติกเป็นสารตัวเติม เช่น พอลิโอสเตอรีนผสมกับเม็ดแป้ง พิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมแป้งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพโดยการวางไว้ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ จุลินทรีย์ในดินจะย่อยแป้งนำไปสู่การเพิ่มช่องว่างหรือรูพรุนในพอลิเมอร์เมตริกซ์ทำให้พอลิเมอร์สูญเสียสมบัติเชิงกล โดยทั่วไปแป้งสามารถผสมได้ในปริมาณ 6-15% โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ ส่วนโลหะทรานซิชันที่ผสมในเทอร์โมพลาสติกของพอลิเมอร์เมตริกซ์ ใช้เป็นสารตัวเติมทำให้เกิด Pro-oxidant หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงและความร้อน

แป้งสามารถนำมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกโดยสามารถใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น เตรียมเป็นฟิล์มบางหรือเตรียมเป็นรูนโดยใช้เครื่องมือที่มีความดันสูงในการอัดรีด ความแตกต่างด้านพลังงานความร้อนขณะทำการผลิตและความต่อเนื่องในการอัดเจ็ลขึ้นกับ ความหนืดของแป้ง ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความชื้นในแป้งก่อนอัดรีด และอัตราส่วน Amylose/Amylopectin Thermoplastic starch สามารถใช้กระบวนการผลิตเช่นเดียวกับพลาสติกอื่นๆ (Thermoplastic starch ไม่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ทั้งหมด)

คอมพอลสิตที่เตรียมจากแป้งและพลาสติกสามารถผสมแป้งได้มากกว่า 50% เช่น ในระบบที่มีแป้ง/Vinyl alcohol copolymer การเปลี่ยนแปลงสถานะในการผลิต ชนิดของแป้งและชนิดของโคพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบสามารถสร้างพอลิเมอร์คอมพอลสิตที่มีสัดส่วนวิทยาและสมบัติที่หลากหลาย เพราะ Amylose มีพันธะไฮโดรเจนมากและมีการพันกันระหว่างสายโซ่ของ Amylose/Vinyl alcohol copolymer รูปร่างที่ซับซ้อนนี้เรียกว่า "Interpreted" อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุจะขึ้นกับอัตราส่วนของ Amylose/Vinyl alcohol ผลิตภัณฑ์ที่มีประกอบด้วยแป้ง และ EVOH มีสมบัติเชิงกลที่ดีพอสำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์เช่นความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ ฉีด (Injection molding) เป่า (Blow molding) หรือ โฟม (Foaming) เมื่อเทียบกับพลาสติก เช่น Polystyrene (PS) Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) และ Low density polyethylene (LDPE) ซึ่งมีข้อจำกัดหลักคือมีความว่องไวต่อความชื้นต่ำ การเสถียรภาพทางชีวภาพของคอมพอลสิตขึ้นกับความแตกต่างของสถานะแวดล้อม เช่น เมื่อมีน้ำเป็นสิ่งแวดล้อมต้องใช้เวลาในการเสถียรภาพ 2-3 ปี แป้งสามารถช่วยให้พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ เช่น อะซิฟาทิกพอลิเอสเทอร์ย่อยสลายได้ เป็นที่ทราบกันว่าอะซิฟาทิกพอลิเอสเทอร์มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้กระบวนการผลิตทั่วไป เช่น การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) ไม่สามารถนำมาใช้กับอะซิฟาทิกพอลิเอสเทอร์แต่ พบว่า แป้งสามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตเป่าขึ้นรูปของอะซิฟาทิกพอลิเอสเทอร์และความเสถียรภาพทางชีวภาพได้ [1]

นอกจากแบ่งแล้วขานอ้อยเป็นเส้นใยธรรมชาติสามารถใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกได้ โครงสร้างเส้นใยขานอ้อยโดยทั่วไปประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบที่เหลือเป็น เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และองค์ประกอบอื่นๆซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดนี้เรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เส้นใยอ้อยมีปริมาณมาก เป็นผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล มีราคาถูก สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติด้วยเหตุนี้ จึงนำขานอ้อยผสมในพลาสติกเพื่อช่วยในการย่อยสลาย และช่วยลดการใช้ขยะพลาสติก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อเป็นแนวทางในการนำสารอินทรีย์จากธรรมชาติประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ เช่นแป้งและลิกโนเซลลูโลสมาใช้เป็นสารตัวเติม
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารช่วยกระจายตัวของแป้งและลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลายของ High density polyethylene (HDPE) โดยแสง Ultraviolet (UV) และสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลายของแป้งและ HDPE
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตที่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมและระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อทำผลิตภัณฑ์พลาสติกเกี่ยวกับการเกษตร เช่น กระถางต้นไม้ พลาสติกคลุมดิน ถังปุ๋ย
5. เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและการใช้ประโยชน์ให้กับสารธรรมชาติ และเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการกระจายตัวของแป้งและลิกโนเซลลูโลสเมื่อมีและไม่มีสารช่วยกระจายตัวกลีเซอรอล
2. ศึกษาปริมาณแป้งและลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลายตัวของ HDPE โดยแสง UV และในดินที่สภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมาก และเบล
3. ศึกษาเปรียบเทียบ ปริมาณของหมู่คาร์บอนิลและปริมาณหมู่เพอร์ออกไซด์ในพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาของการได้รับแสง UV และเวลาที่วางไว้ในดินที่สภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมาก และเบล
4. ศึกษาผลของปริมาณแป้งที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆทั้งก่อนและหลังการฉายแสง UV

5. ศึกษาผลของปริมาณแอมป์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆที่วางไว้ในดินที่ลภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมากและเบส
6. ศึกษาอิทธิพลของแอมป์และลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อโครงสร้างของ HDPE ก่อนและหลังได้รับแสง UV โดยใช้ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.1998 Catia B. [2] ได้ทำการศึกษา ใ้แบ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์โดยเตรียมเป็น Thermoplastic starch, Thermoplastic starch composite และทำการแบ่งพอลิเมอร์ผสมเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) แบ่งผสมกับพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย หมู่ชอบน้ำ และหมู่ไม่ชอบน้ำ เช่นโคพอลิเมอร์ของไวนิลแอลกอฮอล์
- 2) แบ่งผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น อนุพันธ์ของเซลลูโลส
- 3) แบ่งผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้ เช่น Gelatinized starch กับพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำ ได้แก่ Poly(Vinyl alcohol)

บริษัท Novamont ได้ผลิตพลาสติกผสมดังกล่าวจำหน่ายในชื่อ MATER-BI PRODUCTS โดยแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

- 1) Class Z = สามารถย่อยสลายทางชีวภาพและ เน่าเปื่อยได้เพื่อใช้ทำฟิล์มและแผ่นบาง
- 2) Class V = สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ เน่าเปื่อยได้และละลายได้เพื่อใช้แทนที่ภาชนะบรรจุภัณฑ์ประเภทโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน
- 3) Class Y = สามารถย่อยสลายทางชีวภาพและเน่าเปื่อยได้สำหรับทำพลาสติกแข็งและมีความเสถียรภาพในการฉีดในแม่แบบ
- 4) Class A = สามารถย่อยสลายทางชีวภาพแต่ไม่เน่าเปื่อยใช้เวลาการย่อยสลาย 2 ปีในสภาวะที่มีน้ำ

ในปี ค.ศ. 1993 Greizerotein H.B. และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการเสียดสภาพของถุงใส่ไบโม่ที่มีการเติมแป้งลงในพลาสติกที่ใช้ทำถุง Boostar Plus[®]

ทำการทดลองโดยนำถุงครึ่งหนึ่งฝังดินลึก 2-3 ฟุต ส่วนที่เหลือจะปล่อยให้อยู่บนผิวดิน จากนั้นทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพ โดยอุณหภูมิที่ใช้ฝังถุง คือ 130°F-135°F พบว่าถุงใส่ไบโม่มีอัตราการเสียดสภาพที่แตกต่างกัน โดยถุงที่อยู่บนพื้นผิวมีการสูญเสียแป้งมีจุดหลอมเหลวต่ำและเกิดการแตกหักหลัง 14 วัน ของการตากแดด ส่วนถุงที่ฝังกลบจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

มีจุดหลอมเหลวลดลงหลังฝังดิน 14 วันและมีการออกซิเดชันหลังจากผ่านไป 28 และ 49 วัน การทดลองนี้พบว่าสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ ถุงที่อยู่บนดินสลายตัวโดยแสงแดดที่อุณหภูมิ 40°F ถึง 90°F และ ออกซิเจน ในขณะที่ถุงที่ฝังดินจะมีความชื้นมีออกซิเจนน้อย ไม่มีแสงแดดและอุณหภูมิ 130°F ถึง 135°F ถุงที่อยู่ผิวดินออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดในระหว่าง 2-4 สัปดาห์ แสงแดดทำให้เกิดการสลายตัวโดยแสง ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่และการเชื่อมโยง ปฏิริยาออกซิเดชันโดยแสงทำให้พื้นผิวฟิล์มและในเนื้อฟิล์มมีลักษณะวิหยาต่างกัน

ในปี ค.ศ. 1992 Albertsson A.C. และคณะ [4] ได้ทำการทดลองศึกษาการสลายตัวของฟิล์ม LDPE ที่มีแป้งผสม Pro-oxidant และสารที่ช่วยให้เสถียรทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C และ 60°C การสลายตัวโดยแสง UV ใน Weatherometer การเสถียรภาพสามารถติดตามโดยใช้ Chemiluminescence (CL) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) Differential scanning calorimetry (DSC) High temperature size exclusion chromatography (HTSEC) และ Scanning electron microscopy (SEM) การเสถียรภาพกลายเป็นไอติดตามโดย Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) ผลของทุกเทคนิคที่ใช้พบว่า LDPE ที่มีแป้งและไม่มีตัวเติมที่ช่วยให้เสถียรทางความร้อนจะไม่เกิดการเสถียรภาพสำหรับสูตรที่มี pro-oxidant จะมีการเสถียรภาพ

ในปี ค.ศ. 1973 Griffin G.J. [5] มีความคิดที่จะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการเติมสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายโดยชีวภาพ (Biodegradable additive) ในวัสดุพอลิเมอร์โดยการผสมเม็ดแป้งในพอลิเอทิลีนและพบว่าสามารถเร่งการย่อยสลายโดยใช้ไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งจะเกิด Peroxide และ Autoxidation เพิ่มขึ้นมาก

ค.ศ. 1994 Albertsson A.C. และคณะ [6] ได้ศึกษาเปรียบเทียบปฏิริยาออกซิเดชันของ LDPE เมื่อเติมแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวโพดที่ผสมสาร Pro-oxidant ซึ่งในการทดลองประกอบด้วยสูตรต่างๆดังนี้ LDPE, LDPE+3.9% starch, LDPE+5.8% starch, LDPE+7.9% starch โดยน้ำหนัก และตัวอย่างอีกกลุ่มผสม Master batch (MB) ได้แก่ LDPE+10% MB, LDPE+15% MB และ LDPE+20% MB โดย MB นั้นประกอบด้วยแป้งข้าวโพดเป็นหลักและ LLDPE, Styrene-butadiene-styrene copolymer (SBS) และ Manganese stearate ผลการทดลองพบว่า LDPE ที่เติม MB มีความไวต่อปฏิริยาออกซิเดชันโดยแสงมาก โดยพิจารณาจากจำนวนของหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นขณะทำการฉายแสงมีมากกว่า

LDPE+แป้ง และพบว่า MB จะมีผลทำให้ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด ของ LDPE ลดลงหลังจากฉายแสง 500 ชั่วโมง โดยลดลงจากก่อนฉายแสง 650 เท่า ทำให้วัสดุมีความเปราะอย่างมาก ในขณะที่พลาสติกผสมกับแป้งข้าวโพดอย่างเดียว จำนวนหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ไม่มีการเพิ่มขึ้น การลดลงของความทนแรงดึงเปลี่ยนไปในลักษณะเดียวกันกับ LDPE ที่เติม MB และยังตรวจพบว่า LDPE+MB จะมีรูพรุนหลังจากการเสียดสภาพอันเกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม

ในปี ค.ศ. 1995 Shaha P.B. และคณะ [7] ได้ทำการวิจัยการย่อยสลายทางชีวภาพของสารตัวเติมในเทอร์โมพลาสติกจุดมุ่งหมายคือ การศึกษากลไกการเสียดสภาพของแป้งที่เติมใน LDPE และการบวมของแป้งในชิ้นงาน LDPE ซึ่งสังเกตได้โดยใช้แป้งธรรมดา องค์ประกอบที่ใส่ใน LDPE ต้องทำให้แห้งและใช้เม็ดแป้งที่ปรับปรุง (CATO-32) ด้วยเทคนิค Griffin โดยทำการผสม LDPE กับแป้งและสารตัวเติมอื่นๆ บน Two-roll mill ที่อุณหภูมิ 125-130 °C จากนั้นใช้ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) ขึ้นรูปชิ้นงาน การทดลองการย่อยสลายของแป้งในห้องทดลองมี 3 เงื่อนไข ได้แก่ การไฮโดรลิซิสแป้งด้วย α -amylase ที่อุณหภูมิที่ 95 °C อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 °C และการฉายแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm ใช้ SEM ดูการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว ผลวิเคราะห์จาก SEM พบว่าหลังจากการทำไฮโดรลิซิสด้วย α -amylase พื้นผิวบริเวณที่เป็นแป้งเกิดหลุม แป้งที่เติมใน LDPE จะทำให้เกิดการแตกหักเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน ในกรณีที่เติม Pro-oxidant เช่น Oleated และเหล็ก (Fe) จะทำให้มีอัตราการสลายตัวด้วยความร้อนของตัวอย่างเพิ่มขึ้น 15-20% การฉายแสง UV จะทำให้หมู่คาร์บอนิลและหมู่ไวนิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาตัดสายโซ่ ความแตกต่างของสิ่งแวดล้อมมีผลต่อกลไกการเสียดสภาพของแป้งใน LDPE

ในปี ค.ศ. 1998 Zuchowska D. และคณะ [8] ได้ทำการทดลองผสมพอลิโพลีเอทิลีน 30-40% โดยน้ำหนักกับแป้งที่ผสมพลาสติกไฮดรอกซีทอสบโดยฝังดินเป็นเวลา 4 เดือนและทำการกัดผิวหน้าของตัวอย่างด้วยสารละลาย 10% NaOH เป็นเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิห้องตรวจสอบการเสียดสภาพ ที่เกิดขึ้นโดยวิธี SAXS และ WAXS การสลายตัวทางชีวภาพในดินและการสลายตัวทางเคมีโดยสารละลาย NaOH ของ PE หรือ PP ผสม กับแป้ง (ประกอบด้วย 2 วัฏภาคที่ต่อเนื่อง) มีต่อโครงสร้างของพอลิเมอร์เมตริกซ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ PP การเปลี่ยนแปลงสามารถสังเกตเห็น ที่ส่วนประสานระหว่างผิวแป้งกับพอลิโพลีเอทิลีน ในสภาวะที่เปียกเกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์เมตริกซ์ ผลจากกระบวนการสลายตัวทางเคมีและกายภาพเป็นสาเหตุนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ในปี ค.ศ. 1998 Bikiaris D. และคณะ [9] ได้ทำการทดลองโดยใช้ LDPE ผสมกับแป้งที่ผสมกับ glycerol (PLST) โดยมี Polyethylene-g-maleic anhydrides copolymer เป็น สารช่วยผสมชนิดที่มีหมู่วงไว ปริมาณแป้งที่ใช้ 5, 10, 15, 20 และ 30% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์และใช้สารช่วยผสม 10% โดยน้ำหนักแป้ง ทำการทดลองวัดสมบัติเชิงกลและการย่อยสลาย ทางชีวภาพ ผลของ LDPE/PLST ผสมโดยใช้โคพอลิเมอร์ PE-g-MA เป็นสารช่วยผสม พอลิเมอร์ผสม แสดงการกระจายตัวของ PLST ใน LDPE เมตริกซ์ที่ดีกว่ากับลักษณะเด่นที่เกิดร่วมกันคือการลดขนาดของวฏภาค ซึ่งให้เห็นการเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ 2 ตัวและสมบัติทางเชิงกล พบว่าความทนแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสม ความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมเมื่ออยู่ใน Activated sludge พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสมจะย่อยสลายน้อยกว่าเมื่อไม่มีสารช่วยผสมเพียงเล็กน้อย

ในปี ค.ศ. 1999 Albano C. และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาการเสียดสภาพทางความร้อนเมื่อผสมพอลิโอฟีนกับเส้นใยที่ทำการปรับปรุงสภาพผิวด้วยการแอซิติลเลตและไม่ปรับปรุงผิวด้วยการแอซิติลเลต (Non-acetylate) ตัวอย่างที่ทดสอบได้แก่ PP/HDPE PP/HDPE/Funtionalized EPR (Ethylene propylene rubber) และ PP/HDPE/Non-funtionalized EPR ทำการศึกษาการเสียดสภาพของเส้นใยทั้งที่ผ่านการปรับปรุงและไม่ผ่านการปรับปรุงโดยใช้ TGA วิเคราะห์ความสามารถทนความร้อน การวิเคราะห์พื้นผิวโดยใช้ SEM และการวิเคราะห์ทางกราฟผ่านวิธี Horowitz-Metzger (H-M) Coats-Redfren (C-R) และ Reinch-Stivala (R-S) พบว่า เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวมีความเสียดต่อพลังงานมากขึ้นเพราะมีพลังงานกระตุ้นอยู่ช่วงระหว่าง 119 kJ/mol ถึง 171 kJ/mol ขึ้นกับวิธีที่ใช้วัด สำหรับ เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพบว่ามีพลังงานอยู่ระหว่าง 98 ถึง 148 kJ/mol พบว่า เส้นใยเกิด Fibrilized กับต่างมีผลทำให้พื้นผิวขรุขระทำให้หมู่ไฮดรอกซิลมีปริมาณมาก ซึ่งทำให้ส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เคลื่อนไหวถูกจำกัดเป็นผลทำให้สายโซ่เซลลูโลสเคลื่อนไหวได้ยากพบว่าพลังงานกระตุ้นของ PP PP/HDPE PP/HDPE/Funtionalized และ Non-funtionalized EPR มีค่าอยู่ระหว่าง 180 และ 250 kJ/mol เมื่อทำการผสมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงและเส้นใยที่ไม่ได้ ปรับปรุง พบว่า ขนาดพลังงานลดลงแต่มีผลกับ Non-acetylate เล็กน้อยที่เป็นเช่นนี้เพราะเส้นใยที่ได้รับการปรับปรุงสภาพผิวกับพอลิเมอร์จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ สารตัวเติมทำให้มีเสียดสภาพ สามารถใช้เส้นใยที่ปรับปรุงสภาพผิวผสมกับ PP และ PP/HDPE และ PP/HDPE ผสม EPR เพื่อลดต้นทุนได้

ในปี ค.ศ. 1999 Funke U. [11] ได้ทำการทดลองโดยใช้แป้งชนิดต่างๆผสมกับพลาสติกไฮเซออร์และเส้นใยที่ใช้ในเชิงพาณิชย์โดยใช้เทคนิค Conventional extrusion นำไปฉีดขึ้นรูปด้วย Injection molding พบว่าสภาวะในการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันขึ้นกับ ชนิดของแป้งและสารตัวเติมที่ใช้ โดยคุณสมบัติของ Starch polymer ขึ้นกับอัตราส่วน Amylose/Amylopectin และการกระจายตัวของมวลโมเลกุล จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างแป้งที่ผ่านและไม่ผ่านขบวนการอัดรีดมีผลกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การอัดรีดทำให้เกิด Depolymerization ของ Amylopectine ขณะที่ Amylose ไม่เกิด Depolymerization การปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยการเติมเซลลูโลสลงไป เมื่อผสมเซลลูโลส 2-7% มีผลทำให้มีความทนแรงดึงและการดูดซึมน้ำดีขึ้น

2.2 สารเติมและสารเสริมแรง [12]

เมื่อวัสดุประเภทของแข็งจำนวนมากกระจายตัวได้ดีในเมตริกซ์ของพอลิเมอร์เรียกวัสดุเหล่านั้นว่าเป็นสารเติม (Fillers) และสารเสริมแรง (Reinforcements) วัสดุประเภทนี้จัดเป็นสารเติมแต่งที่นิยมใช้สำหรับพลาสติกทุกชนิดเพียงแต่ปริมาณที่ใช้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกนั้นๆ

2.2.1 คำจำกัดความ

สารเติม คืออนุภาคของแข็งที่ไม่เพิ่มความแข็งแรงทางกลให้กับเมตริกซ์พอลิเมอร์ และถ้ามีราคาต่ำจะเรียกเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender fillers) ส่วนวัสดุประเภทเส้นใย (Fibrous materials) ใช้เพิ่มความแข็งแรงทางกล โดยทั่วไปเรียกว่าสารเสริมแรง และการเสริมแรงพลาสติกนิยมเรียกว่าเป็นคอมพอสิต (Composites) โดยในระหว่างอนุภาคและเส้นใยจะมีอนุภาคหนึ่งที่รวมอนุภาคชนิดละเอียดไว้ สำหรับกระบวนการหลอมเหลวที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย (Aspect ratio) สูงเรียกว่า สารเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) หรือแร่ธาตุเสริมแรง (Mineral reinforcements) นอกจากผลที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงแล้วสารเติมและเส้นใยหลายชนิดมีส่วนช่วยทำให้สมบัติเฉพาะอื่นๆ ดีขึ้นเรียกสารเติมแต่งชนิดนี้ว่าสารเติมเฉพาะหน้าที่หรือสารเติมชนิดพิเศษ (Specialty or Functional fillers)

2.2.2 ประวัติ

ตั้งแต่ปี 1900 ผงเขม่าดำ (Carbon black) จัดเป็นสารเติมเสริมแรงในยาง นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนต ดินเหนียว อิฐทนไฟ และสารเติมอื่นๆ ใช้ในพีวีซีชนิดปรับสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) ตั้งแต่ปี 1930 และค่อยๆเข้ามาใช้ในพลาสติกอื่นๆ

ในปี 1908 เบคเคิลันด์ (Baekeland) ได้ใช้ผงไม้เสริมแรง (Fibrous wood flour) เพื่อปรับปรุงความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงกระแทก และเสถียรภาพทางขนาดของฟิโนลิก ต่อมา มีการใช้กระดาษย้อม (Impregnated paper) และเศษผ้าตัด (Chopped rags) เพื่อทำให้เกิดความทนทานต่อแรงกระแทกและการเสริมแรงสูงขึ้นโดยนำมาใช้กับยูเรียและเรซินเมลามีน ในปี 1940 ได้นำเศษผ้าแก้วชนิดถัก (Woven glass fabric) มาใช้เสริมแรงพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวเพื่อทำให้เกิดความทนทานต่อแรงกระแทกดีขึ้นแต่ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค่อนข้างสูง ต่อมาได้มีการปรับปรุงกระบวนการโดยพัฒนาเป็นการปั่นเส้นใยแบบอัตโนมัติและใช้เส้นใยแก้วตัดชนิดสั้นในสารประกอบอัดแบบโดยมวล (Bulk molding compound, BMC) และสารประกอบอัดแบบแผ่นชีท (Sheet molding compound, SMC) ต่อมาได้ใช้เป็นสารเสริมแรงกับเรซินเอพอกซ์ ในปี 1954 ไฟเบอร์ฟิล (Fiberfil) ใช้เส้นใยแก้วตัดชนิดสั้นเติมลงในพอลิสไตรีน โพลอนและเทอร์โมพลาสติกอื่นๆ ในส่วนของทฤษฎีทางด้านคอมพอลสิตได้รับการพัฒนาครั้งแรกในวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมเครื่องกล และได้้นำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้กับพลาสติกทำให้เกิดพื้นฐานความเข้าใจในเรื่องของโครงสร้างและการดำเนินการได้ดีขึ้น

2.2.3 ทฤษฎีและสมบัติทั่วไป

รูปทรงเรขาคณิตของการอัดตัว (Packing geometry) บ่งบอกปริมาณสารเติมหรือเส้นใยที่กระจายอยู่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์และผลที่จะเกิดขึ้นต่อสมบัติต่างๆ ตัวอย่างเช่น การอัดตัวแบบลูกบาศก์ในทรงกลมมีได้ถึง 52% โดยปริมาตร การอัดตัวแบบสุ่มมี 60-64% การอัดตัวแบบหกเหลี่ยมหรือศูนย์กลางหน้า (Hexagonal or Face centered) เป็น 79% การอัดตัวแบบสุ่มขนานเป็น 85% และการอัดตัวแบบหกเหลี่ยมขนานเป็น 91% สำหรับไฟเบอร์ชนิดสั้น การจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะมีการอัดตัวเป็นสัดส่วนกลับกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ของของผลระหว่างอนุภาคและเส้นใยชนิดสั้น (เช่น : BMC และ SMC) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดสัมพัทธ์และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง การคำนวณเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และยืนยันได้ด้วยการทดลอง

กระบวนการ (Processing) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีสารเติมและสารเสริมแรงจะทำได้ยากกว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวบริสุทธิ์ การทำให้สารเติมและเส้นใยเปียกด้วยพอลิเมอร์หลอมเหลวและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทำได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความมีขั้ว (Polarity) และพลังงานพื้นผิว (Surface energy) แต่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) ระหว่างผิว (Interface) โดยที่การผสมเป็นฟังก์ชันกับ ความหนืด ความเฉือน และเวลา ความหนืดของหลอมเหลวขึ้นอยู่กับปริมาณที่เพิ่ม ขนาดอนุภาค อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง อุณหภูมิ อัตราความเฉือนและเวลา การสึกกร่อนของเครื่องจักรเป็นผล

มาจากความแข็งแรงของอนุภาครวมกับความหนืดของหลอมเหลวและอาจจะลดลงได้ด้วยการใช้สารช่วยประสาน การไหลที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยระหว่างกระบวนการขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราความเขื่อน และความปั่นป่วน จัดเป็นการหาปริมาณของสมบัติที่เปลี่ยนไปตามทิศทาง (Degree of anisotropy) ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย -

แบบจำลองทางกล (Mechanical Models) นักวิศวกรรมพอลิเมอร์นำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์สมบัติคอมพอลิตในทางคณิตศาสตร์ เมื่อเส้นใยที่ขนานกันมีความยาวอยู่เต็มสารตัวอย่าง โดยที่สมบัติตามแนวแกนเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรกับพอลิเมอร์และเส้นใย เส้นใยชนิดสั้นที่ขนานกัน มีปัญหาในเรื่องของการถ่ายโอนความเค้น (Stress transfer) ระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย สนามแรงจากสารเติมและอนุภาคเส้นใยขยายไปยังเมตริกซ์พอลิเมอร์ ทั้งนี้ความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentrations) และสนามแรงขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาค เช่น เป็นทรงกลม มุมและขอบที่แหลมและปลายสุดของเส้นใยเสริมแรงความเค้น ในทางปฏิบัติส่วนมากอาจจะเอียงลาด (Oblique) หรือขวางทาง (Transverse) อยู่ในเส้นใยทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้น การเสริมแรงด้วยผ้าถัก (Woven fabric reinforcement) ทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้นระหว่างเส้นใยได้ดีพอๆ กับระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์

สารช่วยประสาน (Compatibilizer) ใช้เพื่อปรับปรุงการถ่ายโอนความเค้นข้ามผิวระหว่างพอลิเมอร์กับสารเติมหรือเส้นใย ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

ความแข็งแรง (Rigidity) จะเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยสารเติมและโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เส้นใยในทิศทางตามแนวแกน (Axial direction) เนื่องจากสารเติมและเส้นใยส่วนมากเป็นวัสดุประเภทอนินทรีย์ที่มีความแข็งแรงสูง โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ต่ออยู่กับสารเติมและเส้นใยจะสูญเสียส่วนของการเคลื่อนที่ ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดของการหมุน (Rotation) โดยใช้สนามแรงจากสารเติมและเส้นใยที่เข้าไปยังเมตริกซ์พอลิเมอร์วิเคราะห์หามอดูลัสของเมตริกซ์ที่เพิ่มขึ้น แนววิเคราะห์อื่น ๆ มีพื้นฐานจากทฤษฎีทางรีโอโลยี แบบจำลองต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดคณิตศาสตร์และการเสนอกฎที่แตกต่างกันออกไป การศึกษาด้วยการทดลองมักจะอยู่ระหว่างทฤษฎีที่แตกต่างเหล่านี้และอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีที่ใกล้เคียงที่สุดจริง

ความแข็งแรง (Strength) ทำได้ยากมากถ้าจะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีแบบจำลอง เนื่องจากคณิตศาสตร์มีความเสี่ยงมากกว่าจึงจำเป็นต้องใช้สมมติฐานแบบง่ายเพื่อให้เกิดการเบี่ยงเบนออกจากความเป็นจริงในทางปฏิบัติ จุดแรกของการคำนวณสามารถเริ่มด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์และเส้นใย การถ่ายโอนความเค้นระหว่างทั้งสองไม่ดี แต่ปรับปรุงได้โดยใช้สารช่วยประสานนักวิเคราะห์บางคนคำนวณสนามแรงจากเส้นใยที่อยู่ในพอลิเมอร์ความเข้มข้นของความเค้นถูกสมมติอยู่ที่ปลายสุดของเส้นใยตรงขอบและมุมของอนุภาคและอยู่รอบแกนของอนุภาคทรงกลมด้วยเหตุนี้จึงไม่ต้องสงสัยเลยว่าเส้นใยที่ยาวทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

การใช้เส้นใยสั้นในกระบวนการหลอมเหลวยังคงทำให้ความแข็งแรงเพิ่มแต่การปรับปรุงให้ดีขึ้นอยู่กับ พอลิเมอร์ สารช่วยประสานและอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (ภายหลังกระบวนการ) การแตกหักของความยาวเส้นใยในระหว่างกระบวนการและทิศทางการจัดเรียงตัวของกรไหล เป็นต้น อนาคตโดยทั่วไปความแข็งแรงจะลดลงขึ้นอยู่กับความเข้มของความเค้น สารช่วยประสาน และ รูปร่างทรงกลม

ความทนทานต่อแรงกระแทก จัดเป็นสภาวะที่รวมความเป็นวิสโคอิลาสติก (Viscoelasticity) และกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics) การใช้แบบจำลองและคณิตศาสตร์มาใช้จึงกลายเป็นสิ่งที่เสี่ยง ไม่ต้องสงสัยเลยว่าเส้นใยยาวจะเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกได้มาก เส้นใยสั้นอาจจะช่วยเพิ่มหรือไม่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพอลิเมอร์ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง สารช่วยประสานและอื่นๆ อีกมากมาย ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในช่วงที่สภาวะอ่อนที่สุดจนถึงการปรับปรุงได้ดีที่สุดแต่ในบางครั้งอาจเปราะบางก็ได้ อนาคตโดยทั่วไปจะลดความทนทานต่อแรงกระแทก การใช้สารช่วยประสาน และอื่นๆ อาจช่วยลดการสูญเสียและบางชนิดอาจเพิ่มแรงกระแทกได้ด้วย

ความทนทานต่อการคืบ (Creep resistance) โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารเติมโดยเฉพาะสารเสริมแรง การอธิบายในทางทฤษฎีใกล้เคียงกับ ความเป็นวิสโคอิลาสติก และมอดุลัส ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในทางปฏิบัติสิ่งนี้ทำให้พลาสติกมีลักษณะการใช้งานเข้าใกล้โลหะและเซรามิกส์แต่ยังคงต้องการการออกแบบที่สมบูรณ์

เสถียรภาพของขนาด (Dimensional stability) เป็นฟังก์ชันกับการขยายตัวทางความร้อนและหดตัวน้อยกว่าพอลิเมอร์อินทรีย์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงการเติมสารเหล่านี้ลงในพลาสติกจะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพในเรื่องขนาดของพลาสติก โดยเป็นส่วนน้อยอย่างง่าย ๆ ของปริมาตรของสารเติมและพอลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสารเติมและเส้นใยแต่ละชนิดมีผลน้อยและแตกต่างกัน ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์จะยุ่งยากมากขึ้นทำให้ผลที่ได้เป็นแบบเลขยกกำลัง (Exponential) โดยเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง จากการศึกษาของมหาวิทยาลัยโลเวล (Umass Lowell) แสดงให้เห็นว่าความสามารถของสารเติมประเภทอินทรีย์และเส้นใยจำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งอธิบายได้จากการเสริมแรงให้มีความแข็งแรงและการลดลงของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ด้วยเหตุนี้การเสริมแรงด้วยเส้นใยจึงมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับปรุงสมบัติทั้งสอง อย่างนี้ทำให้ต้องมีการปรับปรุงการออกแบบทางวิศวกรรม โดยเฉพาะเมื่อใช้โลหะและเซรามิกส์

อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน (Heat deflection temperature, HDT) ของพอลิเมอร์ อัดแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมสารเติมและสารเสริมแรง Glass transition temperature (T_g) และ HDT ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของอะตอม 5 ส่วน (5-atom segment) ในสายโซ่พอลิเมอร์โดยที่

สารเติมและเส้นใยมีผลน้อยมากต่อการเคลื่อนที่ จากการทดสอบหลายวิธีพบว่าทิศทางตามขวางกับแกนของเส้นใยให้ผลน้อยที่สุดเมื่อใช้สารเติมแต่ง ในขณะที่พลาสติกประเภทผลึกแสดงการเพิ่ม HDT เมื่อเติมสารเสริมแรงประเภทเส้นใย ซึ่งโดยปกติประมาณ 100°C อธิบายได้ว่า

- (1) เส้นใยทั้งหมดไปอยู่ในวิภาคออสตรูชันทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้นจึงมีผลทำให้ขยายได้มากขึ้น
- (2) การเติมเส้นใยทำให้เส้นกราฟระหว่างมอดุลัสบริเวณที่แข็งแกร่งกับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีผลทำให้พลาสติกที่อยู่ต่ำกว่ามอดุลัสวิกฤต (Critical modulus) ของ HDT สูงขึ้นมาเล็กน้อย

ทั้งนี้ในทางปฏิบัติขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของลูกค้าและการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมของลักษณะผลิตภัณฑ์สุดท้ายอย่างระมัดระวัง

การบวม (Swelling) ได้ในน้ำและตัวทำละลายสามารถลดลงโดยสารเติมและโดยเฉพาะเมื่อใช้เส้นใย เนื่องจากสารทั้งสองจำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและการขยายตัวโดยปริมาตรที่ต้องการทำให้มีพื้นที่สำหรับการดูดกลืนโมเลกุลของของเหลว จึงช่วยปรับปรุงในเรื่องความต้านทานต่อสารเคมี (Chemical resistance)

ค่าใช้จ่าย (Cost) ของสารเติมเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเป็นอย่างมากในเรื่องของการเลือกใช้และประโยชน์ สารเติมที่มีค่าใช้จ่ายต่ำจะลดค่าใช้จ่ายต่อหน่วยน้ำหนักของวัตถุดิบได้เด่นชัด เนื่องจากสารเติมส่วนมากมีความหนาแน่นสูงผลประโยชน์ในเรื่องค่าใช้จ่ายต่อหน่วยปริมาตรจึงน้อยกว่าและอาจทำให้เกิดผลเสียได้ ยิ่งไปกว่านั้นสารเติมต้องการขั้นตอนการผลิตพิเศษและทำให้การทำกระบวนการทำได้ยาก ทั้งสองสิ่งนี้ทำให้ค่าใช้จ่ายในตอนสุดท้ายเพิ่มขึ้น ถ้าสารเติมไปลดสมบัติต่างๆลง นักออกแบบจะต้องทำผลิตภัณฑ์ให้หนาขึ้น ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย หรือนักสารประกอบจะต้องยอมรับราคาที่ต่ำสำหรับพอลิเมอร์ที่มีสารเติม ในบางครั้งพอลิเมอร์ไม่พอเพียงการใช้สารเติมจึงช่วยลดช่องว่างนี้ลง โดยทั่วไปสารเติมควรจะมีการปรับปรุงสมบัติทางเทคนิคให้ดีขึ้นและถ้าสามารถปรับปรุงในเรื่องของเศรษฐกิจได้ก็จะเป็นโบนัสขั้นที่สอง

ทั้งนี้สารเติมและเส้นใยบางชนิดสามารถจัดเตรียมเพื่อให้เหมาะกับหน้าที่เฉพาะที่ต้องการ โดยอาจมีการใช้ปริมาณมากหรือน้อยได้ตามความเหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของพลาสติกเติมและเสริมแรง [12]

Properties	Extender fillers	Reinforcing fillers	Short fibers	Continuous fibers
Melt Processability	-/+	-/+	-	--
Modulus	+	+	++	+++
Creep Resistance	+	+	++	+++
Strength	+/-	+	+	++
Impact Strength	-	-/+	+/-	++
Lubricity	-/+	-	-	-
Abrasion Resistance	+	+	+	+
HDT	+	+	+ /+++	+ /+++
Thermal Conductivity	+	+	+	+
Coefficient Thermal Expansion	-	--	---	---
Flame Retardance	+	+	+	+
Electrical	+/-	+/-	+/-	+/-
Transparency	-	-	-	-
UV, Weather, Chemical Resistance	+/-	+/-	+/-	+/-
Cost	-/+	+	+	++

สารเติมประเภทเส้นใยสั้น (Short fibrous fillers)

การเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวทำให้มีการปรับปรุงสมบัติทางกลและเสถียรภาพของขนาดในพลาสติกเป็นอย่างมากแต่จะมีผลต่อค่าใช้จ่ายในระหว่างกระบวนการทำพลาสติกเป็นอย่างมาก จึงทำให้มีความต้องการที่จะใช้อนุภาคขนาดเล็กเพื่อทำให้เกิดการไหลของหลอมเหลวและยังคงทำให้เกิดสมบัติเสริมแรงได้ด้วย ในขณะที่นักสารประกอบจะตัดเส้นใยเสริมแรงให้มีความยาวสั้นลงเรื่อยๆ และพยายามทำให้เกิดการไหลของหลอมเหลวที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียการเสริมแรงมากเกินไป แต่บางคนก็หาอนุภาคของสารเติมที่มีอัตราส่วน ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงพอที่จะทำให้เกิดการเสริมแรงซึ่งบางครั้งเรียกว่าสารเสริมแรงประเภทแร่ธาตุ (Mineral reinforcement)

(1) ผงไม้ (Wood flour) ได้จากการควบคุมการสีก่อนของเนื้อไม้และรักษาเส้นใยเซลลูโลสในระดับไมโคร (Microscopic cellulose fibers) โดยการเตรียมการเสริมแรงแบบสามมิติต่ำสุดด้วยราคาถูกที่สุด ในปี 1908 เบคส์แลนด์นำผงไม้มาใช้ในเรซินฟีโนลิกเพื่อลดการแตก

(Cracking)และความเปราะของการอัดแบบโดยจัดเป็นสารเติมที่สำคัญในพีนอลิกชนิดเอนกประสงค์ (General purpose phenolics) มาจนถึงปัจจุบันเพื่อลดการใช้เทอร์โมเซตอื่นๆ เมื่อสีไม่มีความสำคัญ ในพอลิโอฟีน พอลิสไตรีน และไวนิลชนิดแข็งจะช่วยลดการบวมของดาวยน์ (Die swell) ในเครื่องอัดรีด และมีลักษณะของผงไม้ปรากฏอยู่ (Wood-grain) และที่ความเข้มข้นสูงสามารถทำการประกอบ (Fabrication) โดยใช้เทคนิคการทำไม้ (Wood-working) ได้

(2) โปตัสเซียมไททาเนต (Potassium titanate) บริษัท Dupont (Fybex) นำมาใช้ในไนลอน และเทอร์โมพลาสติกอื่นๆ เพื่อให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้นพร้อมกับมีมอดุลัส ความแข็งแรง และเสถียรภาพ ในเรื่องขนาดค่อนข้างสูง แต่ว่ามีความเป็นพิษจึงไม่มีการใช้อย่างต่อเนื่อง

(3) วอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) เป็นแร่ประเภทแคลเซียมซิลิเกตโดยโครงสร้างมีอัตราส่วน ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง อยู่ในช่วง 3-20 ขึ้นอยู่กับแหล่งและกระบวนการ มีการใช้มากในพลาสติกโดยเฉพาะใช้แทนแร่ใยหิน (Asbestos)

(4) ดาวโซไนท์ (Dawsonite) เป็นแร่ประเภทไฮเดรตเตตโซเดียมอะลูมิเนียมคาร์บอเนต (Hydrated sodium aluminum carbonate) มีผลึกคล้ายรูปเข็มยาว 35-50 ไมครอน และกว้าง 1 ไมครอน ใช้ได้ดีในเทอร์โมพลาสติก เป็นทั้งสารเสริมแรงและสารทำให้เปลวไฟช้าลง แต่มีความเป็นพิษจึงไม่นิยมใช้

(5) ไฟเบอร์ชนิดแฟรงคลิน (Franklin fiber) เป็นผลึกแคลเซียมซัลเฟต ราคาถูก มี Aspect ratios 2 x 60 ไมครอน เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติกชนิดต่างๆ สามารถทำกระบวนการได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือว่องไวต่อน้ำ

(6) วิสเคอร์ (Whiskers) เป็นผลึกเดี่ยวเล็กๆ ที่มี Aspect ratio มอดุลัส และความแข็งแรงสูง ซึ่งทำได้โดยอาศัยเทคนิคการสังเคราะห์ให้มีสมบัติทางวิศวกรรมเป็นอย่างดี แต่การใช้ในพลาสติกมีค่าใช้จ่ายสูง และจัดการได้ยากมาก ยกเว้น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ใช้ในทางการค้าได้

(7) ไมก้า (Mica) หรือ โปตัสเซียม อะลูมิเนียม ซิลิเกต (Potassium aluminum silicate) เกิดในลักษณะเป็นแผ่น (Flakes) ที่มี Aspect ratio สูงถึง 50/1 โดยที่ Aspect ratio ความบริสุทธิ์ และสี แปรเปลี่ยนไปตามแหล่งและกระบวนการมีประโยชน์มากขึ้นถ้ามีการบำบัดพื้นผิว (Surface treatment) ให้ดีเพราะจะทำให้กระบวนการหลอมเหลวง่ายขึ้น พร้อมกับมีการเสริมแรงทางกลเกิดขึ้น และเมื่อจัดเรียงตัวเป็นลามেলা (Lamellae) จะเกิดการวอกวน (Tortuosity) และความไม่สามารถซึมผ่านมาก (Impermeability)

(8) แร่ใยหิน (Asbestos) หรือแมกนีเซียมซิลิเกต (Magnesium silicate) เป็นเส้นใยละเอียดและสั้นมาก มอดุลัสสูง ความแข็งแรง ความเสถียรต่อความร้อนและเคมีและค่าใช้จ่ายต่ำ ในอุตสาหกรรมพลาสติกจะช่วยต้านทานต่อความเสียดทานและการขีดถู สำหรับกระบวนการที่เกิด

ได้เร็ว และใช้ในเบรคและครัชต์ และเป็นสารทำให้เกิดเปลวไฟช้าลง ด้วยเหตุผลทั้งหมด แร่ใยหิน จึงใช้กันอย่างแพร่หลายในพลาสติกเป็นเวลานานหลายสิบปี จนพบว่าในระยะยาวจะมีผลต่อสุขภาพ จึงถูกกำจัดออกไป ในทุกสาขาของงานประยุกต์ โดยที่อุตสาหกรรมพยายามหาสารอื่นๆ มาทดแทนแทน ได้แก่

- เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) : Dupont Kevlar, Nomex
- เส้นใยเซรามิกส์ (Ceramic fiber)
- แผ่นกราไฟท์ (Graphite sheets)
- เส้นใยโลหะ (Metal fiber)
- เยื่อสังเคราะห์ (Synthetic pulp) : Hercules Pulpex
- เส้นใยแก้วผสมกับดินเหนียวและเส้นใยเซลลูโลส
- เส้นใยแก้วผสมกับแร่ที่มาจากผ้าขนแกะ
- เส้นใยที่มาจากแคลเซียม ไฮเดียมเมทาฟอสเฟต

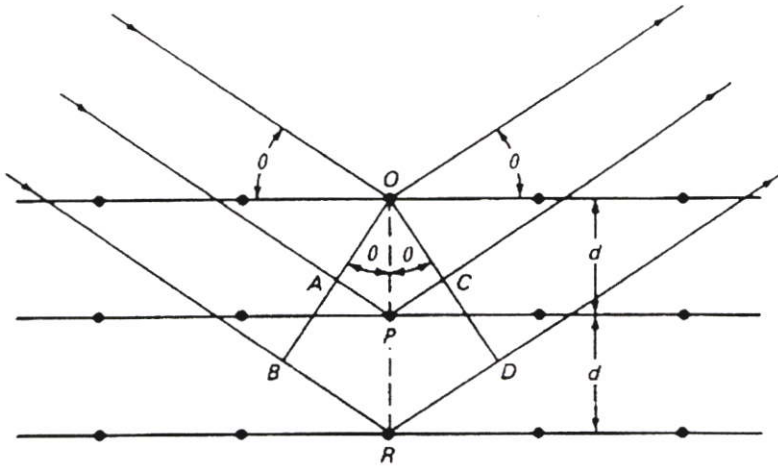
(9) แร่ที่มาจากผ้าขนแกะ (Mineral wool) จัดเป็นเส้นใยซิลิเกตปั่นมาจากซีโลหะเหลวในเครื่องทำเหล็กกล้าให้บริสุทธิ์ ราคาต่ำ ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากโครงสร้างและองค์ประกอบควบคุมได้ไม่ดี จึงไม่สามารถเปรียบเทียบได้กับเส้นใยแก้วชนิดตัด (Chopped glass fibers) แต่ในบางครั้งใช้แทนได้บางส่วน

(10) เส้นใยแก้วชนิดสั้น (Short glass fibers) ใช้เพื่อรวมความสามารถในกระบวนการหลอมกับเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยรักษาความยาวของเส้นใยดั้งเดิมไว้ พบว่าเส้นใยบดละเอียด (Milled fiber) ที่มีความยาว 1/32 ถึง 1/8 นิ้ว ให้ความสามารถในกระบวนการที่ดีที่สุด เส้นใยเกลียวชนิดตัด (Chopped strand) ยาว 1/8 ถึง 3/8 นิ้ว ต้องการกระบวนการที่ดีเพื่อความยาวของเส้นใยที่เข้าไปอยู่ในกระบวนการและชิ้นงานสำเร็จรูปจะทำให้เกิดการเสริมแรงได้มากขึ้น เส้นใยที่ยาวต้องการกระบวนการที่พิเศษ และมีขีดจำกัดการไหลของพลาสติก แต่มีผลทำให้คุณสมบัติสุดท้ายดีมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารเสริมแรงอย่างมากในพลาสติก

ในบางครั้งอาจควบคุมการเสียคุณภาพได้โดยใช้สารเติมประเภทสารที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) เช่น แป้ง (Starch) เป็นต้น เมื่อสารเติมเสียคุณภาพจะทำให้พลาสติกมีรูพรุนและมีพื้นผิวพอที่จะเร่งทำให้เกิดการเสียคุณภาพของพลาสติกได้

2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) [13]

เมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึก โดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นอะตอมผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็จะผ่านไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอมดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยผลึก

ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมเกิดการเลี้ยวเบนเป็นแบบเดียวกัน ถ้าอะตอมในผลึกอยู่กันอย่างเป็นระเบียบและห่างเท่าๆกัน การเลี้ยวเบนนี้ก็มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection) ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นกับสภาวะ 2 ประการคือ

1. รังสีที่ตกกระทบ รังสีที่เลี้ยวเบน และตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
2. ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เมื่อปี ค.ศ. 1912 W.L. Bragg ได้ใช้ลำแสงเอกซ์แคบ ให้กระทบผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ เพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบน และการกระเจิง เมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอมที่ O,P และ R ถ้า

$$AP + PC = n\lambda$$

เมื่อ n = ตัวเลขจำนวนเต็ม

รังสีที่กระเจิงจะอยู่ในเฟส (Phase) ที่ OCD ผลึกก็จะทำหน้าที่สะท้อนรังสีเอกซ์ จะเห็นว่า

$$AP = PC = d \sin \theta$$

เมื่อ d = ระยะห่างระหว่างชั้น

ดังนั้น อาจเขียนเสียใหม่ว่า เมื่อคลื่นแสงเกิดอินเทอร์เฟอเรนซ์แบบเสริม (Constructive interference) ที่มุมได้เป็น

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

สมการนี้เรียกว่า Bragg equation

รังสีเอกซ์จะเกิดการสะท้อนจากผลึกได้ ถ้ามุมตกเป็นแบบ

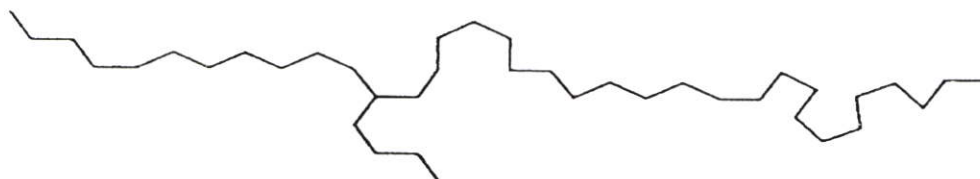
$$\sin \theta = n\lambda/2d$$

ส่วนมุมอื่นๆจะเกิดการหักล้างกัน (Destructive interference)

จาก Bragg equation เมื่อทราบความยาวคลื่นแสง (หลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้) และมุม θ ที่วัดได้สามารถคำนวณหาค่า d ได้ ค่า d ที่ได้จะบอกระยะห่างระหว่างผลึก ระบายของผลึกสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆ

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

สูตรโครงสร้างทางเคมี



พอลิเมอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างแบบเชิงเส้นจะมีสาขาโซ่บ้างแต่น้อยมาก อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1955 [14]

2.4.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้น โഴ่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูงมาก ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยกระบวนการใช้ความดันสูงทั่วไป ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมตัวประมาณ 135 °C ความเหนียว ความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดมีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุอื่นๆ เช่นภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อหุ้มของและอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) หุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่นๆ

2.5 ชานอ้อย [15]

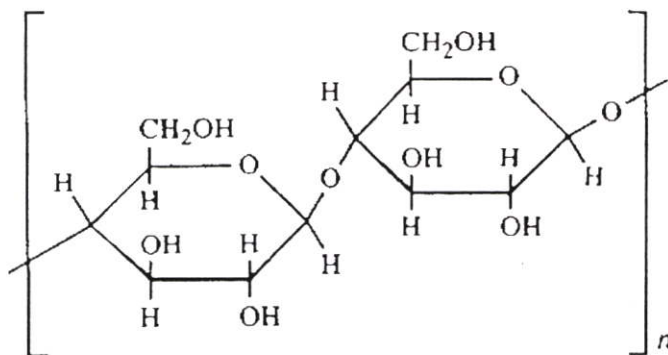
ชานอ้อยเป็นเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ เป็นส่วนที่เหลือจากการบีบน้ำอ้อยออก เป็นวัสดุเหลือใช้ หาได้ง่ายตามธรรมชาติ และราคาถูก สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติกได้ องค์ประกอบของชานอ้อยส่วนใหญ่เป็นเส้นใยประมาณ 42-43 % ความชื้น 46-52 % และส่วนอื่นซึ่งมีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลส่วนใหญ่ 2-8 % องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อยประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ องค์ประกอบทั้งหมดนี้เรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส เซลลูโลสเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติประเภทไฮโมพอลิเมอร์ ของ D-glucose พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสเป็นประเภท D-silane และลิกนินซึ่งเป็นประเภทฟีนอลิกธรรมชาติ

ตารางที่ 2.2 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีของชานอ้อย

ส่วนประกอบ	ชานอ้อยทั้งหมด		เส้นใย	แกนกลาง
	(a)	(b)		
เซลลูโลส	40.00	46.00	56.60	55.40
กัม (Gums:araban , galactan ,xylan)	24.40	24.50	26.11	29.30
โปรตีน	1.80			
ซูโคส	14.00			
กลูโคส	1.40			
กรด	0.40			
ไขมันและแว็กซ์	0.60	3.45	2.25	3.55
เถ้า	2.40	2.40	1.30	3.02
ลิกนิน	15.00	19.95	19.15	22.30
ซิลิกา		2.00	0.46	2.42

2.5.1 เซลลูโลส [15,16,17]

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้น ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลต่างๆ ไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืชโดยจะพบร่วมกับ ลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาวและแข็ง โดยเซลลูโลสในชานอ้อยจะมีสายโซ่พอลิเมอร์ประมาณ 2,000-3,000 หน่วย โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

สมบัติของเซลลูโลส

1. การดูดซับความชื้น

เซลลูโลสจะมีการดูดหรือคายน้ำและของเหลวอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบ ๆ จนกระทั่งถึงสมดุล ซึ่งสมดุลของปริมาณความชื้นของเซลลูโลสจะเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศรอบ ๆ นั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติบางประการ เช่น ความทนแรงดึง ของเส้นใย

2. การละลายและความหนืด

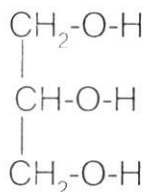
เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำ แต่จะละลายในกรดแร่เข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริกเข้มข้น ร้อยละ 72 กรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 40 และกรดฟอสฟอริก ร้อยละ 85 เป็นต้น เซลลูโลสจะเกิดไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดที่อุณหภูมิต่ำ สารละลายของเกลือบางชนิดที่เข้มข้น เช่น สังกะสีคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 72 จะทำให้เซลลูโลสบวมตัวและบางที่จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้ ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเซลลูโลสและอนุพันธ์ โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

3. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเซลลูโลสที่มีเส้นใยเดี่ยวจะมีค่าไม่แน่นอน ค่าเฉลี่ยของเส้นใยเซลลูโลสจะแปรตามแหล่งที่มา และอาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

2.6 คุณสมบัติของกลีเซอรอล [18]

สูตรโครงสร้าง



กลีเซอรอลมีสมบัติคือ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เป็นแอลกอฮอล์ที่มีรสหวาน สูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ความถ่วงจำเพาะ 1.26 มีจุดเดือดที่ 290°C (554°F) และมีจุดหลอมเหลวที่ 64.4°F กลีเซอรอลเหลวต้านการแข็งตัว เป็นผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ละลายในน้ำได้บางส่วน ละลายในแอลกอฮอล์ได้ดี ไม่ละลายในอีเธอร์และสารอินทรีย์อื่นๆ กลีเซอรอลมีลักษณะพิเศษคือสามารถเกิดเป็นสารประกอบ ทำให้มวลโมเลกุลสูงขึ้น เช่น กลีเซอรินจะหมายถึงกลีเซอริน (กลีเซอรอลละลายในสารละลายอื่น) หรือสารละลายที่เตรียมได้จากกลีเซอรอล ไขมันและน้ำมันเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอล

กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมสบู่ โดยใช้ไขมันและน้ำมันทำปฏิกิริยากับด่างได้เป็นสบู่ กลีเซอรอลทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่น การผลิตกลีเซอรอลในอเมริกา 40% มาจากการทำสบู่ ส่วนที่เหลือได้จากสังเคราะห์ Allyl alcohol $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ หรือ พรอพิลีน C_3H_6 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี หรือ ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนกับน้ำตาลที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กลีเซอรอลส่วนมากใช้ในการผลิตเป็น อัลคิลเรซิน การประยุกต์ใช้งานที่สำคัญได้แก่ อุปกรณ์การเตรียมยา อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องน้ำ องค์ประกอบของยาสีฟัน ใช้เป็นพลาสติกไซเบอร์ของกระดาษเซลโลเฟน ใช้เป็นสารเพิ่มความชื้นในผลิตภัณฑ์ยาสูบ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงนิยมใช้อย่างกว้างขวาง

2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง [19]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตหลักที่เก็บอยู่ในพืชทุกชนิดที่มีคลอโรฟิลล์มีสมบัติหลากหลายเช่น การดูดซับน้ำ เป็นเจล และสมบัติทำฟิล์มแบบเป่า มีต้นทุนต่ำ สมบัติของแป้งสามารถปรับปรุงได้โดยทางเคมี ฟิสิกส์และเอนไซม์ ความสามารถในการปรับปรุงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์แป้งชนิดใหม่ ๆ แป้งคือพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยของ Anhydroglucose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) ผลิตโดยขบวนการใช้แสง (Photosynthesis) ในพืชสีเขียวใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

ทำปฏิกิริยากันเป็นกลูโคสและเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันโดยเอนไซม์ การต่อกันระหว่างหน่วยกลูโคสใน ขบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันมีการขับน้ำออกมาจากปฏิกิริยาการควบแน่น

ในพืชพบแป้งในชั้น Stratified โดยเกิดรอบนิวเคลียสเรียกว่า Hilum ชั้นนี้พัฒนาเป็น เม็ดแป้งมีขนาดและรูปร่างเฉพาะในพืชแต่ละชนิด มีรูปร่างทรงกลมจนถึงแบนมีรู แผ่นยาว polygon และรูปร่างอื่น เม็ดแป้งเกิดจากการรวมกันเป็นก้อนกลมของกลูโคสพอลิเมอร์ มีความ สมมาตรทางโครงสร้าง ถ้าเม็ดแป้งแขวนลอยในสารละลายใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Polarized light ตรวจได้

หลังจากแยกแป้งออกจากพืช แป้งที่แห้งจะนุ่ม มีสีขาว ไม่ละลายในน้ำเย็น แอลกอฮอล์ อีเทอร์และตัวทำละลายอินทรีย์เก็บรักษาได้เป็นระยะเวลาในในที่แห้ง ถ้าแขวนลอย ในน้ำโดยปั่นกววนเบา ๆ และให้ความร้อน เม็ดแป้งเริ่มดูดน้ำ เมื่อมีน้ำเป็นส่วนประกอบจะทำให้มี ขนาดใหญ่ขึ้นจนสุดท้ายจะสูญเสียโครงสร้างที่แข็งแรง ขณะให้ความร้อนความหนืดจะเพิ่มขึ้น ใส และกลายเป็นแป้งเปียก ขบวนการนี้เรียกว่า Gelatinization

สมบัติของเม็ดแป้งขึ้นกับการจัดเรียงตัวของหน่วย Anhydroglucose ที่เป็นโมเลกุลแป้ง ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพดมีส่วน Amylose ที่เป็น Linear polymer 27% แป้งมันฝรั่ง 20% และ แป้งมันสำปะหลัง 17% แป้งที่มีโมเลกุลสายโซ่ตรงสูงจะใช้ในทางการค้า ชนิดของแป้งจะมีผลกับ การเกิดเจล และคุณลักษณะของสารละลาย แป้งที่มี Amylose สูงไม่เกิดเจลในน้ำเดือด บางครั้ง ต้องให้ความดันหรือใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง

สมบัติเฉพาะของเม็ดแป้งแห้งทำได้โดยขบวนการเคมี การปรับปรุงพื้นผิวให้แป้งไม่ชอบ น้ำจะเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งและโอเลฟิน พอลิเมอร์เป็นทางเลือกที่ถูกต้อง ในการเลือกปรับปรุงพื้นผิวโดยต้องมีการสร้างพันธะระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์ เทคนิคนี้ใช้ในการ พัฒนาการเสถียรภาพของเม็ดแป้งในระบบพอลิเมอร์ได้

การพัฒนาใช้เม็ดแป้งเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์

ในปี ค.ศ.1970 Griffin ได้ใช้เม็ดแป้งเป็นตัวเติมในพอลิโอสตีรีนแล้วทำเป็นฟิล์มบางใช้เป็นถุงใส่ของ พบว่าพอลิเอทิลีนที่ฝังกลบเกิดการเสถียรภาพนอกจากนี้แล้วไขมันสามารถระเหยเป็นไอ และเกิดออกซิเดชันของพอลิเมอร์ ผลที่เกิดขึ้น ทำให้ Griffin นำเม็ดแป้งและน้ำมันพืชมาช่วยให้พอลิเมอร์เสถียรภาพ เมื่อเติมแป้งในฟิล์มมีผลทำให้เสถียรภาพของผลิตภัณฑ์จึงทำการปรับปรุงพื้นผิวแป้งด้วยไซเลนซึ่งจะทำให้แป้งไม่ชอบน้ำเมื่อนำไปประเหยจะมี ความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับแป้งปกติ ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้เป็นตัวเติมช่วยให้การเสถียรภาพของ พอลิเมอร์ง่ายและทำให้มีสมบัติทางกายภาพที่ดี แป้งยังเป็นตัวเติมที่มีต้นทุนต่ำ ระบบนี้ใช้ในการค้าและเป็นที่ยอมรับทางเครื่องหมายการค้า คือ Ecostar[®] ต่อมามีการพัฒนาโดยใช้พอลิเมอร์ที่

ไม่อิมิตัวความไม่อิมิตัวของพอลิเมอร์มีความจำเป็นสำหรับการเสียสภาพซึ่งคล้ายกับการใช้น้ำมันพืชในระบบก่อนหน้าและระบบนี้ใช้ในทางการค้าโดยรู้จักชื่อทางการค้าคือ Polygrade[®] ในขบวนการผลิตค้ำึงถึงระบบการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งความคล้ายคลึงกันอย่างมาก แป้งที่มีการปรับปรุงให้มีความชื้นต่ำและไม่ได้ปรับปรุงสามารถใส่สารตัวเติมโดยใช้ Twin-screw extruder พอลิเมอร์ที่นำมาผสมเช่น LDPE, PP หรือ พอลิเอสเตอร์เมื่อผสมแล้วเรียกว่า Master batch ซึ่งหมายถึงของแข็งพลาสติกที่ใช้ในขบวนการผลิต ได้จากการนำเรซินพื้นฐานมาผสมสารเติมแต่งใส่แป้งในผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 5-10% สำหรับการเป่าขึ้นรูปและฉีดขึ้นรูปและสามารถใส่แป้งในผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด 20%

ในขบวนการผลิตใช้เครื่องอัดรีด (Conventional extruder) และอุณหภูมิไม่เกิน 230 °C ถ้าสูงกว่าอุณหภูมินี้จะทำให้เกิดการเสียสภาพของแป้งถ้า Master batch ถูกอากาศนาน แป้งที่แห้งจะดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็วและความชื้นนี้จะระเหยออกมาขณะทำการผลิตทำให้เกิดรูพรุนในผลิตภัณฑ์สุดท้าย

กลไกการเสียสภาพ

ระบบการเสียสภาพของเม็ดแป้งในขบวนการผลิตมีกลไกปฏิกิริยา 2 ชนิด รูปที่ 2.3 คือ เม็ดแป้งที่ผสมกับพอลิเมอร์



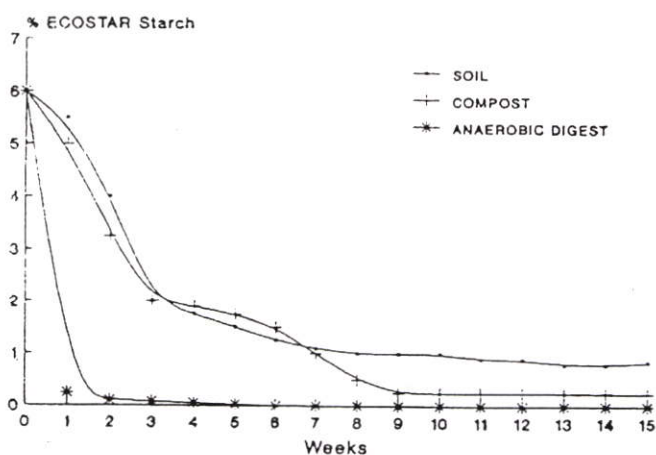
รูปที่ 2.3 ฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีแป้ง 15 % ก่อนอยู่ในเชื้อรา

เม็ดแป้งเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์เช่นเชื้อราและแบคทีเรีย โดยกลไกปฏิกิริยาแรก จุลินทรีย์ย่อยสลายเม็ดแป้งในพอลิเมอร์จนหมดมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและเพิ่มพื้นผิวให้กับพลาสติก



รูปที่ 2.4 แสดงฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีแป้ง 15 %หลังจากอยู่ในเชื้อรา 6 เดือน

หลุมที่เกิดปรากฏให้เห็นจะขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งที่มีอยู่ในเมตริกซ์หลุมนี้จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวหน้าของพอลิเมอร์ หลังจากแป้งหมดไปจะทำให้พอลิเมอร์มีความชอบน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ง่ายต่อการเปียกส่งผลให้มีการขนส่ง O_2 เพิ่มขึ้น จุลินทรีย์ย่อยแป้งและทำลายคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์โดยจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์และขับออกมานอกเซลล์ เอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์โดยตรงทำให้เกิดการแตกร้าว (Cracking) ของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.4 อัตราการสลายแป้งจากพอลิเมอร์จะขึ้นกับธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมและระยะเวลาที่ตัวอย่างได้รับดังรูปที่ 2.5

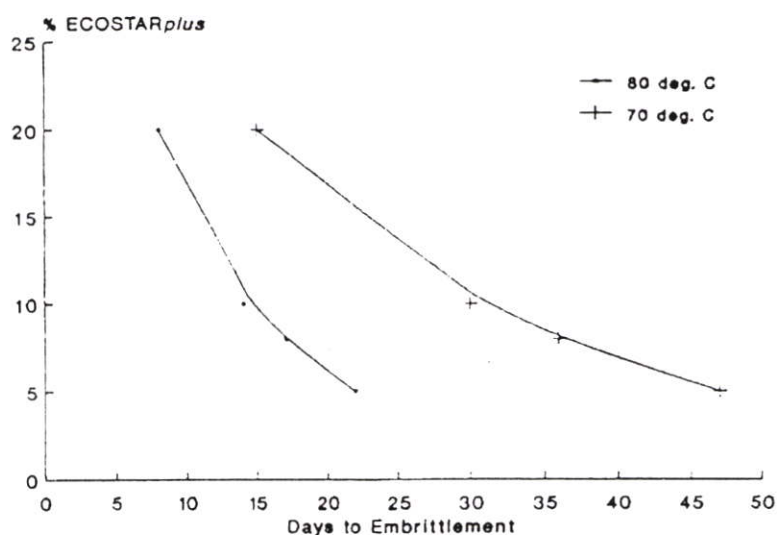


รูปที่ 2.5 การย่อยสลายเม็ดแป้งของพอลิเอทิลีนในสิ่งแวดล้อมต่างๆ [20]

กลไกปฏิกิริยาที่สองคือเกิดการเสียสภาพโดยพอลิเมอร์เกิดออกซิเดชัน ในผลิตภัณฑ์ที่อธิบายข้างต้นเราใช้ตัวอย่างที่ไม่อิมิตัวได้แก่น้ำมันพืชต่อมาได้พัฒนาโดยใช้พอลิเมอร์ไม่อิมิตัวสารไม่อิมิตัวทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ของเกลือโลหะทรานซิชัน (Transition metal salt) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ และเพอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ (Chain scission) ปฏิกิริยาที่สองเกิดได้ดี เมื่อมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากกลไกปฏิกิริยาแรก

เกลือโลหะทรานซิชัน (Transition metal salt) จะมีอยู่ในสิ่งแวดล้อมและอาจพบในตัวพอลิเมอร์เอง ต่อมา Chiquet ได้ใช้โลหะทรานซิชัน (Transition metal) เป็นตัวเติมในสูตรการผลิตสารประกอบออร์กาโนเมทัลลิก (Organometallic) จะเกิดออกซิเดชันโดยแสงทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียสภาพ ขบวนการของ Chiquet โดยใช้ชื่อทางการค้าคือ Ecostarplus®

ผลการเสียสภาพที่เกิดจากออกซิเดชันสังเกตได้โดยการทดสอบทางกายภาพและทางเคมี การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 2.6

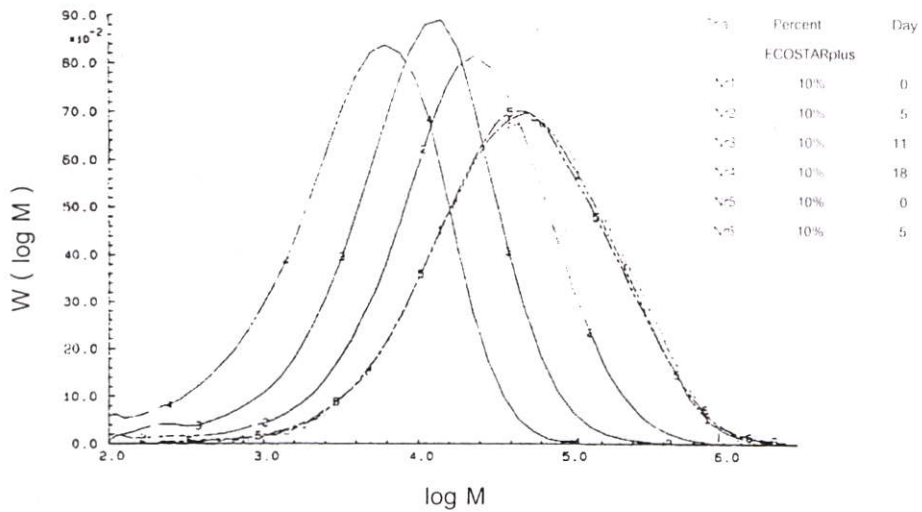


รูปที่ 2.6 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเสียสภาพโดยออกซิเดชัน ของฟิล์มบางที่มีระดับความต่างของสารตัวเติมในการเสียสภาพของ Master batch [20]

สิ่งที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับสมการอาร์เรเนียสอุณหภูมิที่ใช้ทดลองอยู่ช่วงระหว่าง 70-90 °C อุณหภูมิมีความเหมาะสมกับการผุพังในธรรมชาติได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 50-70 °C การขาดของสายโซ่พอลิเมอร์เนื่องจากออกซิเดชันจะลดความยาวสายโซ่ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงถึงระดับที่จุลินทรีย์ย่อยได้ โดยทั่วไปต้องมีน้ำหนักต่ำกว่า 1000 จนถึง 450 ถ้าขบวนการสุดท้ายเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างเดียว ผลิตภัณฑ์ที่คาดว่าจะได้คือ

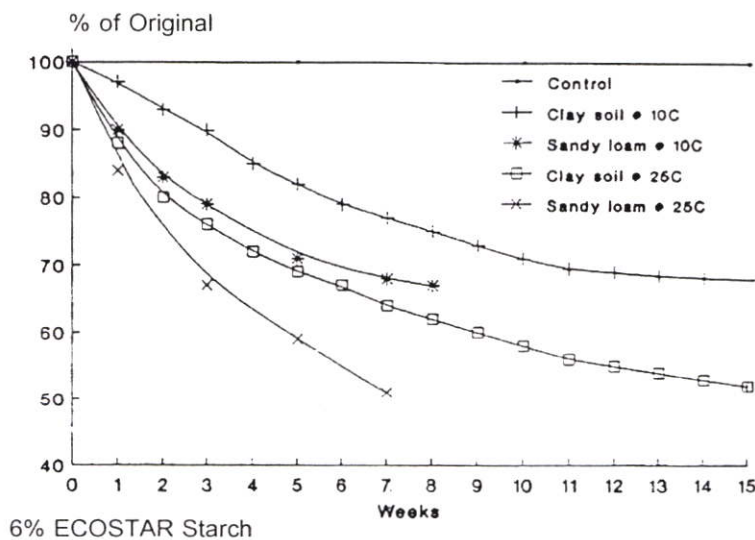
คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ระยะเวลาที่พอลิเมอร์มีน้ำหนักลดลงถึงระดับที่กล่าวข้างต้นและระยะเวลาที่แน่ชัดของการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม ยังไม่แน่ชัด

การวัดการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนที่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีการควบคุมแสดงในรูปที่ 2.7

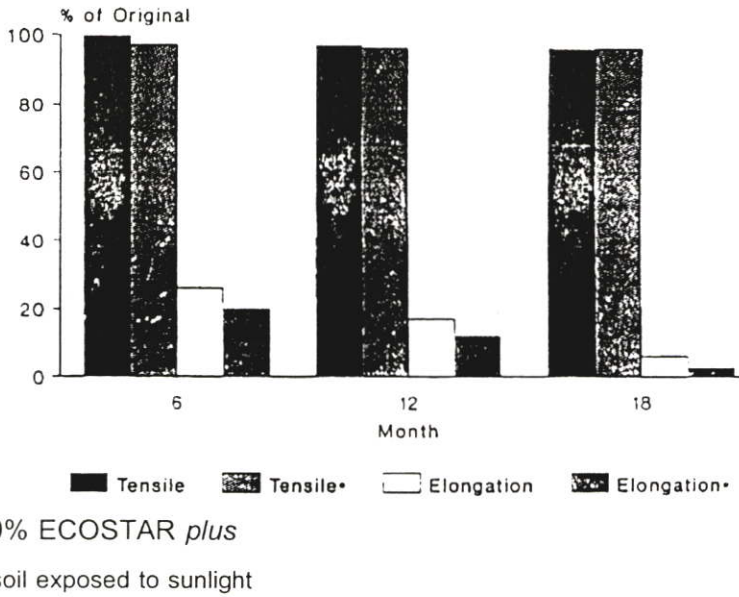


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลกับเวลา [20]

การทดสอบแบบฝังกลบจะทำให้เกิดกลไกการเสียหายทางชีวภาพและเสียหายโดยออกซิเดชัน โดยทั่วไปการเสียแบ่งจะไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพเสียมาก

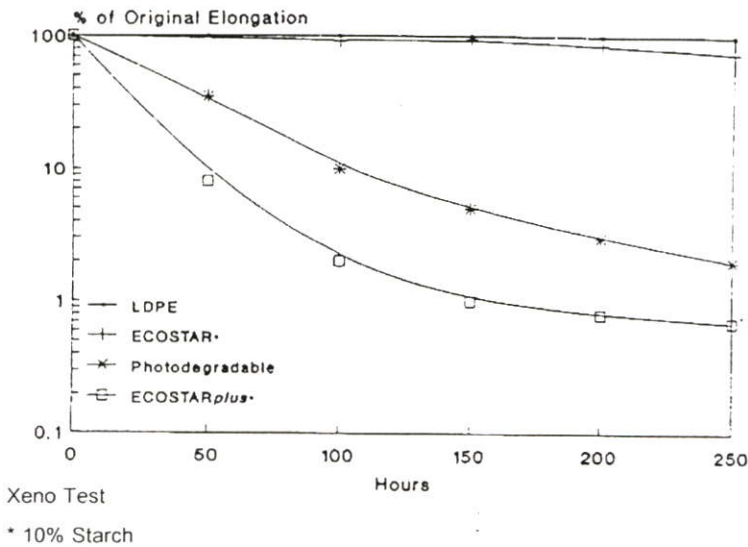


รูปที่ 2.8 การเสียหายทางแรงดึงของฟิล์มที่มีแป้ง 6 % ในสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ [20]



รูปที่ 2.9 ผลของการฝังกลบที่มีผลต่อความทนแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด [20]

จากรูปที่ 2.9 แสดงผลของการวัดร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดหรือความเหนียวภายใต้ความเค้น/ความเครียด ที่ทำให้เกิดการเสถียรภาพพอลิเมอร์ที่ทนต่อแรงดึงจะไม่เปลี่ยนรูปจนกระทั่งมีการเสถียรภาพตามความยาวจะพบว่ามีค่าแตกต่างระหว่างการฝังกลบกับการตากแดดเล็กน้อย การเสถียรภาพทางแสงเป็นระบบหนึ่งในรูปที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบระบบเดิมและระบบการเสถียรภาพทางแสง ปฏิกริยาการเสถียรภาพทางแสงมีลักษณะเหมือนกลไก Norrish type 1 และกลไกปฏิกริยา Norrish type 1 จะเกี่ยวเนื่องกับระบบออร์กาโนเมทัลลิก (Organometallic)



รูปที่ 2.10 ผลของการฉายแสงที่มีผลร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดในการเสถียรภาพของสูตรต่างๆ [20]

ผลของการเสียสภาพโดยแสงของถุงที่ทำจาก Ecostarplus® หลังจาก 1 เดือนและฝังในสิ่งแวดล้อม 30 วันแสดงในรูปที่ 2.11

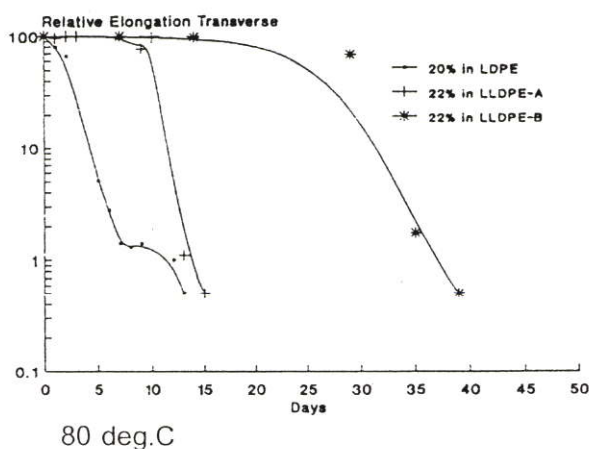


รูปที่ 2.11 การเสียสภาพโดยแสงหลังจากการฝังกลบ 30 วัน [20]

ปัจจัยที่มีผลกับการเสียสภาพ

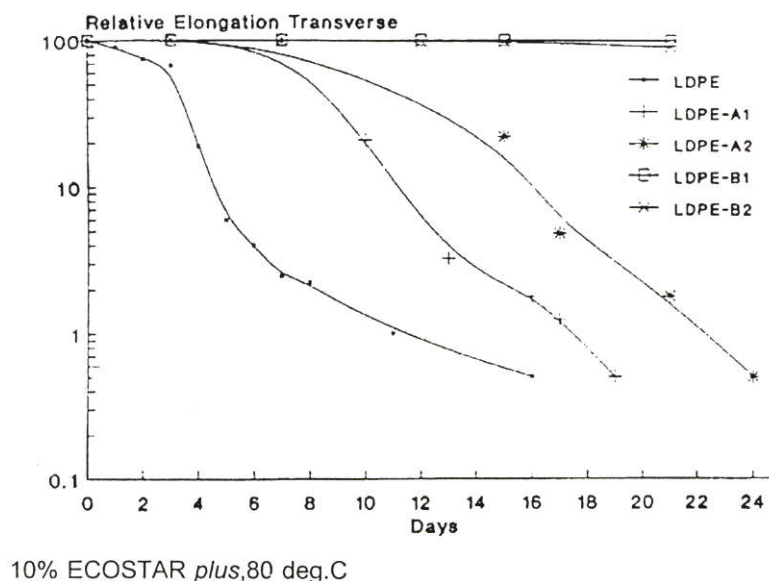
สิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยที่มีผลกับการเสียสภาพซึ่งอธิบายได้จากรูปที่ 2.4 ถึง 2.10 เช่น อุณหภูมิ และ ความสามารถที่จุลินทรีย์ย่อยสลาย ความชื้น pH พื้นที่ผิว ความหนาของวัสดุ

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเสียสภาพคือชนิดของพอลิเมอร์และชนิดของ Antioxidant ที่มีในระบบพอลิเมอร์ซึ่งตามรายงานพบว่าพอลิเมอร์สายโซ่ตรง จุลินทรีย์จะสามารถทำการย่อยสลายได้ดีกว่าที่มีกิ่งก้านสาขา และย่อยส่วนที่เป็นออสันฐานมากกว่าส่วนที่เป็นผลึก การเลือกพอลิเมอร์จึงมีความสัมพันธ์กับกลไกการเสียสภาพโดยการออกซิเดชัน



รูปที่ 2.12 แสดงการเสียสภาพโดยการออกซิเดชันของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [20]

จากรูปที่ 2.12 แสดงอัตราการเสื่อมสภาพต่างกันโดยเติมสารตัวเติมปริมาณใกล้เคียงกัน ในพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ LDPE ไม่เติม Antioxidant LLDPE ที่เติม Antioxidant ชนิด A และ LLDPE ที่เติม Antioxidant ชนิด B กราฟแสดงระยะเวลาการให้ความร้อนพอลิเมอร์ที่มี Antioxidant ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นความสำคัญการเลือกใช้พอลิเมอร์เมื่อต้องการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีการเสื่อมสภาพตามระยะเวลาที่ต้องการ



รูปที่ 2.13 แสดงผลของออกซิแดนซ์ที่มีต่ออัตราการเสื่อมสภาพโดยการออกซิเดชัน [20]

จากรูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสภาพของ LDPE และ LDPE ที่มี ชนิดของ Antioxidant แตกต่างกันในพอลิเมอร์ ความแตกต่างของ Antioxidant (ตีฉลาก A-1, A-2 และ B-1, B-2) มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง

1. เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) รหัส POLENE GG3245

บริษัท Thai Petrochemical Industry Co.,Ltd

คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ใช้

ความหนาแน่น	0.946 g/cm ³
อัตราการไหล (MFI 2.16 kg/190°C)	0.10 g/10 min
ความทนแรงดึงยืด	37 MPa
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	1600 (%)
อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต	200-220°C

2. ชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล

3. กลีเซอรอล บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd.

คุณสมบัติของกลีเซอรอล

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

4. แป้งมันตราปลามังกร บริษัทห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคลตั้งจัน

คุณสมบัติของแป้ง [20]

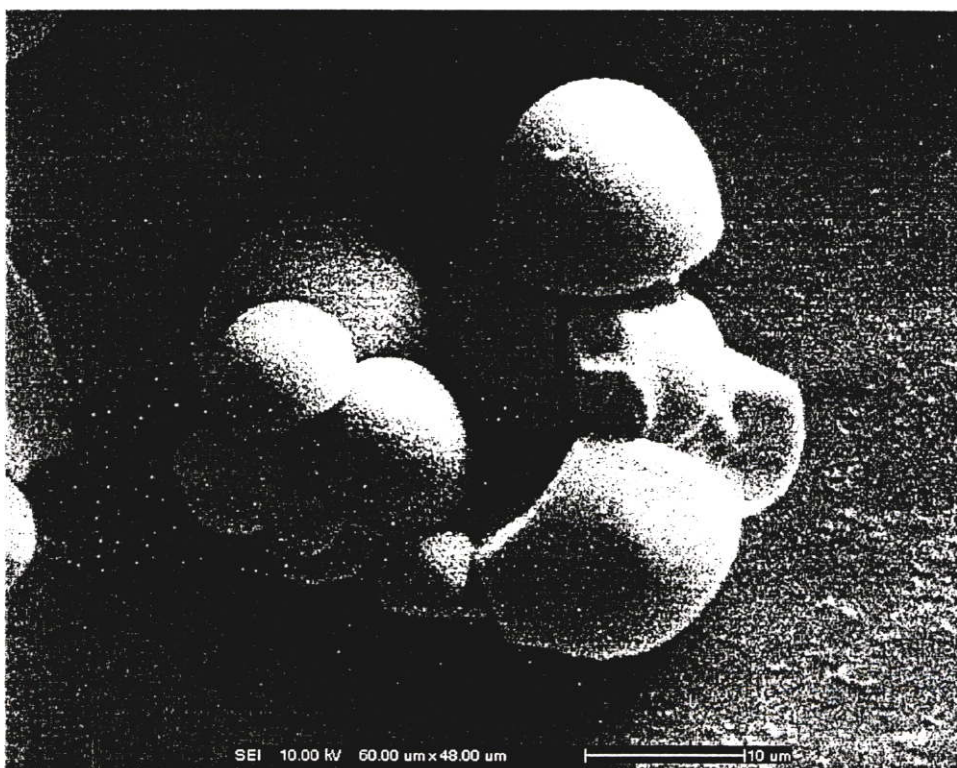
ความชื้น 11.2%

pH 5.48

ขนาดของเม็ดแป้ง 5-35 μm

เป็นแป้งคุณภาพชั้น 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังตาม มอก.247-2521[20]

รูปร่างเม็ดแป้งแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปร่างแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) บริษัท Labtech Engineering Co.,Ltd.
2. เครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น LR 30Kบริษัท LLOYD Instrument
3. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) รุ่น Pyris I บริษัท Perkin-Elmer
4. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) บริษัท Bruker
5. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) บริษัท Bosco Engineering
6. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท Labtech Engineering Co.,Ltd.
7. ตู้อบแสงอัลตราไวโอเล็ต บริษัท Labtech Engineering Co.,Ltd
8. เครื่องอัดแบบขึ้นรูปพลาสติก (Compression molding machine) บริษัท Lab Tech Engineering Company LTD.
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope ;SEM) รุ่น Mx 2500 s บริษัท Camscan Maxim
10. เครื่อง x-ray diffractometer บริษัท Bruker
11. ตู้อบ
12. เครื่องชั่งแบบดิจิทัล:รุ่น HR-200 บริษัท Denver Instrument
13. pH Meter รุ่น 215 บริษัท Denver Instrument
14. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 50-100 mesh

3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

3.3.1 เตรียมวัตถุดิบตั้งต้นและผสม

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแป้ง

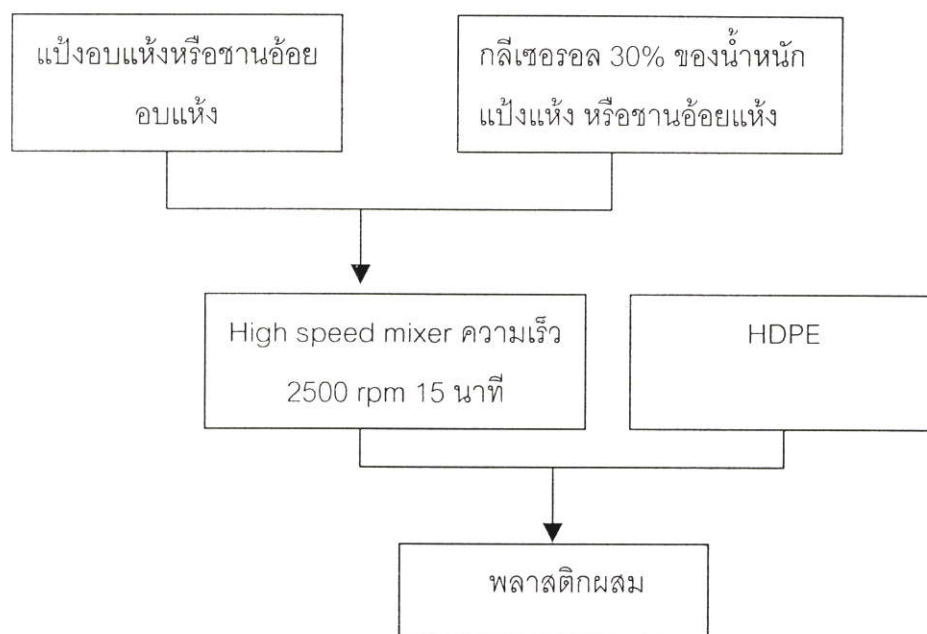
นำแป้งมาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมขานอ้อย

นำขานอ้อยที่ได้มาบดล้างคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 50-100 เมช นำขานอ้อยล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C

ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำกลีเซอรอลอุณหภูมิ 100 °C ผสมแป้งหรือขานอ้อยใน High speed mixer ความเร็ว 2500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้กลีเซอรอล 30%ของน้ำหนักแป้งแห้งหรือขานอ้อย ซึ่งแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการผสม

3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน

นำของผสมจากขั้นตอนที่ 3.3.1 มาผสมในอัตราส่วนต่างๆดังตาราง 3.1 โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 150-160 °C แล้วนำพลาสติกที่ได้จากเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ไปบดด้วยเครื่องตัดบด นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากขั้นตอนนี้ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างเป็น 2 แบบ คือ แบบฟิล์มบางเพื่อใช้วิเคราะห์ FTIR และขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูป Dumbbell เพื่อใช้ทดสอบความทนแรงดึง

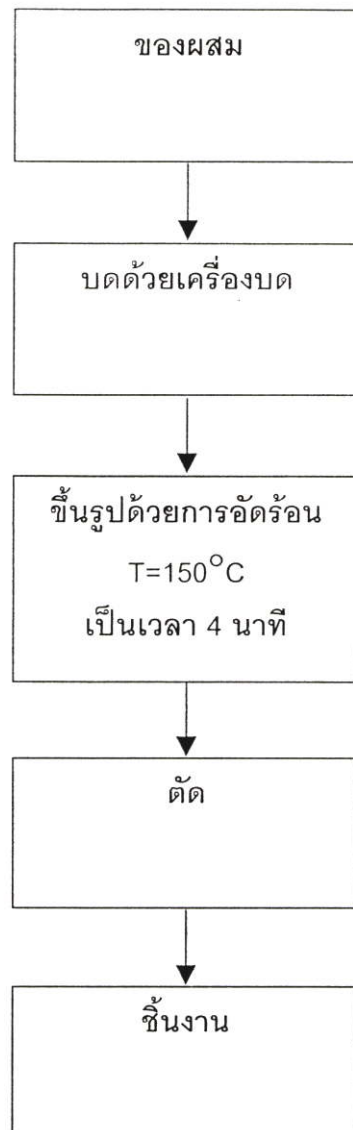
ขึ้นรูปฟิล์มบาง ชั่งเม็ดพลาสติกหนัก 40 กรัมใช้แผ่นเหล็กประกบสองด้านโดยไม่ใช้แม่แบบทำการอัดร้อนด้วยเครื่องอัดความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 3 นาทีจากนั้นนำไปอัดเย็น 3 นาที นำออกจากแบบ และตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม

ขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนแรงดึง นำเม็ดพลาสติกมาใส่แม่แบบสี่เหลี่ยมหนา 1 มิลลิเมตรโดยมีแผ่นเหล็กประกบทั้งสองด้าน ทำการอัดความร้อนด้วยเครื่องอัดความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 4 นาที นำไปอัดเย็นเป็นเวลา 4 นาที นำออกจากแบบ และตัดเป็นรูป Dumbbell

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสม

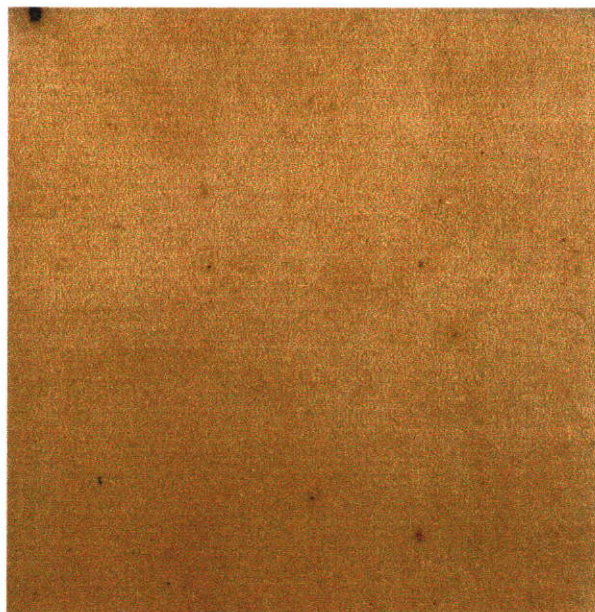
สูตรที่	HDPE	แป้ง + กลีเซอรอล 30%	เซลลูโลส + กลีเซอรอล 30%	แป้ง+ เซลลูโลส กลีเซอรอล 30%	แป้ง	เซลลูโลส
1	100	-	-	-	-	-
2	90	10	-	-	-	-
3	80	20	-	-	-	-
4	70	30	-	-	-	-
5	90	-	10	-	-	-
6	80	-	20	-	-	-
7	70	-	30	-	-	-
8	70	-	-	30	-	-
9	70	-	-	-	30	-
10	70	-	-	-	-	30

แผนผังขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

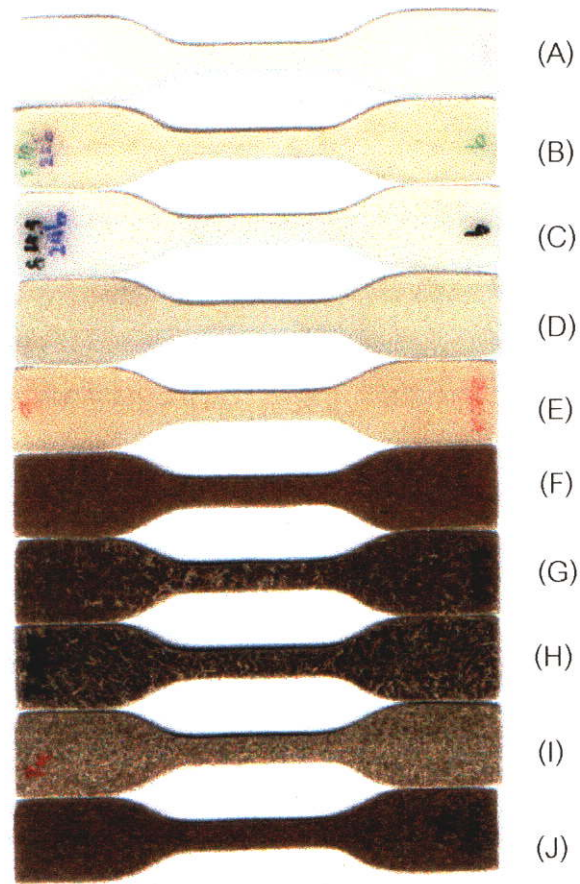
ชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.4-3.6



รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการอัดร้อนของ HDPE+แก้ว30%



รูปที่ 3.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการอัดร้อนของ HDPE+เส้นใย10%+กลีเซอรอล30%



รูปที่ 3.6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัดเป็นรูป Dumbbell ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

- (A) HDPE
- (B) HDPE+ แป้ง30%
- (C) HDPE+แป้ง10%+กลีเซอรอล30%
- (D) HDPE+แป้ง20%+กลีเซอรอล30%
- (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30%
- (F) HDPE+เส้นใย10%+กลีเซอรอล30%
- (G) HDPE+เส้นใย20%+กลีเซอรอล30%
- (H) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%
- (I) HDPE+เส้นใย 30%
- (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%

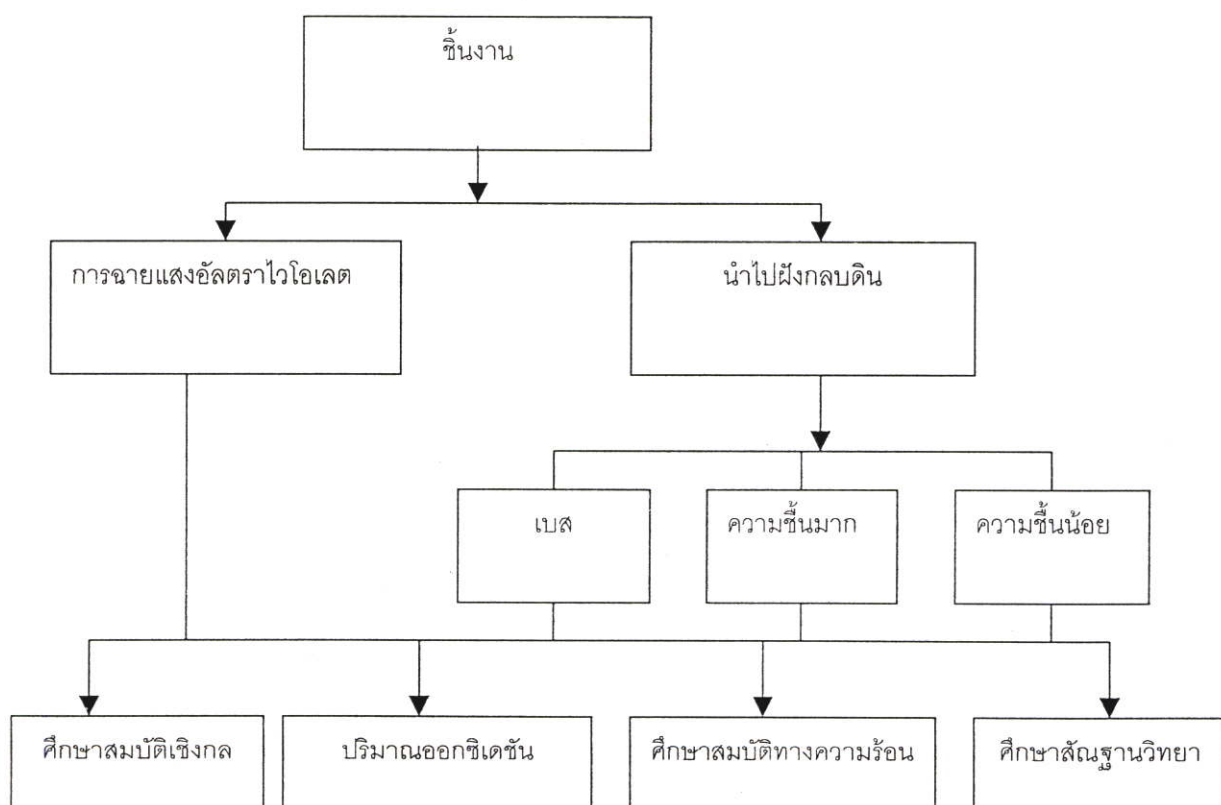
3.3.3 การทดลอง

นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็น Dumbbell เรียบร้อยแล้ว ใส่ในตู้ UV เป็นระยะเวลา 1,2,3 และ 4 เดือน นำไปทดสอบ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณออกซิเดชัน และสัณฐานวิทยา

แบ่งชิ้นงานไปทดสอบการเสียดสีสภาพในดินสภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมาก และ เบส เป็นระยะเวลา 1,2,3 และ 4 เดือน เก็บชิ้นงานนำไปล้างแล้วอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นระยะเวลา 24 ชม.นำมาทดสอบ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณออกซิเดชัน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

การทดลองในสภาวะเบส เตรียมดินให้มี pH เป็น 8.5 มีความชื้น 10.15%-15.14% โดยใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และ ใช้น้ำปรับสภาพดินให้มีความชื้น 9.94%-15.10% ในสภาวะความชื้นน้อย และ 30.53%-35.42% ในสภาวะความชื้นมาก ตามลำดับ

นำดินใส่ตะกร้าให้มีความสูง 2.5 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานที่เป็น Dumbbell และฟิล์ม ใส่ในตะกร้า จากนั้นนำดินสภาวะที่กำหนดมากลบให้ทั่ว มีความสูงจากชิ้นงานขึ้นไป 14.5 เซนติเมตร ทำเช่นเดียวกันทุกสภาวะแสดงขั้นตอนการทดลองได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

3.4 การทดสอบสมบัติคอมพอสิต

3.4.1 การทดสอบเชิงกล

ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้น สภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

load cell 30 kN

test speed 50 mm/min

gauge length 2.5 cm

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ซึ่งถ้วยใส่สารตัวอย่าง แล้วใส่ตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม โดยทราบปริมาณแน่นอน นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ใช้อัตราความร้อน 10°C ต่อนาทีและอัตราการให้ความเย็น 10°C ต่อ นาที ศึกษาอุณหภูมิตกผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และพื้นที่ใต้กราฟ คำนวณหา Heat of crystallization (ΔH_c) และ Heat of fusion (ΔH_m) ต่อน้ำหนักสารตัวอย่างดังนี้

$$\Delta H = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น.นของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

3.4.3 การหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน

นำตัวอย่างที่ได้จากการฉายแสง UV และการฝังกลบที่เป็นแผ่นบางมาทำการตรวจวิเคราะห์โดยเครื่อง FTIR spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ โดยเปรียบเทียบความเข้มของหมู่คาร์บอนิลที่เลขคลื่น $1640-1780\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขที่คลื่น $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ ทั้งก่อนและหลังการฉายแสงและทำการคำนวณดัชนีคาร์บอนิล (ΔCI) จากสูตร

$$C.I. = [\log [100/\%T]/d]$$

เมื่อ %T = % transmittance

d = ความหนาชิ้นงาน (μm)

3.4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

1. ใช้ SEM ดูการกระจายตัวของแป้งและลิกโนเซลลูโลส
2. ดูโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมแป้งกับลิกโนเซลลูโลสโดยใช้ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

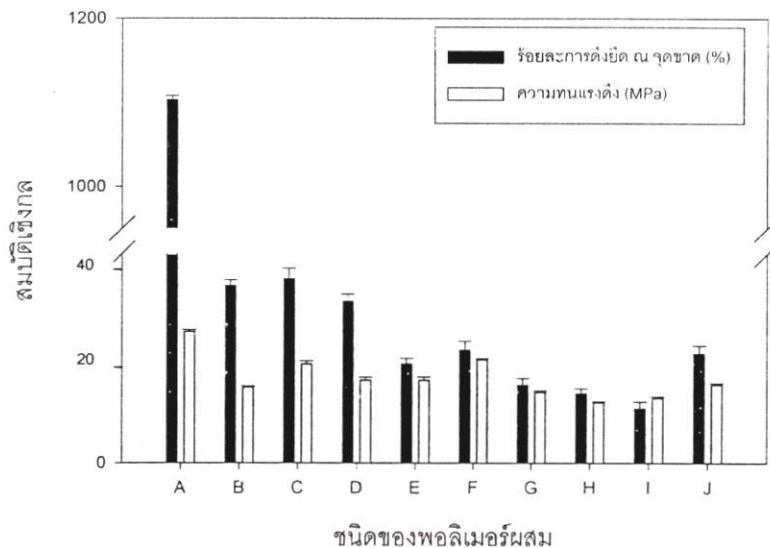
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ทำการทดลองเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จาก HDPE เส้นใยอ้อย แป้ง กาลีเซอรอล โดยสมบัติที่ทดสอบได้แก่ สมบัติเชิงกล ปริมาณการออกซิเดชัน สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

นำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการทดลองในสภาวะต่างๆมาตรฐานวัด สมบัติความทนแรงดึงและร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



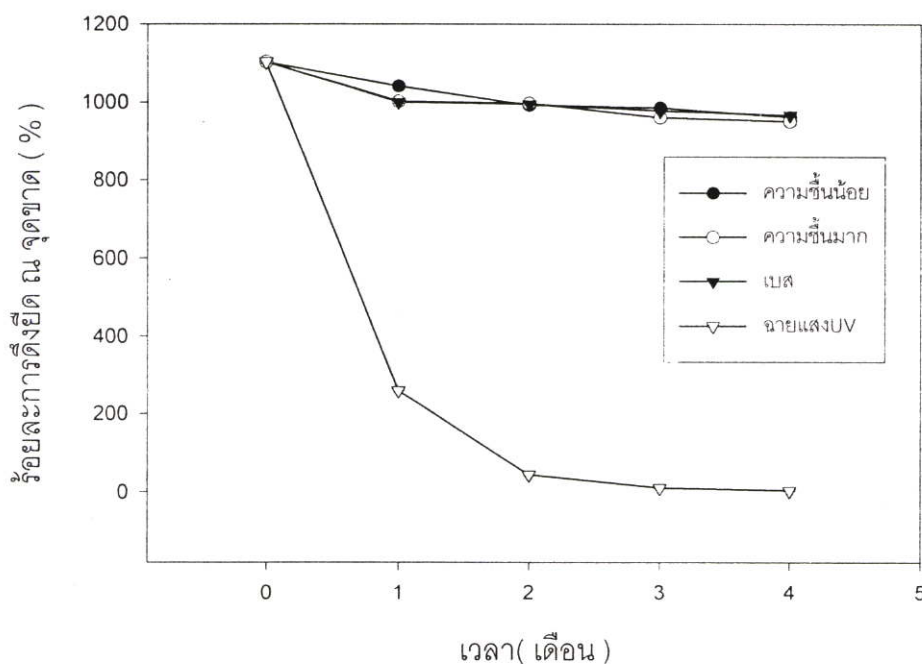
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงและ ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ

- | | |
|----------------------------------|--|
| (A) HDPE | (B) HDPE+แป้ง 30% |
| (C) HDPE+แป้ง 10%+กาลีเซอรอล30% | (D) HDPE+แป้ง 20%+กาลีเซอรอล30% |
| (E) HDPE+แป้ง 30%+กาลีเซอรอล30% | (F) HDPE+เส้นใย 10%+กาลีเซอรอล30% |
| (G)HDPE+เส้นใย 20%+กาลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30%+กาลีเซอรอล30% |
| (I) HDPE+เส้นใย 30% | (J) HDPE+แป้ง 15%+เส้นใย 15%+กาลีเซอรอล30% |

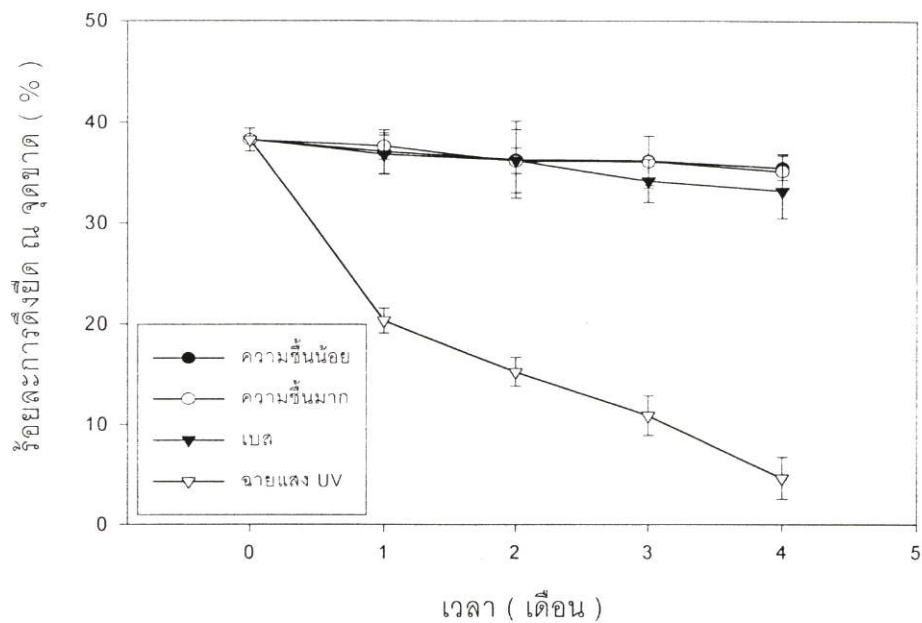
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ HDPE กับ HDPE ที่ผสม แป้ง เส้นใย ทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอล พบว่า HDPE ที่ผสมสารตัวเติมมีค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงดึงมีค่าลดลงในทุกสูตร HDPE เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแป้งที่มีกลีเซอรอลผสมกับ HDPE พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและความทนแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับคือ $C > D > E$ เมื่อเปรียบเทียบ HDPE ที่ผสมแป้งในปริมาณเท่ากันมีและไม่มีกลีเซอรอล พบว่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด $B > E$ และ ความทนแรงดึง $E > B$

สำหรับ HDPE ผสมเส้นใยและกลีเซอรอล พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงดึงลดลงตามลำดับคือ $F > G > H$ HDPE สูตรที่ผสมเส้นใยปริมาณเท่ากันที่มีและไม่มีกลีเซอรอล พบว่า ร้อยละการดึงยืด $H > I$ ความทนแรงดึง $I > H$ สำหรับ HDPE ที่ผสมแป้ง เส้นใย กลีเซอรอล (J) มีค่าร้อยละการดึงยืดใกล้เคียงสูตร F และมีค่าความทนแรงดึงอยู่ระหว่างสูตร F กับ G

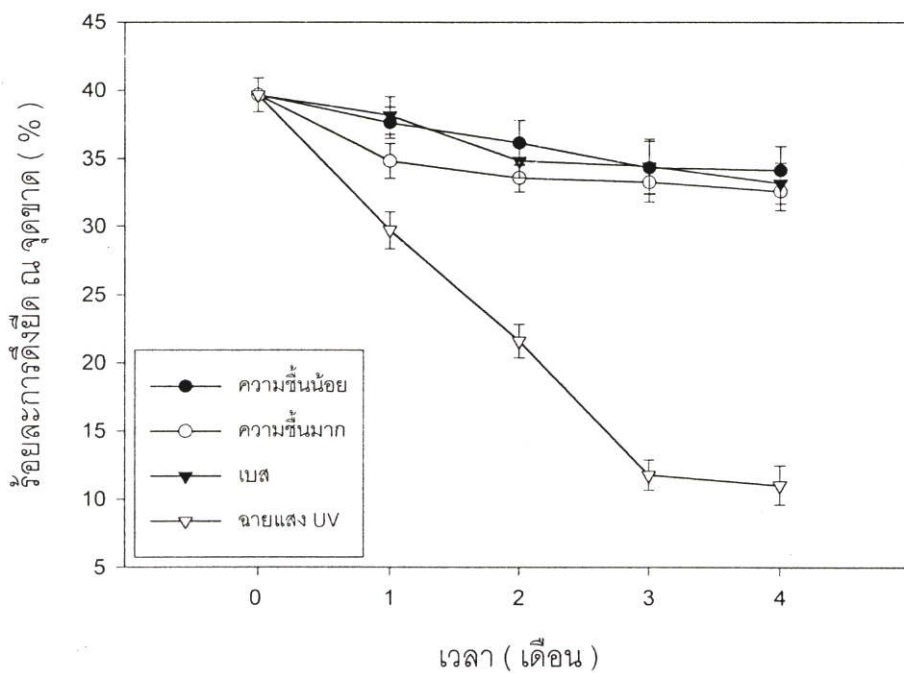
นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรหลังการทดลองในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน ทดสอบแรงดึงยืด ณ จุดขาด มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.2-4.11 โดยรูปที่ 4.3-4.6 เป็นของพอลิเมอร์ผสมแป้ง รูปที่ 4.7-4.10 เป็นของพอลิเมอร์ผสมเส้นใยและรูปที่ 4.11 เป็นของพอลิเมอร์ผสมทั้งแป้งและเส้นใย



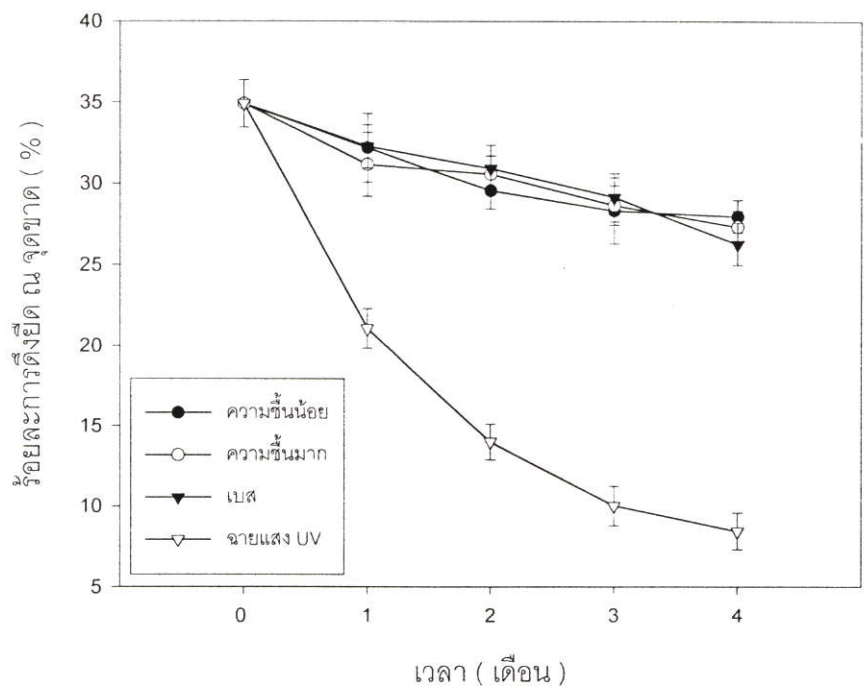
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของ HDPE (A) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



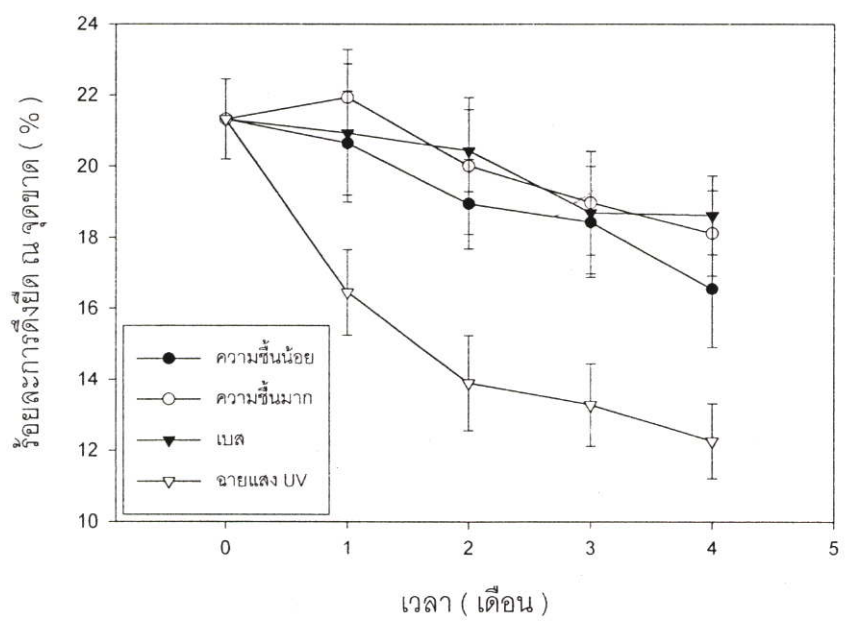
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดขาดของ HDPE + แบ่ง30%(B) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



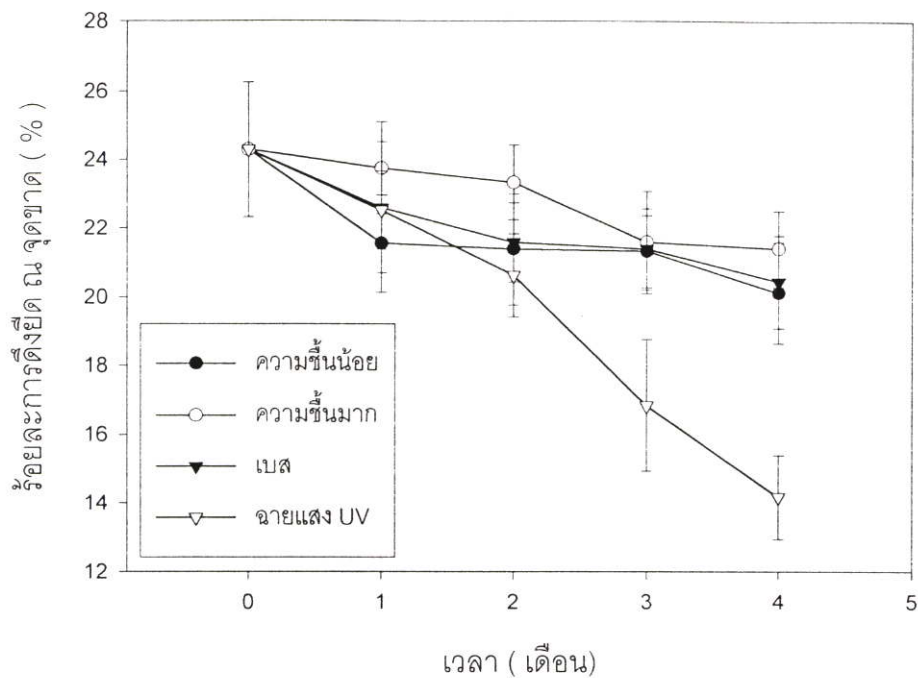
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดขาดของ HDPE+แบ่ง10%+ ก्लीเซอร์อล30%(C)ในสภาวะการทดลองต่างๆ



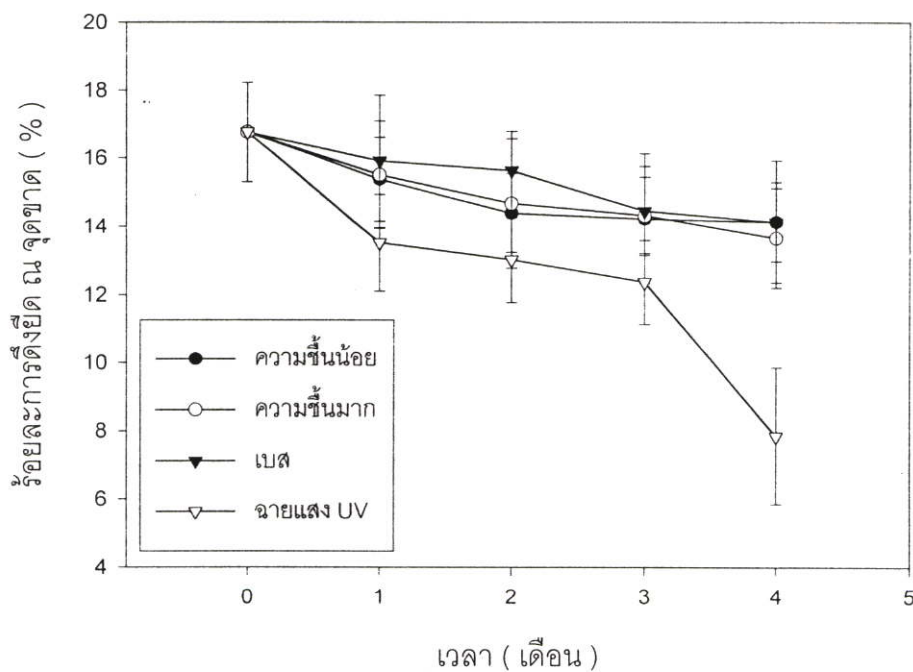
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของ HDPE+แบ่ง20%+ กลีเซอรอล30%(D)ในสภาวะการทดลองต่างๆ



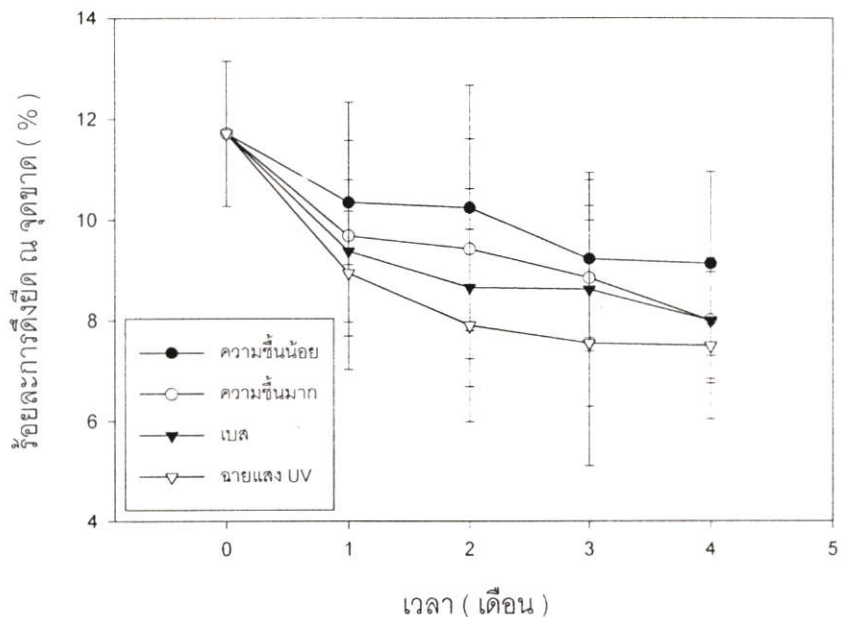
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของ HDPE+แบ่ง30%+ กลีเซอรอล30%(E)ในสภาวะการทดลองต่างๆ



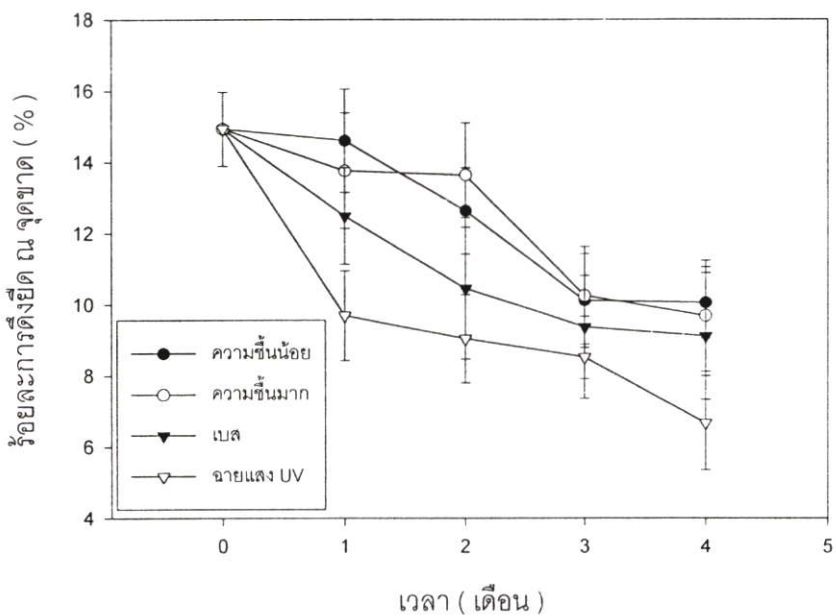
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดของ HDPE+เส้นใย10%+ ก्लीเซอรอล30%(F)ในสภาวะการทดลองต่างๆ



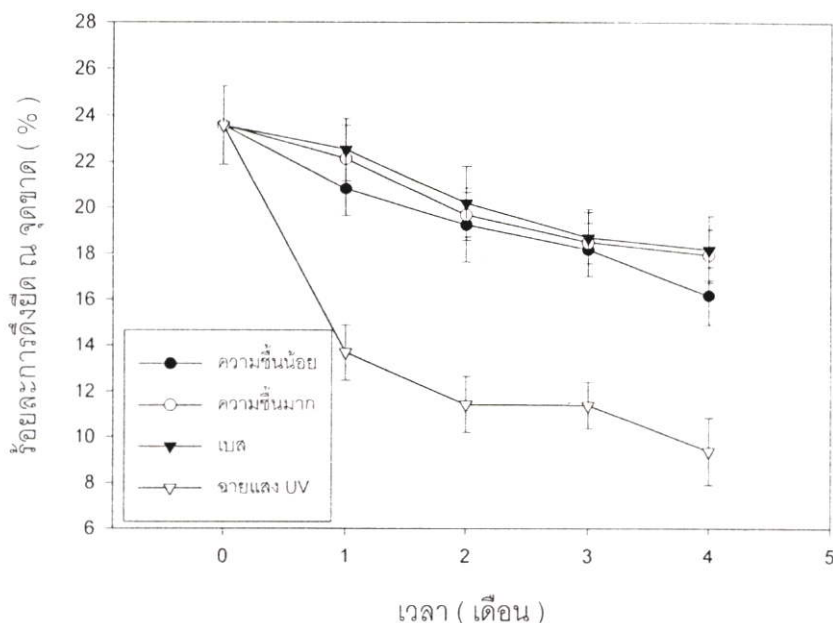
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดของ HDPE +เส้นใย20%+ ก्लीเซอรอล30%(G)ในสภาวะการทดลองต่างๆ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดขาดของ HDPE + เส้นใย30%+ ก्लीเซอรอล30%(H)ในสภาวะการทดลองต่างๆ



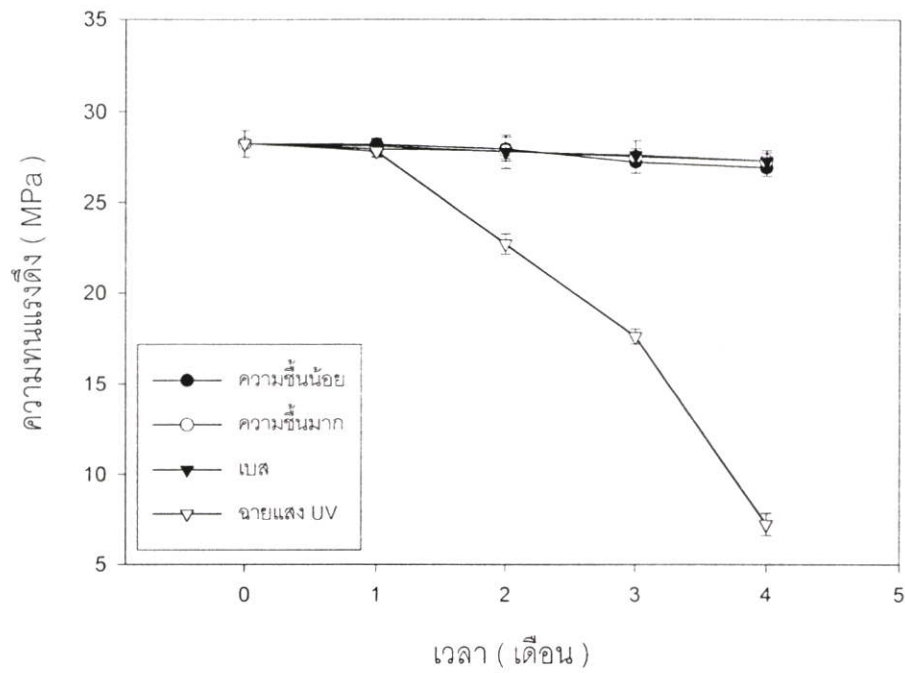
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดขาด ของ HDPE + เส้นใย30%(I) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



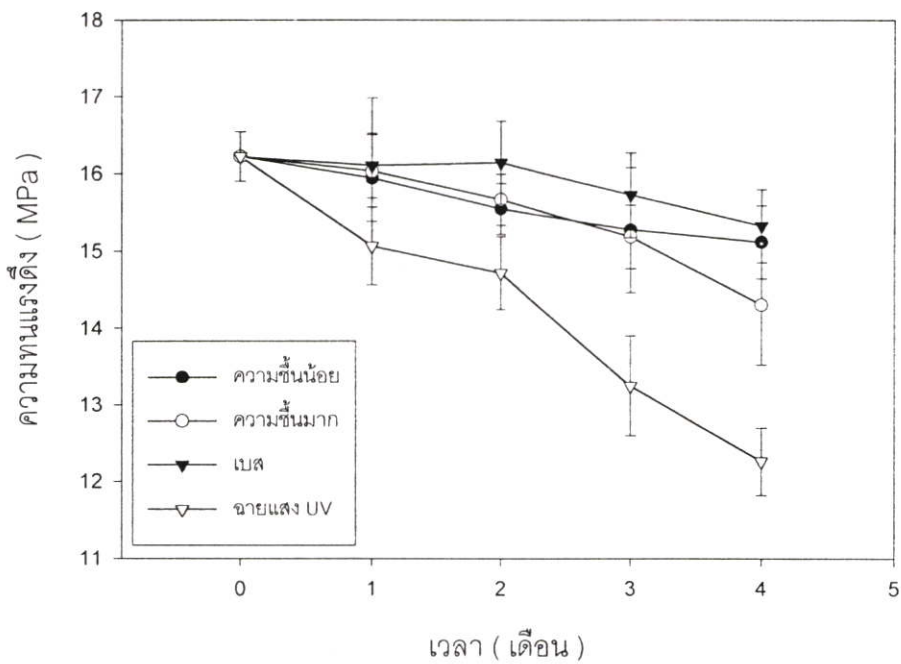
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดัดงัด ณ จุดขาด ของ HDPE+แป้ง 15%+เส้นใย 15%+กลีเซอรอล 30%(J)

จากรูปที่ 4.3-4.6 พอลิเมอร์ทุกสูตรที่ผสมแป้งมีการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดัดงัด ณ จุดขาดไม่มาก ในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก และ เบส แต่การฉายแสง UV ทำให้ร้อยละการดัดงัด ณ จุดขาดลดลงมาก รูปที่ 4.7-4.11 พอลิเมอร์ผสมที่มีเส้นใยอยู่ด้วยจะทำให้ ร้อยละการดัดงัด ณ จุดขาดต่ำกว่าผสมแป้ง การเปลี่ยนแปลงในสภาวะต่างๆคล้ายพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งแสดงว่าแสง UV ทำให้ความยาวสายโซ่ลดลงได้มากกว่าการผึ่งกลบ

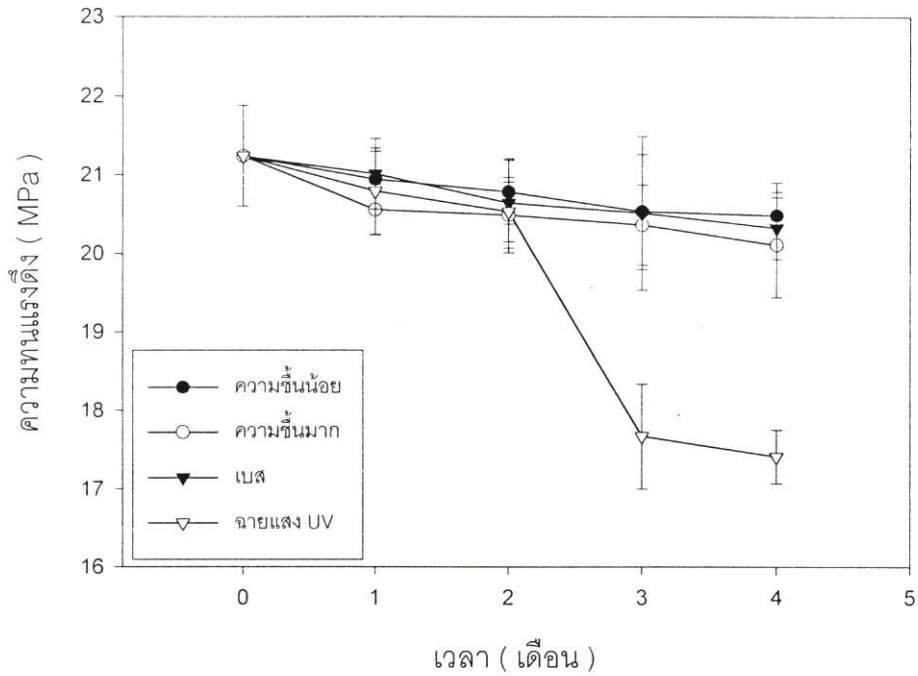
พิจารณาค่าความทนแรงดึงพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือนมีการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.12-4.21 โดยในรูปที่ 4.13-4.16 เป็นของพอลิเมอร์ผสมแป้ง รูปที่ 4.17-4.20 เป็นของพอลิเมอร์ผสมเส้นใย รูปที่ 4.21 เป็นของพอลิเมอร์ผสมแป้งและเส้นใย



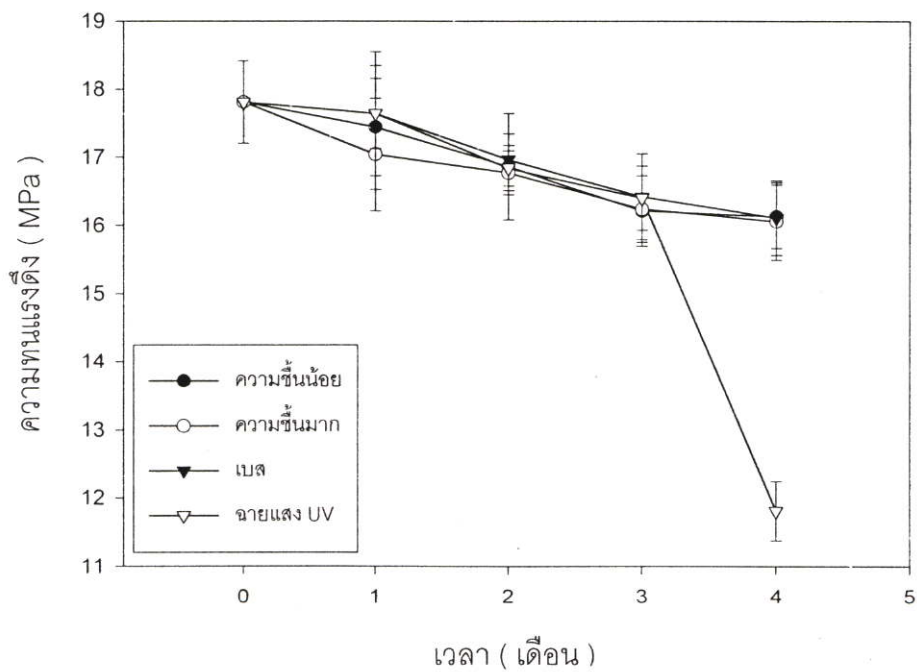
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE(A) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



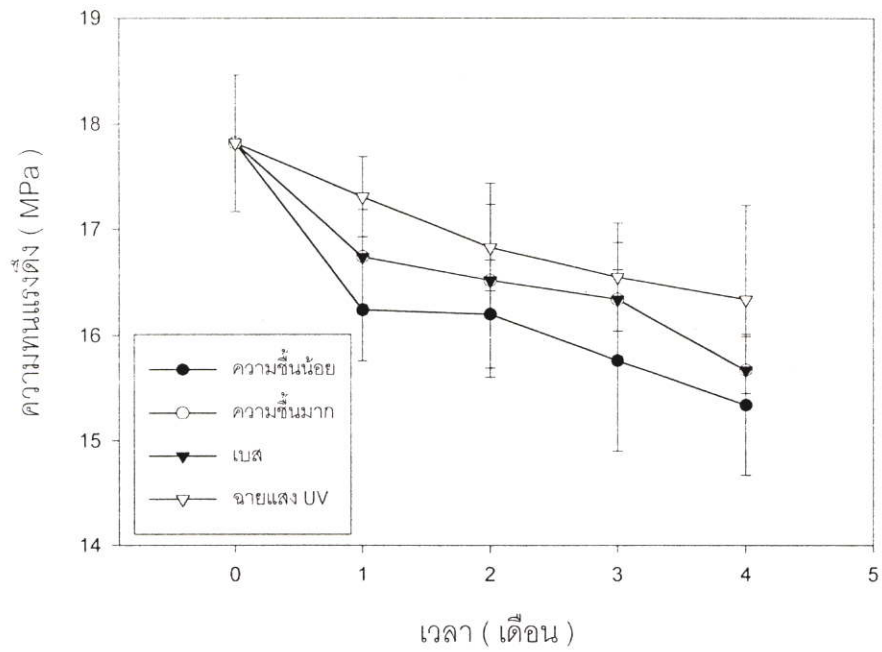
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + แป้ง 30%(B) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



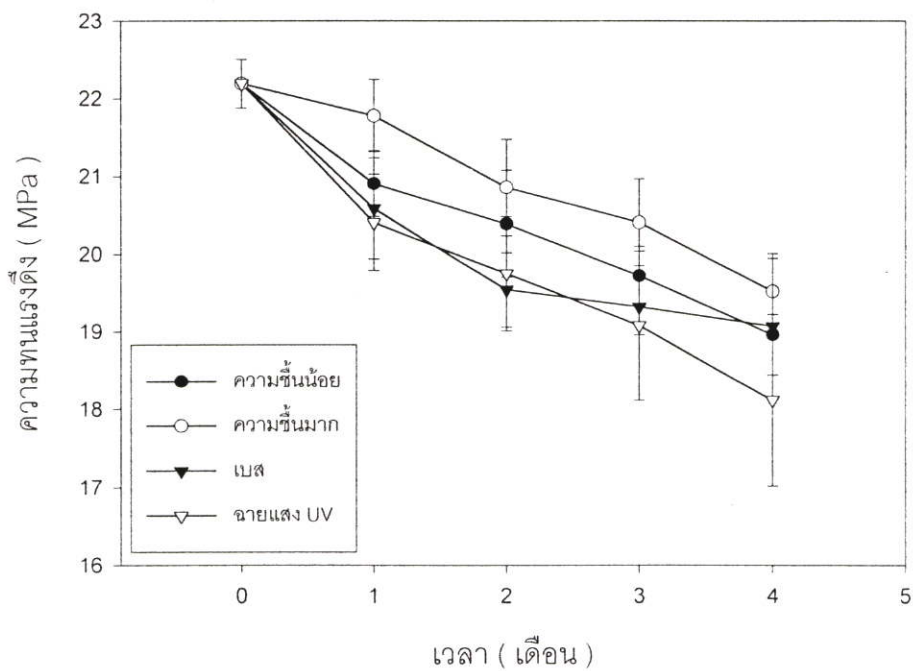
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + แป้ง 10% + กลิเซอรอล 30% (C) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



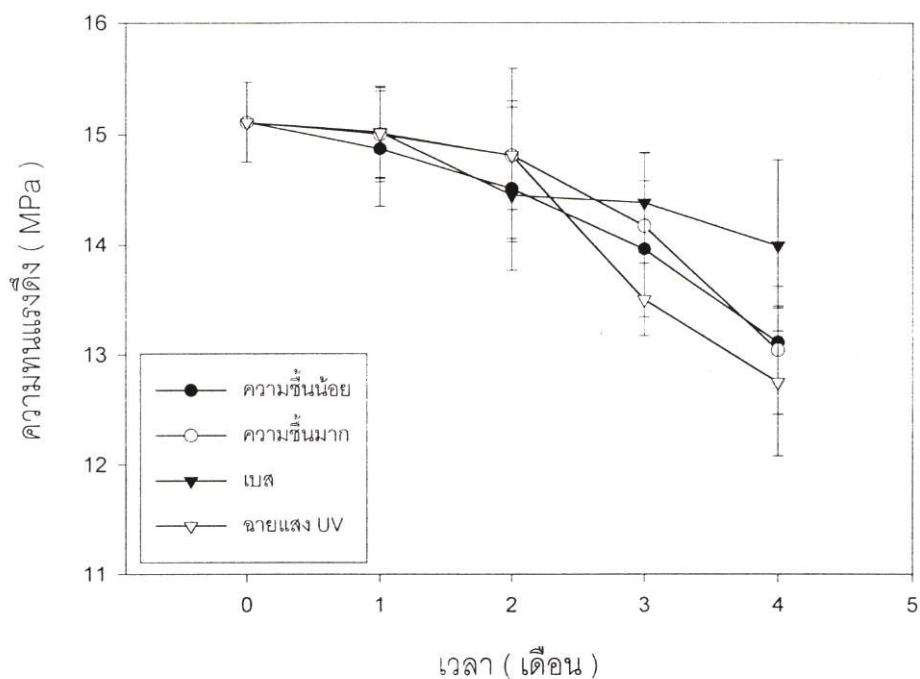
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + แป้ง 20% + กลิเซอรอล 30% (D) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



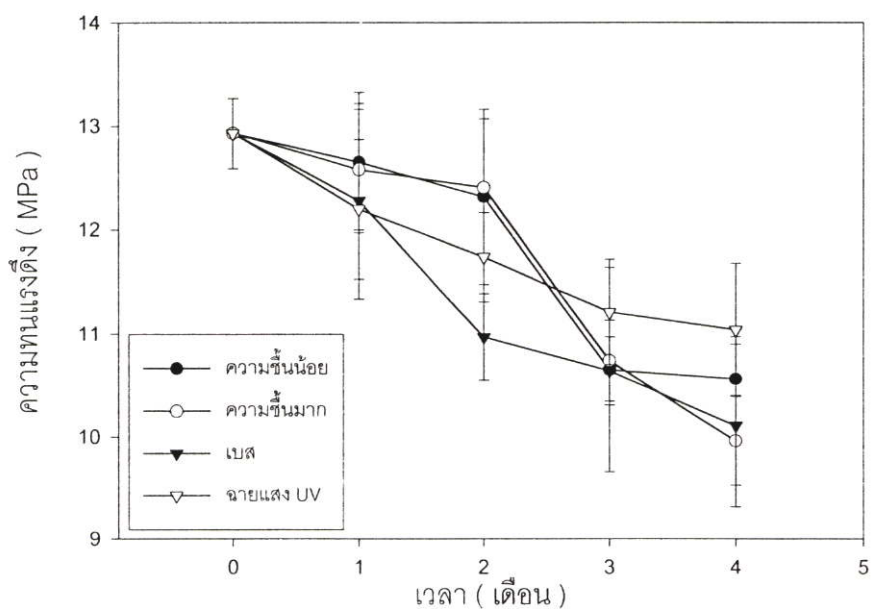
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + แป้ง 30% + กลีเซอรอล 30% (E) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



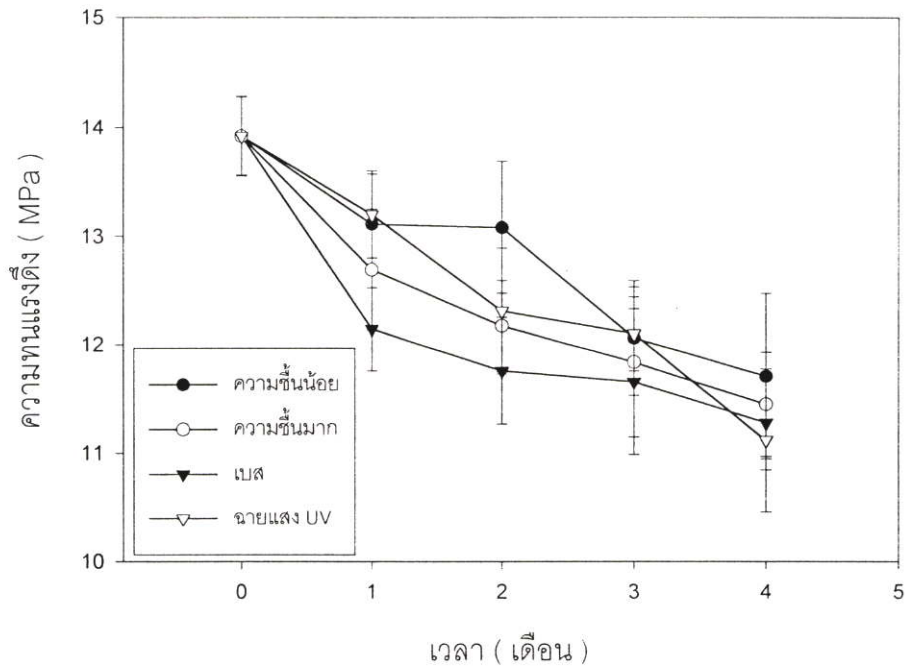
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย 10% + กลีเซอรอล 30% (F) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



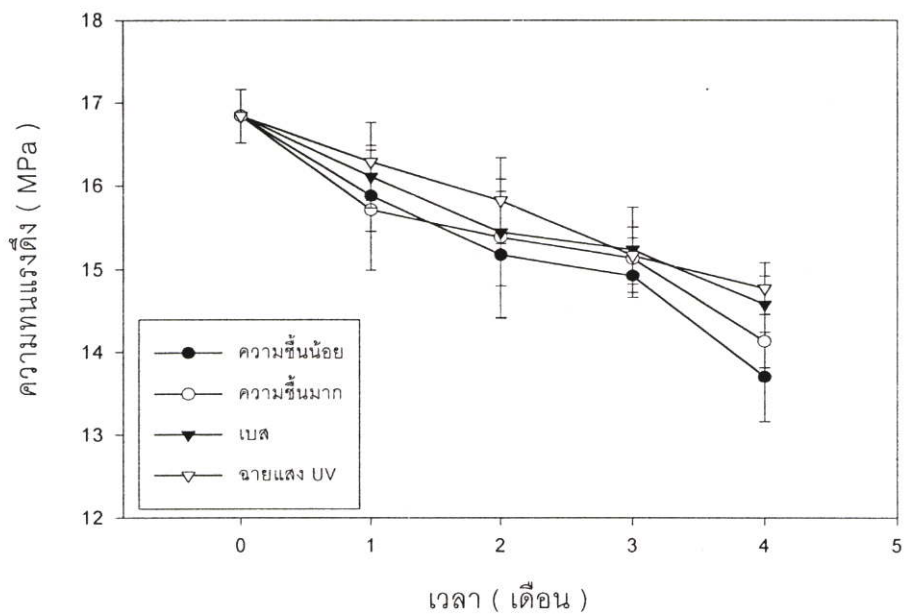
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย 20% + กลีเซอรอล 30% (G) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย 30% + กลีเซอรอล 30% (H) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



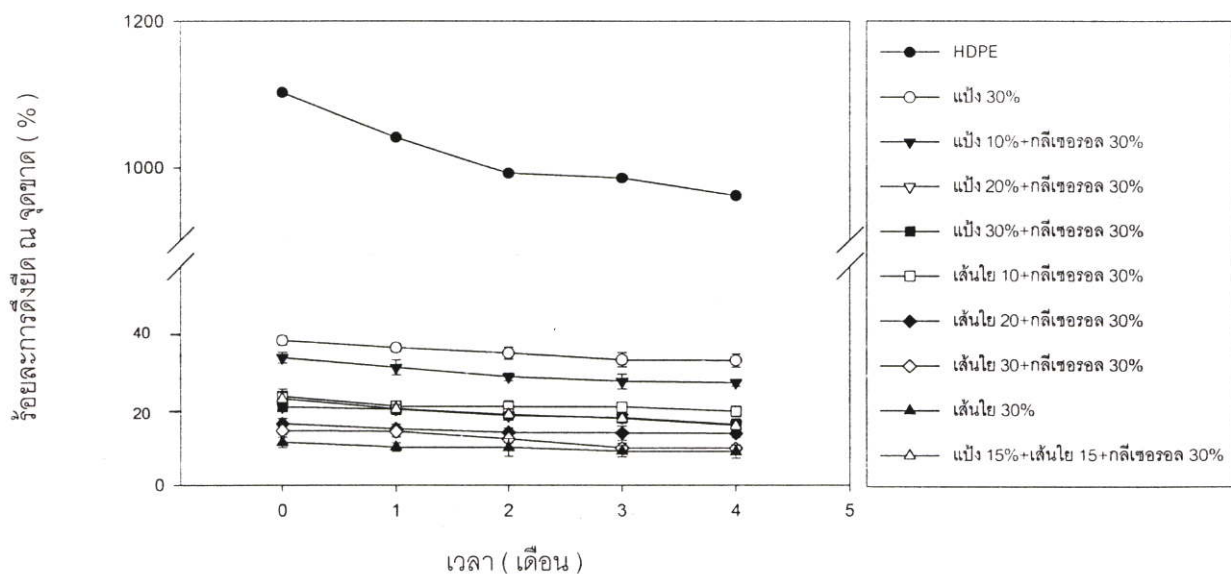
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + เส้นใย 30%+(I) ในสภาวะการทดลองต่างๆ



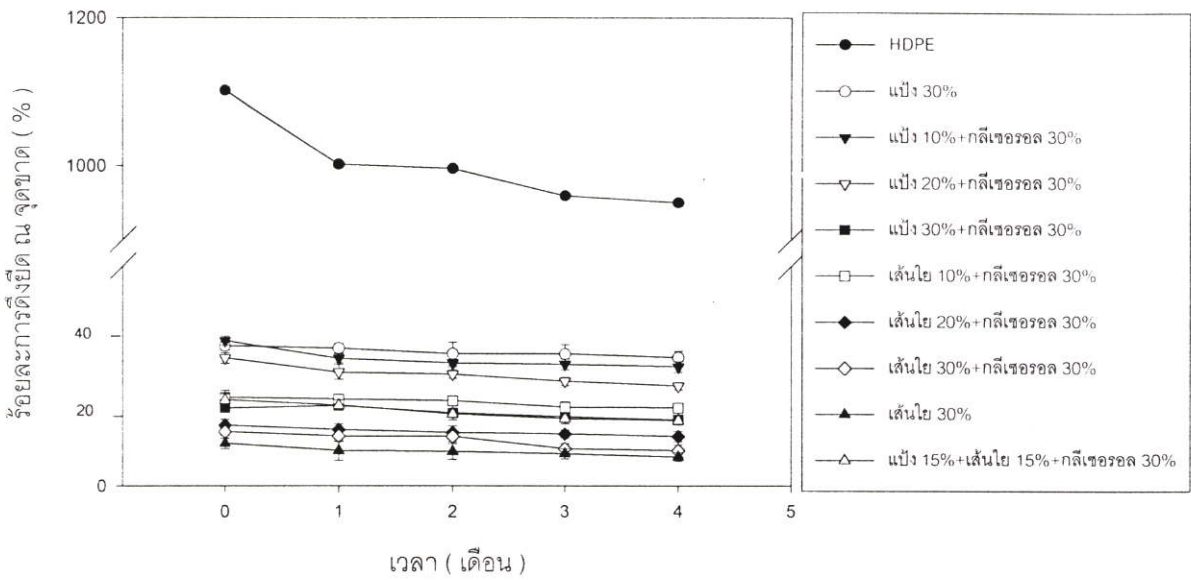
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความทนแรงดึงของ HDPE + ใยแก้ว 15% + เส้นใย 30% + ก्लीเซอรอล 30% (J) ในสภาวะการทดลองต่างๆ

จากรูปที่ 4.13-4.16 พอลิเมอร์สูตรที่ผสมแป้งทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลมีการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงลดลงเล็กน้อยในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก และ เบส แต่การฉายแสง UV พบว่าทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงมากกว่าในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก และเบส

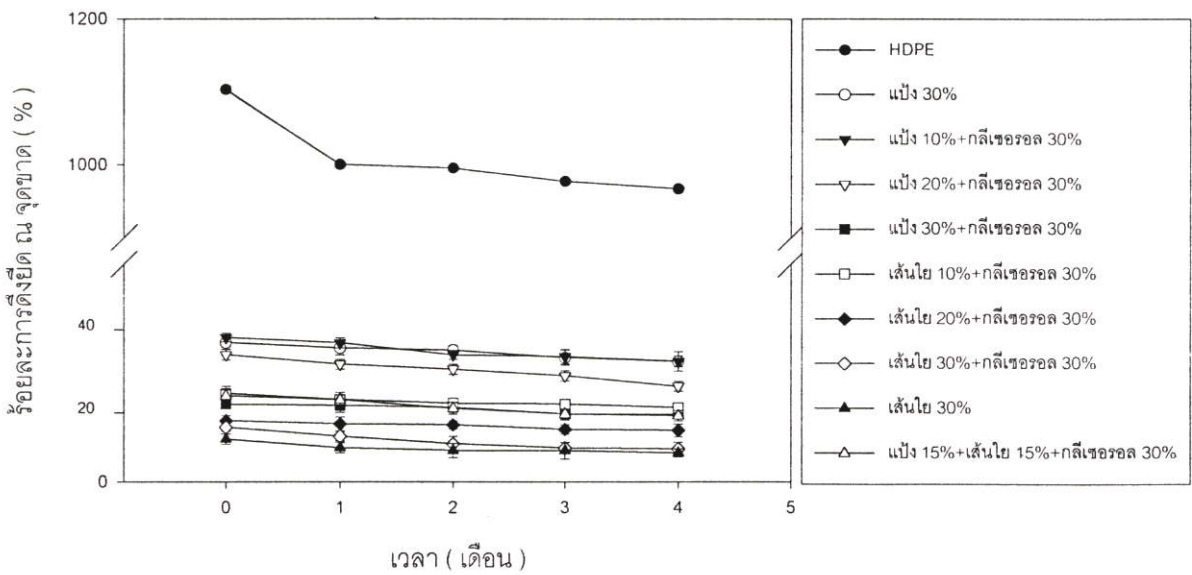
จากรูปที่ 4.17-4.20 ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ผสมเส้นใยทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และฉายแสง UV พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆโดยค่าความทนแรงดึงในทุกสภาวะมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการได้รับแสง UV เพิ่มขึ้นแสดงว่าแสง UV มีผลต่อความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งมากกว่าเส้นใย เพื่อให้ทราบบทบาทของแป้งและเส้นใย จึงนำผลการทดลองข้างต้นมาเขียนกราฟใหม่โดยแยกพิจารณาตามสภาวะการทดลองและสมบัติเชิงกล รูปที่ 4.22-4.25 เปรียบเทียบร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ส่วนรูปที่ 4.26-4.29 เปรียบเทียบความทนแรงดึง



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ในสภาวะความชื้นน้อย



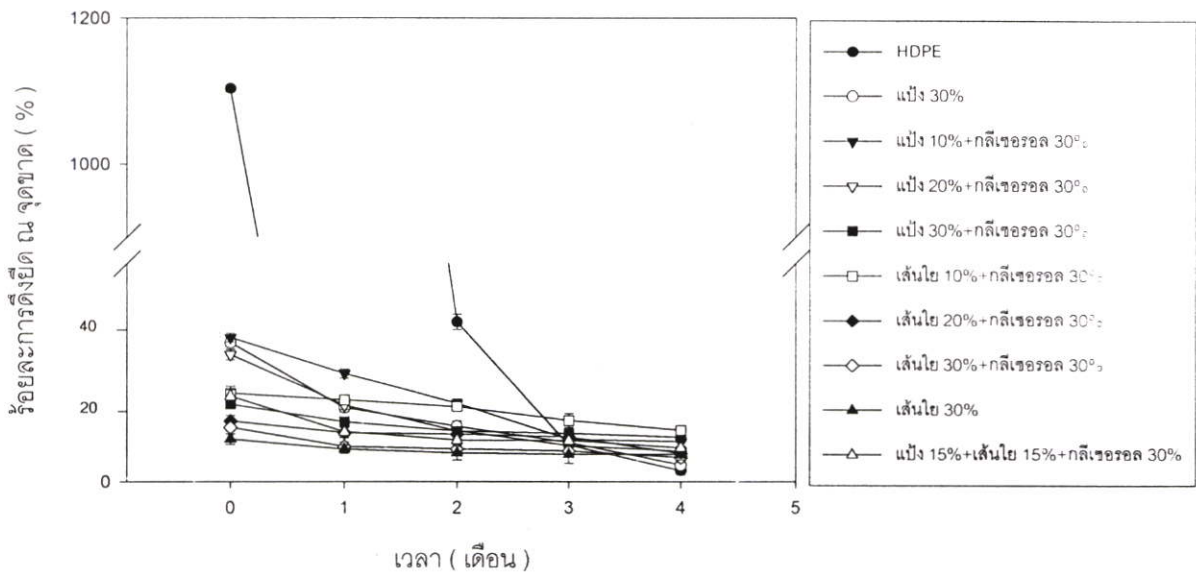
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ในสภาวะความชื้นมาก



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ในสภาวะเบส

จากรูปที่ 4.22-4.24 พอลิเมอร์ทุกสูตรในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมากและเบสมี ร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาด ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนทำการฝั้กกลบและพบว่าคล้าย กันไม่ว่าจะผสมแป้งหรือเส้นใยแต่พอลิเมอร์ที่ผสมแป้งให้ค่าสูงกว่าที่ผสมเส้นใย อธิบายได้ว่า โมเลกุลพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เส้นใยมีข้อจำกัดในการหมุนหรือเคลื่อนที่ นอกจากนี้การที่เส้นใย กระจายตัวอยู่ในลักษณะอิสระ ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการส่งผ่านแรงเค้นระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์

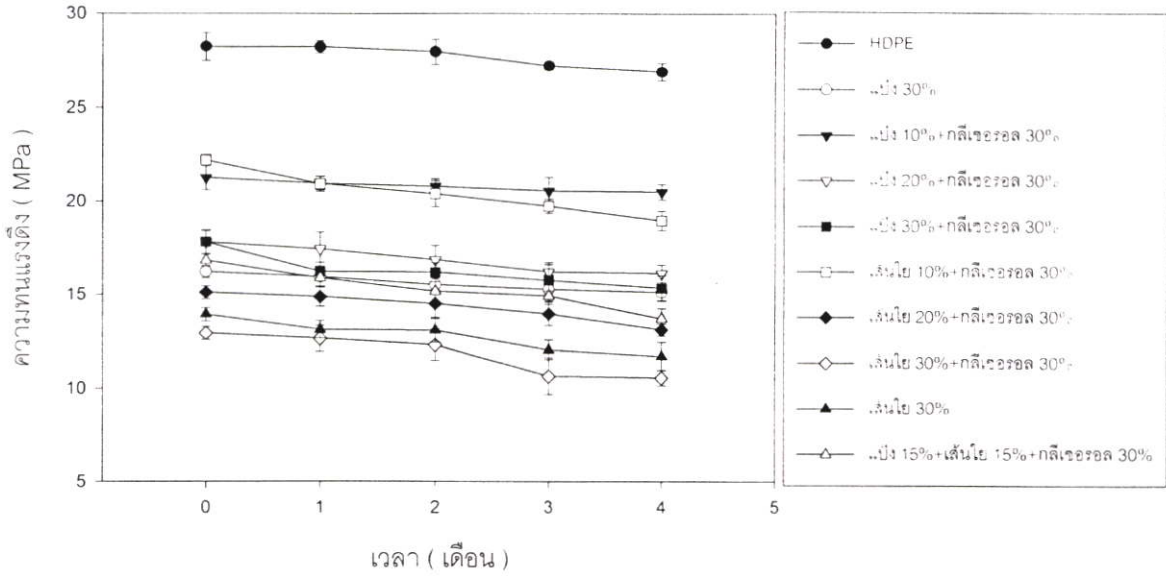
ผลการฉายแสง UV เมื่อเปรียบเทียบแต่ละสูตรได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.25



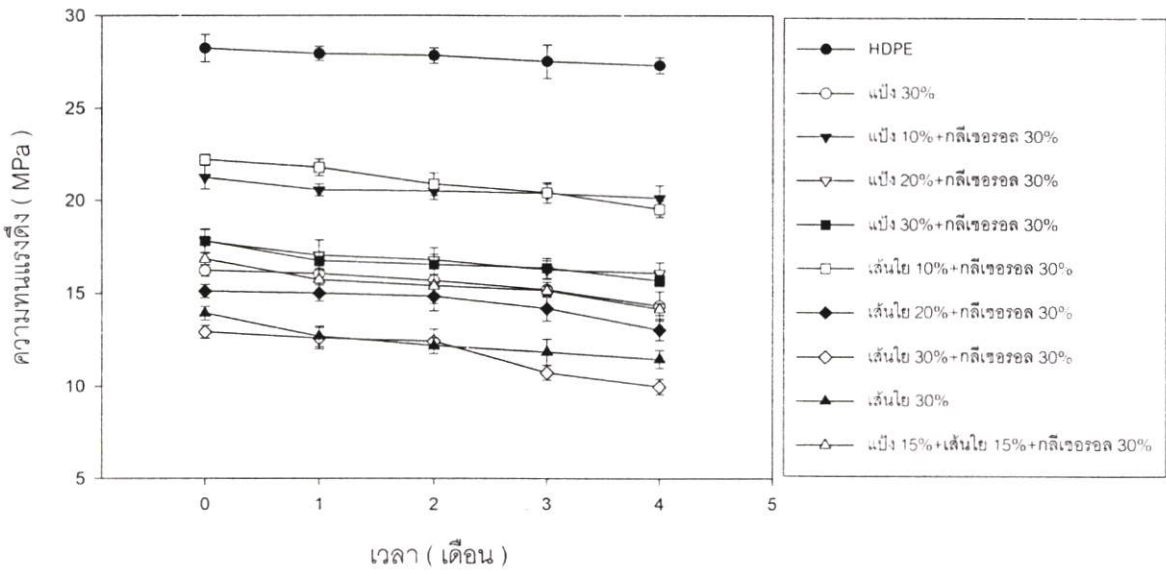
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในแสง UV

จากรูปที่ 4.25 พบว่าร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฉายแสง UV โดย HDPE ลดลงมากที่สุด ในขณะที่ HDPE ที่ผสมแป้งที่มี และไม่มีกลีเซอรอลค่าร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดลดลงมากกว่า HDPE ที่ผสมเส้นใยที่มีและไม่มี กลีเซอรอล แสดงว่า HDPE ที่ผสมเส้นใยมีความทนทานต่อแสง UV ทั้งนี้อาจเนื่องจากเส้นใยที่ใช้มี ลิกนินเป็นส่วนประกอบอยู่และแป้งอาจเกิดการสลายตัวด้วยแสง

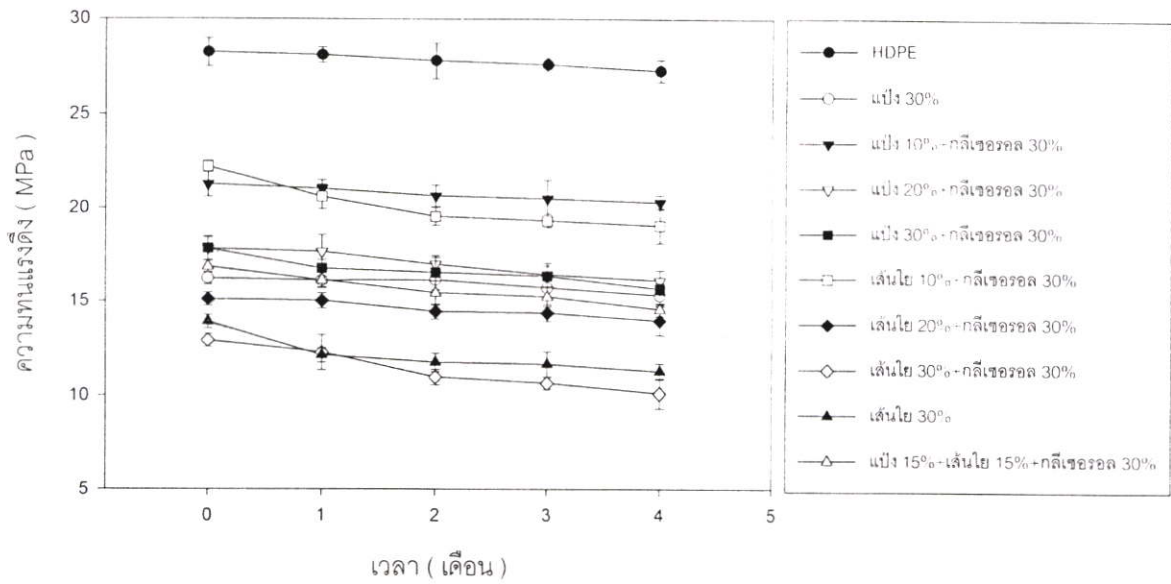
เมื่อเปรียบเทียบความทนแรงดึงพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรในสภาวะเดียวกันคือ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26-4.28



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะความชื้นน้อย



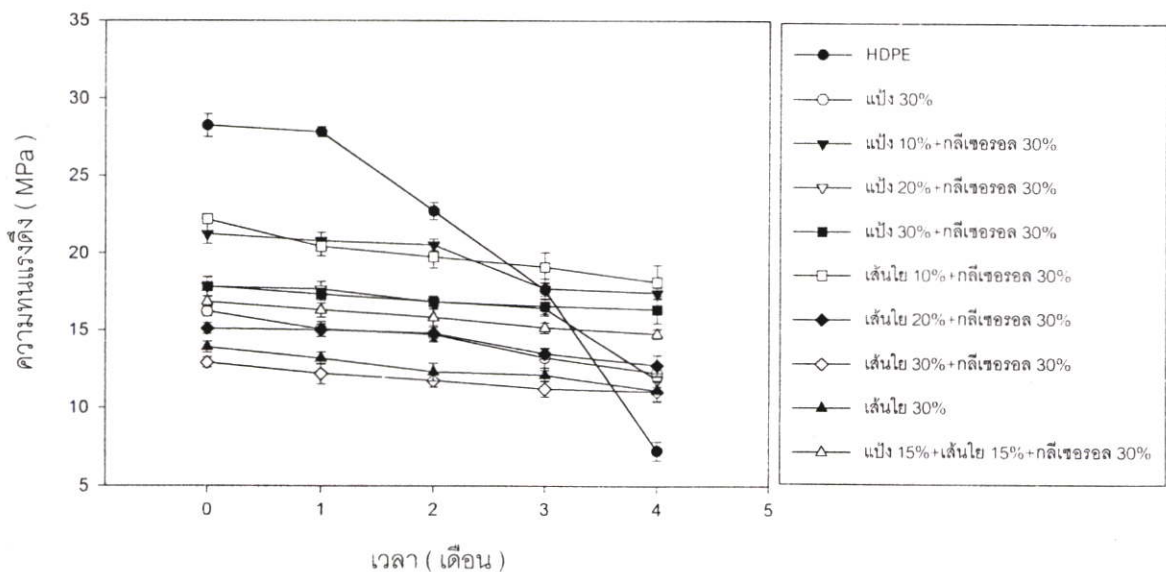
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะความชื้นมาก



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในสภาวะเบส

จากรูปที่ 4.26-4.28 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนทำการทดลองทั้งสภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมาก และเบส พอลิเมอร์ที่ผสมแบ่งให้ ความทนแรงดึงสูงกว่าเส้นใย เมื่อเพิ่มปริมาณแบ่งและเส้นใย ความทนแรงดึงยิ่งลดลง เหตุผลเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น

ผลการฉายแสง UV เมื่อเปรียบเทียบแต่ละสูตรได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.29

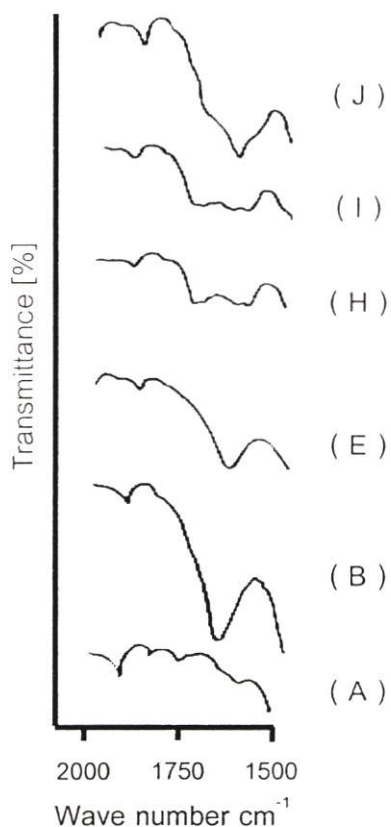


รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆในแสง UV

จากรูปที่ 4.29 พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าความทนแรงดึงลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการฉายแสง UV HDPE ที่ไม่ผสมแป้งและเส้นใยมีค่าความทนแรงดึงลดลงมากที่สุดแสดงว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง UV ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ การมีสารเติม เช่น แป้งและเส้นใยทำให้ความทนแรงดึงเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเวลาฉายแสงมากกว่า 3 เดือน พบว่า พอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยจะให้ค่าความทนแรงดึงดีกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมแป้ง

4.2 การหาปริมาณการออกซิเดชัน

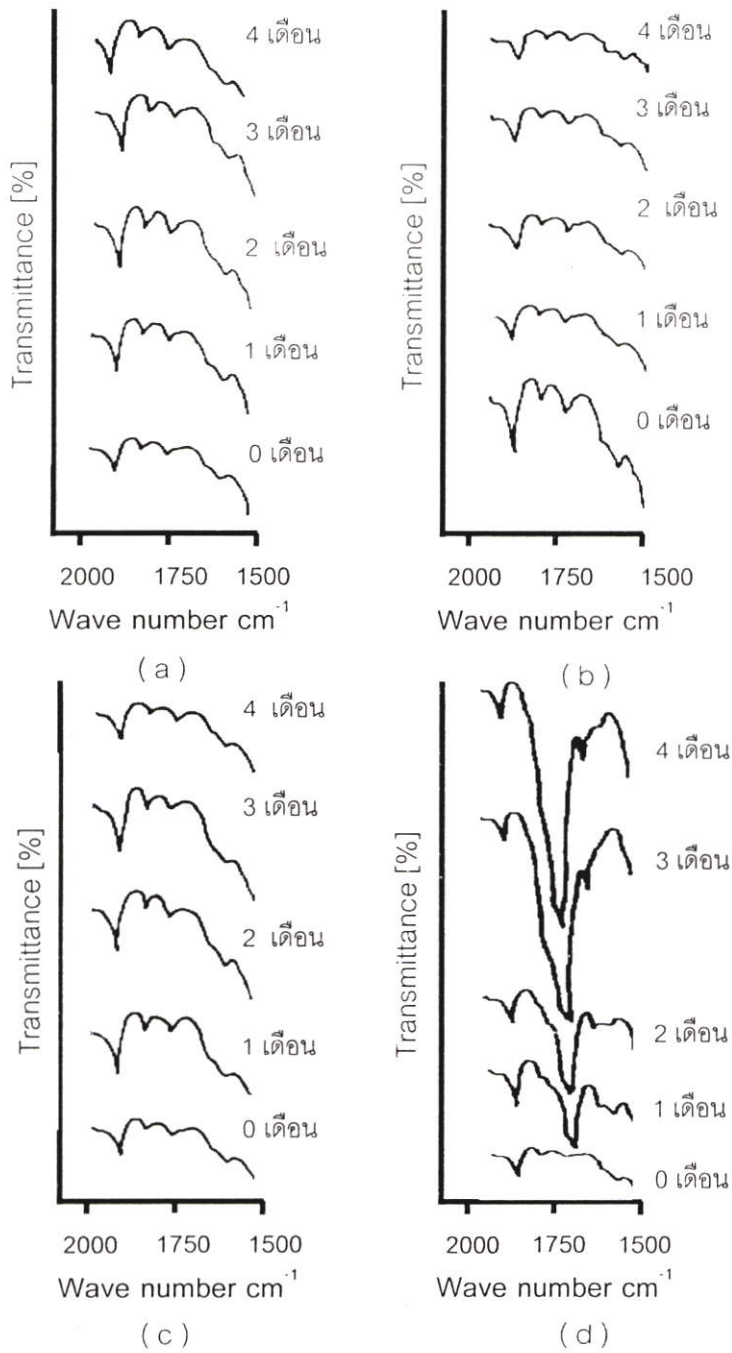
เมื่อผสม HDPE แป้ง เส้นใยและกลีเซอรอลตามสูตรต่างๆจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย FTIR แล้วนำผลของสูตรต่างๆมาเปรียบเทียบกันโดยพิจารณาช่วง $1500-2000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดหมู่คาร์บอนิลผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่าเมื่อเปรียบเทียบ HDPE กับ HDPE ผสมแป้ง ทั้งที่ใส่กลีเซอรอลและไม่ใส่กลีเซอรอลและ HDPE ผสม แป้ง เส้นใย กลีเซอรอล พบว่ามีพีคเกิดขึ้นที่ 1640 cm^{-1} ขณะที่ HDPE ผสม เส้นใยทั้งที่ใส่กลีเซอรอลและไม่ใส่กลีเซอรอลพบว่ามีพีคเกิดขึ้น 2 ช่วงคือ พีคที่ $1640-1642\text{ cm}^{-1}$ และ พีคที่ $1720-1735\text{ cm}^{-1}$ โดยบริเวณนี้เป็นพีคคาร์บอนิลดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟ FTIR แสดงการเปรียบเทียบช่วง $1500\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการทดลอง

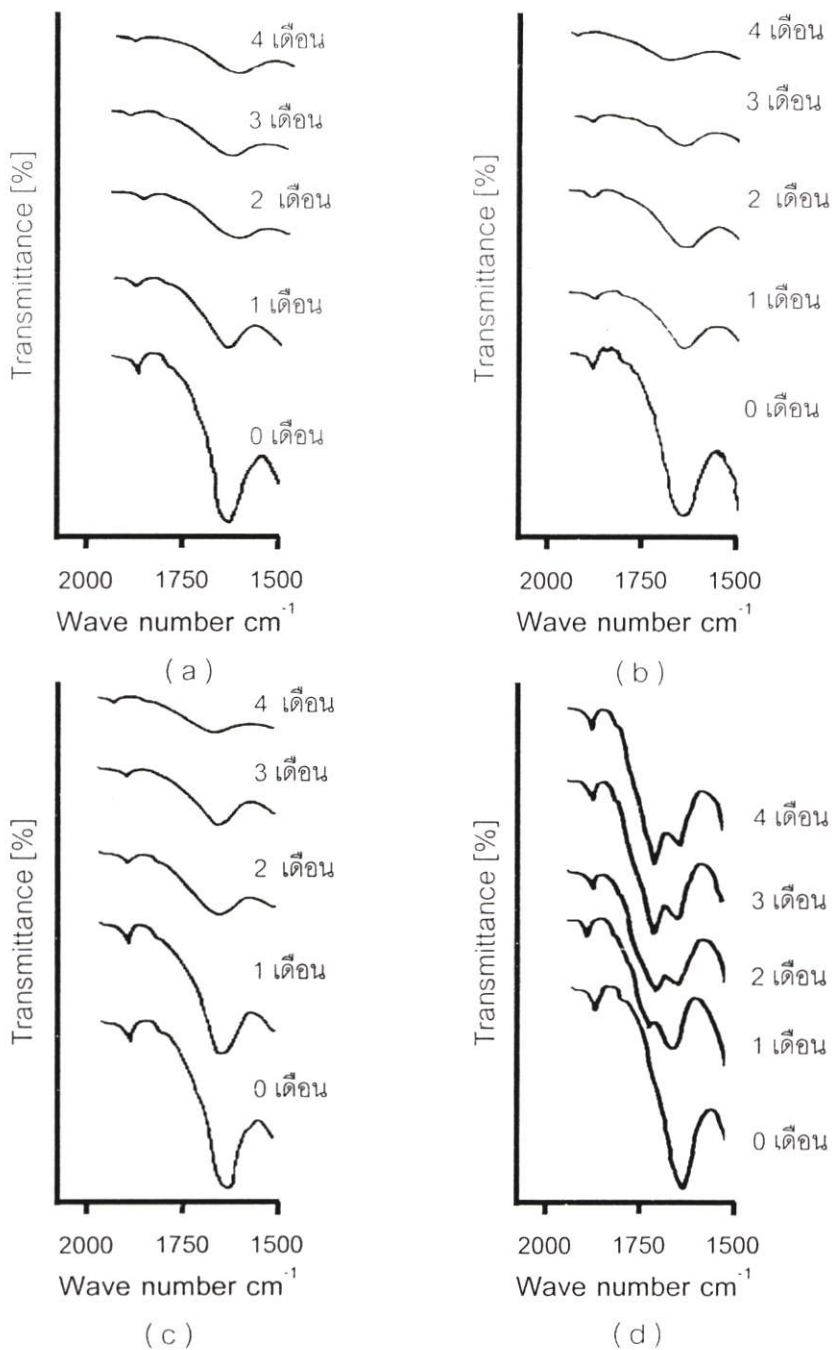
- (A) HDPE (B) HDPE+ แป้ง 30%
 (E) HDPE+ แป้ง 30%+30% กลีเซอรอล (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%
 (I) HDPE+เส้นใย 30% (J) HDPE+ แป้ง 15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%

หลังการฝังกลบในสภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และฉายแสง UV ในเวลา 4 เดือนการฉายแสง UV มีหมุ่คาร์บอนิลเกิดขึ้นขณะที่สภาวะการทดลองอื่นๆไม่เกิดดังรูป 4.31-4.36



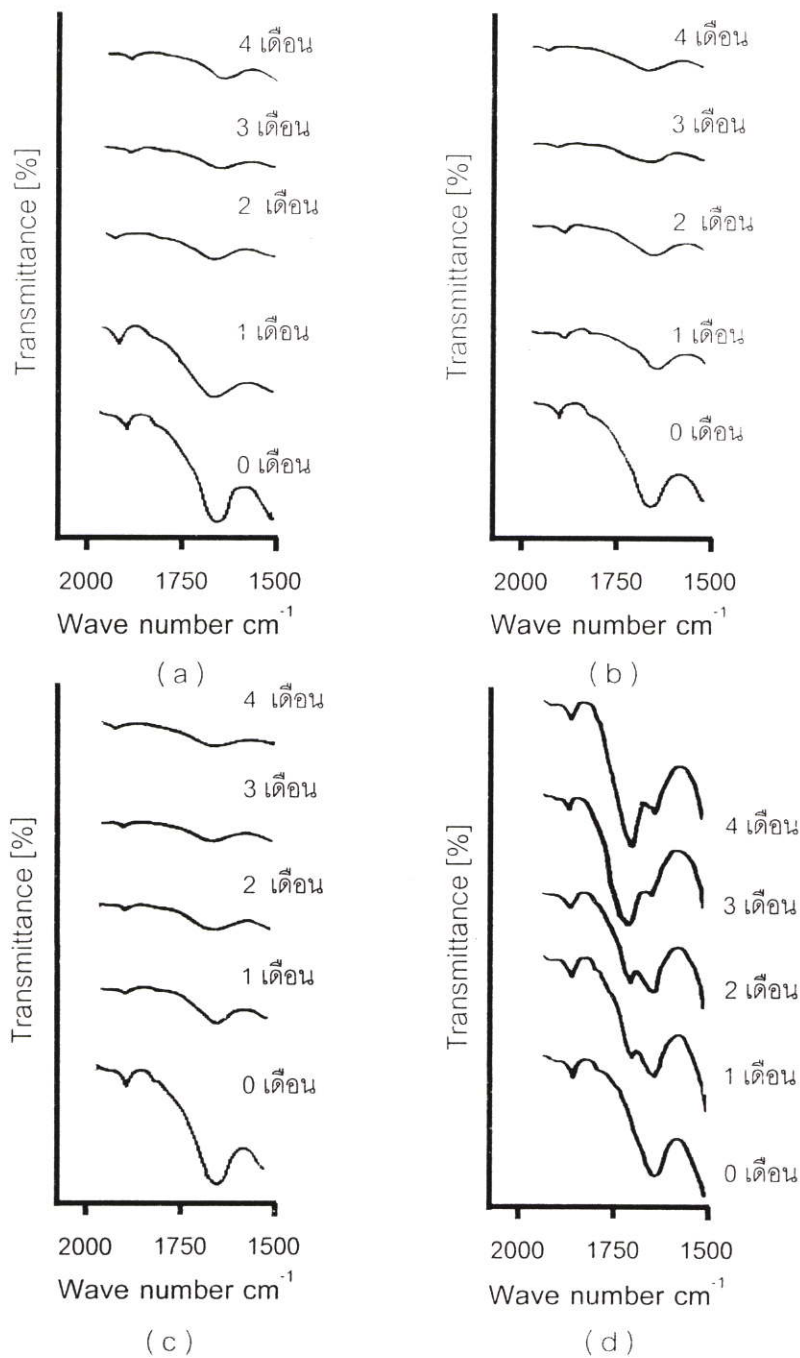
รูปที่ 4.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE (A) ในสภาวะต่างๆ

- (a) HDPE หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (b) HDPE หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน



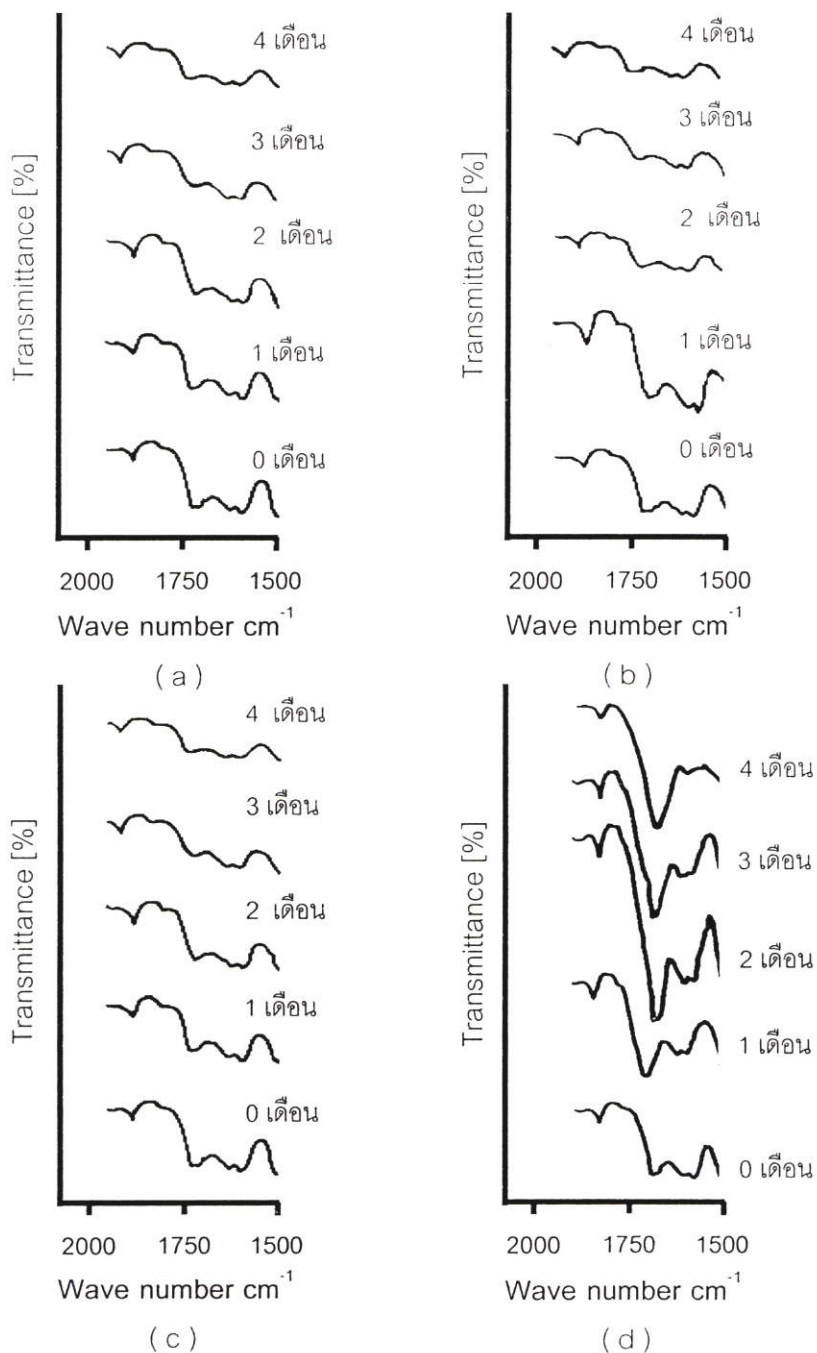
รูปที่ 4.32 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+แป้ง30% (B) ในสภาวะต่างๆ

- (a) HDPE+แป้ง 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (b) HDPE+แป้ง 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+แป้ง 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+แป้ง 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน



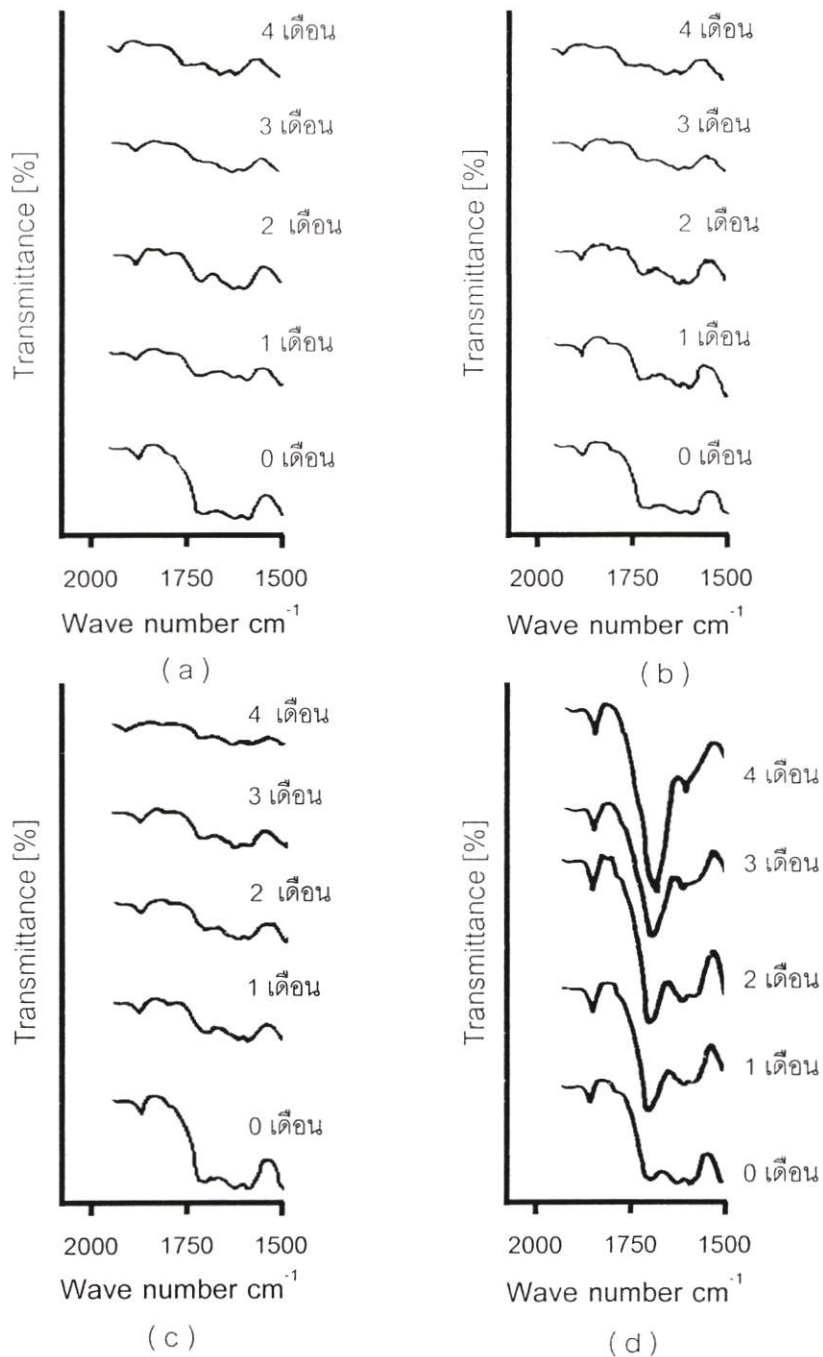
รูปที่ 4.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% (E) ในสภาวะต่างๆ

- (a) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (b) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30% (I) ในสภาวะต่างๆ

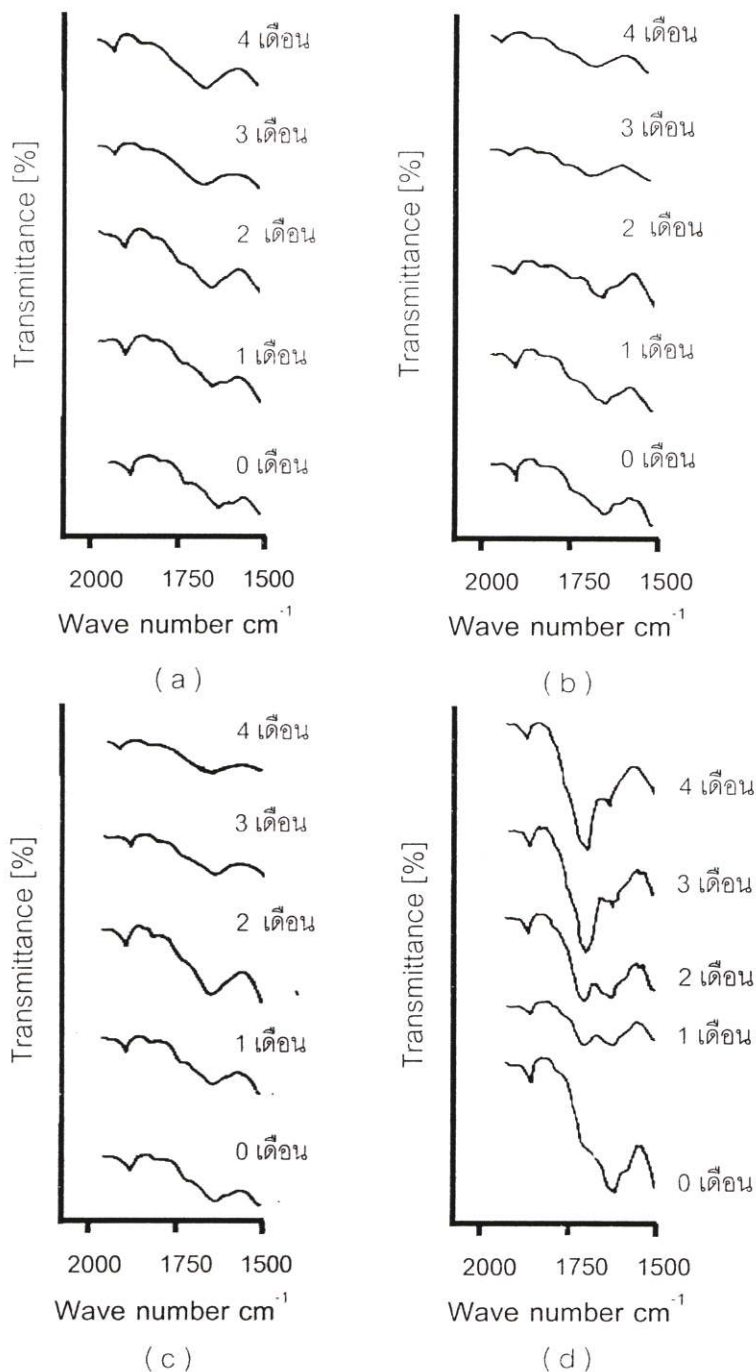
- (a) HDPE+เส้นใย 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (b) HDPE+เส้นใย 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+เส้นใย 30% หลังฝังกลบสภาวะเบลเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+เส้นใย 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%(H)

ในสภาวะต่างๆ

- (a) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4เดือน
- (b) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE+เส้นใย15%+แป้ง15%+กลีเซอรอล30% (J) ในสภาวะต่างๆ

- (a) HDPE+เส้นใย15%+แป้ง15%+กลีเซอรอล30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเวลา 4เดือน
- (b) HDPE+เส้นใย15%+แป้ง15%+กลีเซอรอล30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเวลา 4เดือน
- (c) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง15%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง15%+กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV เวลา 4 เดือน

4.2.1 การหาปริมาณดัชนีคาร์บอนิล (ΔCI) [21]

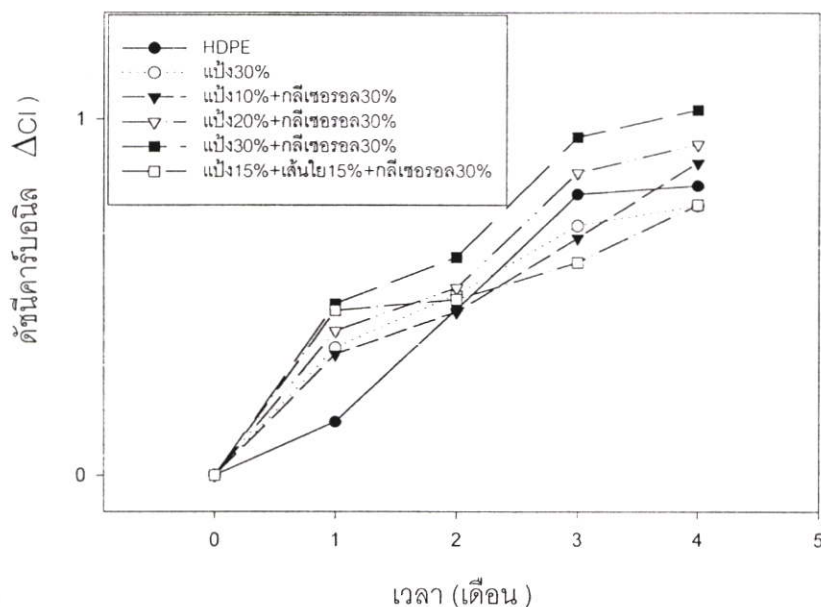
นำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลองฝังกลบในสถานะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และฉายแสง UV นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR เพื่อหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วคำนวณเป็นดัชนีคาร์บอนิล (ΔCI) โดยใช้สูตร

$$\Delta CI = [\log [100/\%T]/d]$$

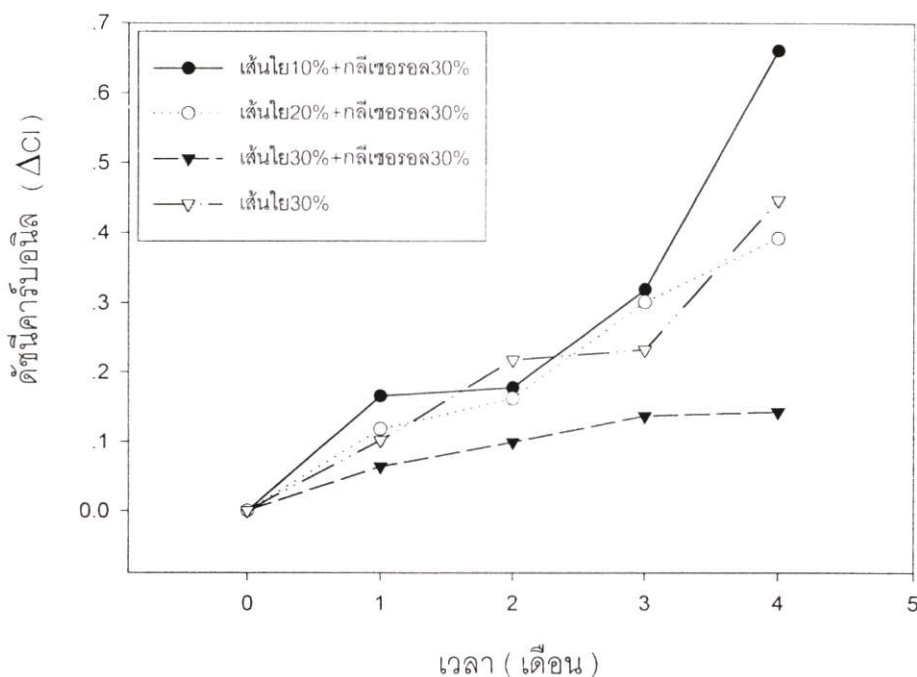
เมื่อ $\%T = \% \text{ transmittance}$

$d = \text{ความหนาชั้นงาน } (\mu\text{m})$

ผลการฉายแสง UV ของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นเวลา 4 เดือนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิล (ΔCI) ดังรูป 4.37-4.38



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE ผสม แป้ง เส้นใยที่มีและไม่มีกลีเซอรอลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์ม HDPE ผสมเส้นใยที่มีและไม่มีกลีเซอรอลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.37 พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสูตรเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการฉายแสงโดยสังเกตได้จากค่า (ΔCI) ที่เพิ่มขึ้นและพบว่า HDPE ที่ผสมแป้งมากสลายตัวได้ดีกว่าที่ผสมแป้งน้อย เรียงลำดับดังนี้ แป้ง 30% > 20% > 10% เมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลเท่ากันและง่ายกว่า HDPE ที่ผสมแป้งเพียงอย่างเดียว

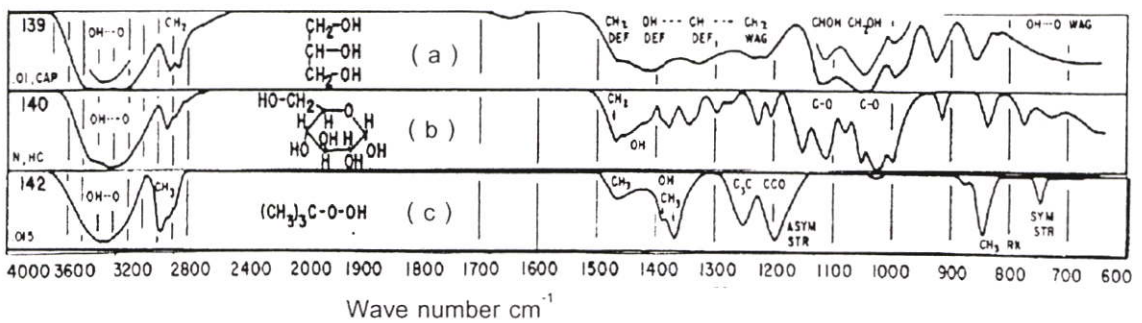
จากรูปที่ 4.38 แสดงผลการทดลองฟิล์ม HDPE ที่ผสมเส้นใย กลีเซอรอลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน มีปริมาณหมู่คาร์บอนิล (ΔCI) เพิ่มขึ้นตามลำดับ คือ เส้นใย 10% > 20% > 30% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม HDPE ที่ผสมเส้นใยอย่างเดียวพบว่าที่ปริมาณเส้นใย 30% เท่ากันฟิล์ม HDPE ที่ผสมเส้นใยและกลีเซอรอลมีการเพิ่มปริมาณหมู่คาร์บอนิลน้อยกว่า ขณะที่การทดลองโดยการฝังกลบในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสูตรเหมือนการฉายแสง UV

4.2.2 การหาปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล[22]

นำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลองฝังกลบในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และฉายแสง UV ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR นำกราฟหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลออกไซด์โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล} = \frac{\text{Absorbance ที่ } 3382 \text{ cm}^{-1}}{\text{Absorbance ที่ } 2020 \text{ cm}^{-1}}$$

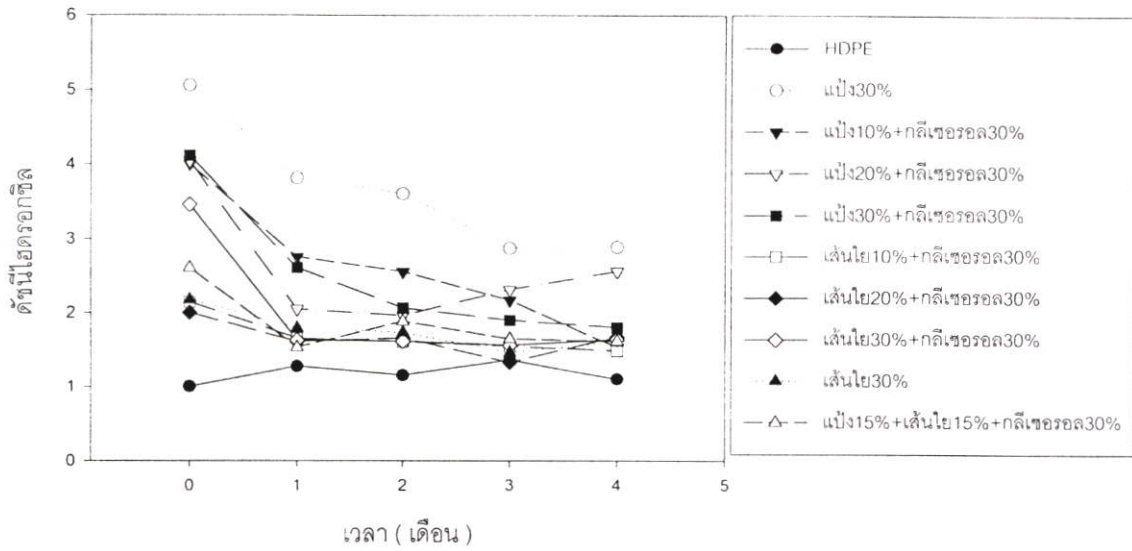
บริเวณ 3382 cm^{-1} ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลของ แป้ง เส้นใย กลีเซอรอล และ ไฮโดรเพอร์ออกไซด์



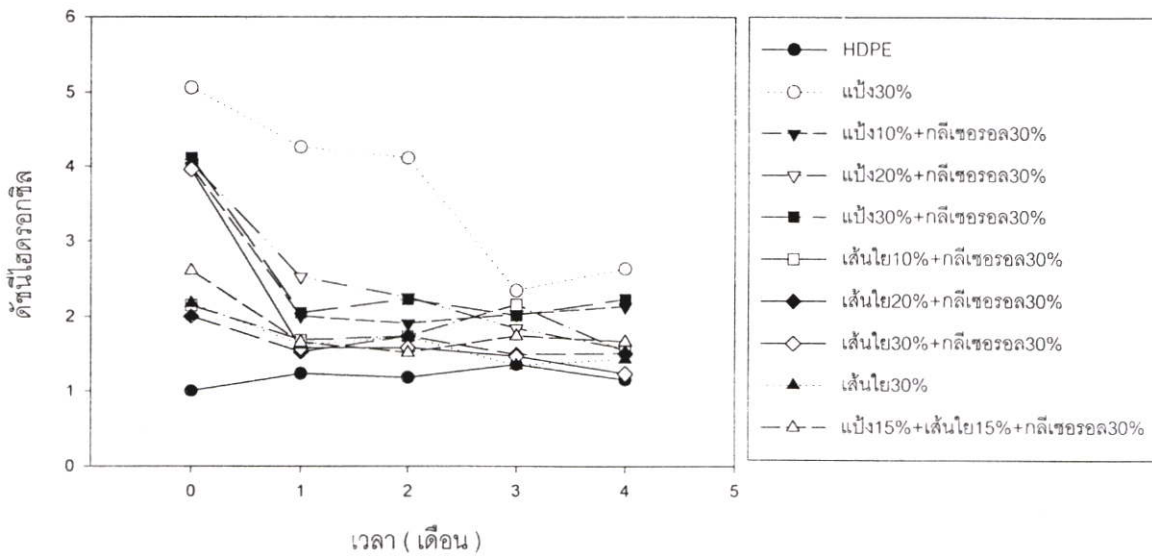
รูปที่ 4.39 กราฟ FTIR หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล แป้งหรือเส้นใย และไฮโดรเพอร์ออกไซด์[23]

- (a) หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล
- (b) หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งหรือเส้นใย
- (c) หมู่ไฮดรอกซิลของไฮโดรเพอร์ออกไซด์

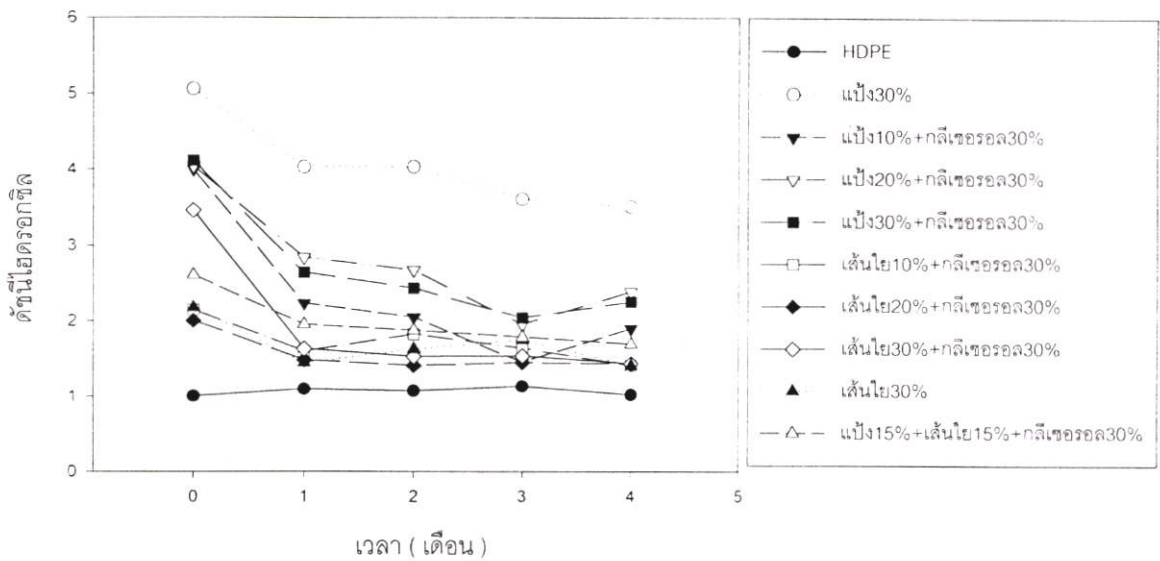
ผลการฝังกลบฟิล์มพอลิเมอร์ในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส เป็นเวลา 4 เดือนพบว่าการเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลดังรูปที่ 4.40-4.42



รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน

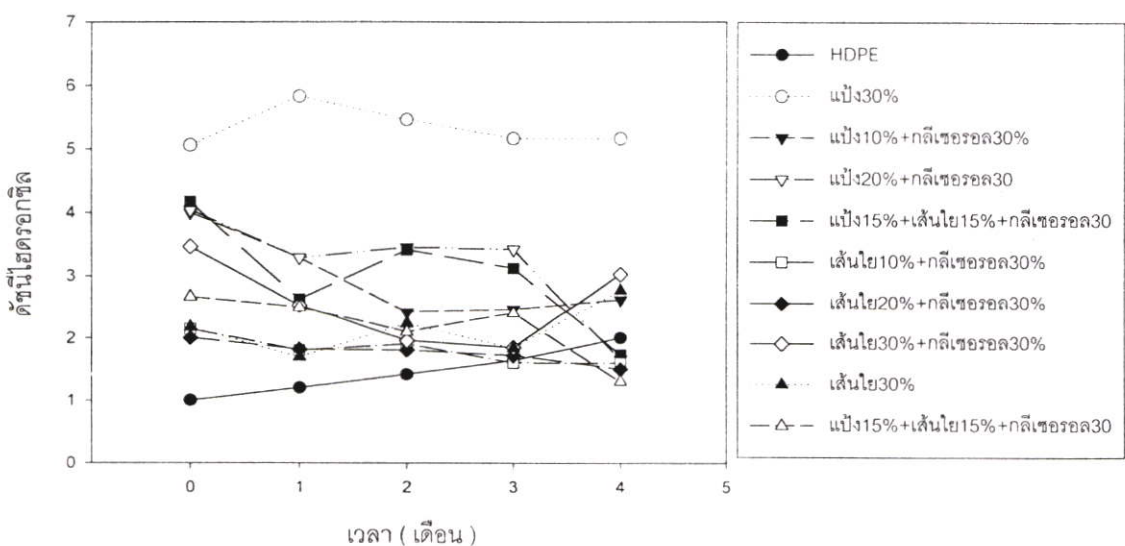


รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฝังกลบในสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูป 4.40-4.42 HDPE ที่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ไฮดรอกซิลน้อยมาก แต่พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการเปลี่ยนแปลงหมู่ไฮดรอกซิลโดยมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาควบคู่กับปริมาณหมู่คาร์บอนิล ซึ่งไม่เกิดขึ้นในสภาวะเดียวกันนี้ อาจสรุปได้ว่า ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลงนี้ไม่ใช่หมู่ไฮดรอกซิลของเพอร์ออกไซด์ เพราะถ้าเป็นหมู่ไฮโดรเพอร์ออกไซด์จะต้องพบปริมาณหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของไฮโดรเพอร์ออกไซด์ ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลงนี้จึงคาดว่าเป็นหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสที่มีอยู่ในแป้งและเส้นใยเป็นการลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์ในดินย่อยสลาย

ผลการฉายแสง UV พิล์มพอลิเมอร์เป็นเวลา 4 เดือนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาณดัชนีไฮดรอกซิลดังรูปที่ 4.43



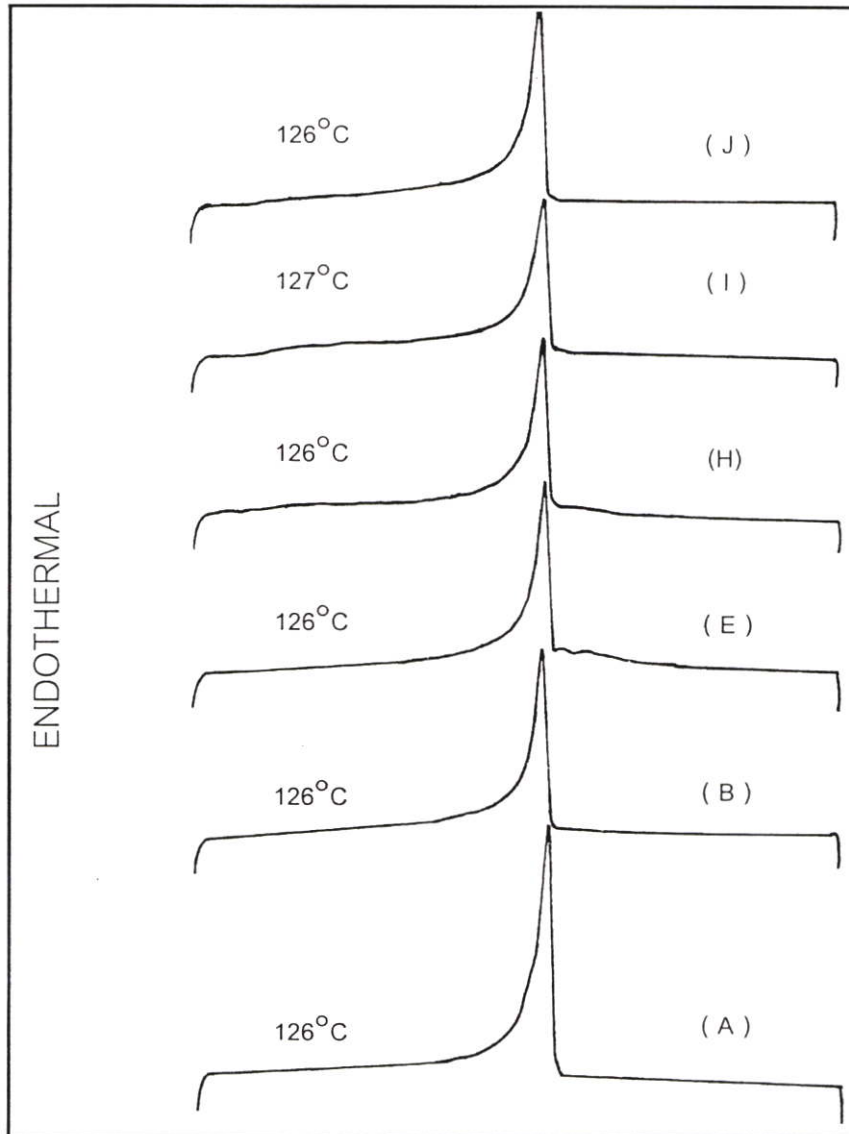
รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

ผลการฉายแสง UV พบว่า HDPE มีปริมาณไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการฉายแสงเพิ่มขึ้นแสดงว่าแสง UV ทำให้ HDPE เกิดออกซิเดชันแต่พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ในขณะที่ปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.38) แสดงว่าแสง UV อาจทำให้เกิดการสลายตัวของแป้งและเส้นใยได้มากกว่า การเกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชัน HDPE จึงทำให้ผลรวมของไฮดรอกซิลที่ได้มีลักษณะแนวโน้มลดลง

แสง UV ทำให้ HDPE เกิดออกซิเดชันเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์และสลายตัวให้หมู่คาร์บอนิลในที่สุด ในทุกสูตรหมู่คาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้นี้ สำหรับสูตรที่มีแป้งและเส้นใยผสม ให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลมากกว่าสูตร HDPE ที่ไม่ผสมทั้งนี้เนื่องจาก การผสมสารตัวเติมเหล่านี้ทำให้เกิดช่องว่างที่ผิวหน้าของฟิล์ม (ดูภาพจาก SEM) ซึ่งช่วยให้ออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยานี้ HDPE ได้ง่ายขึ้นเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์และสลายตัวให้หมู่คาร์บอนิลได้มากขึ้น

4.3 สมบัติทางความร้อน

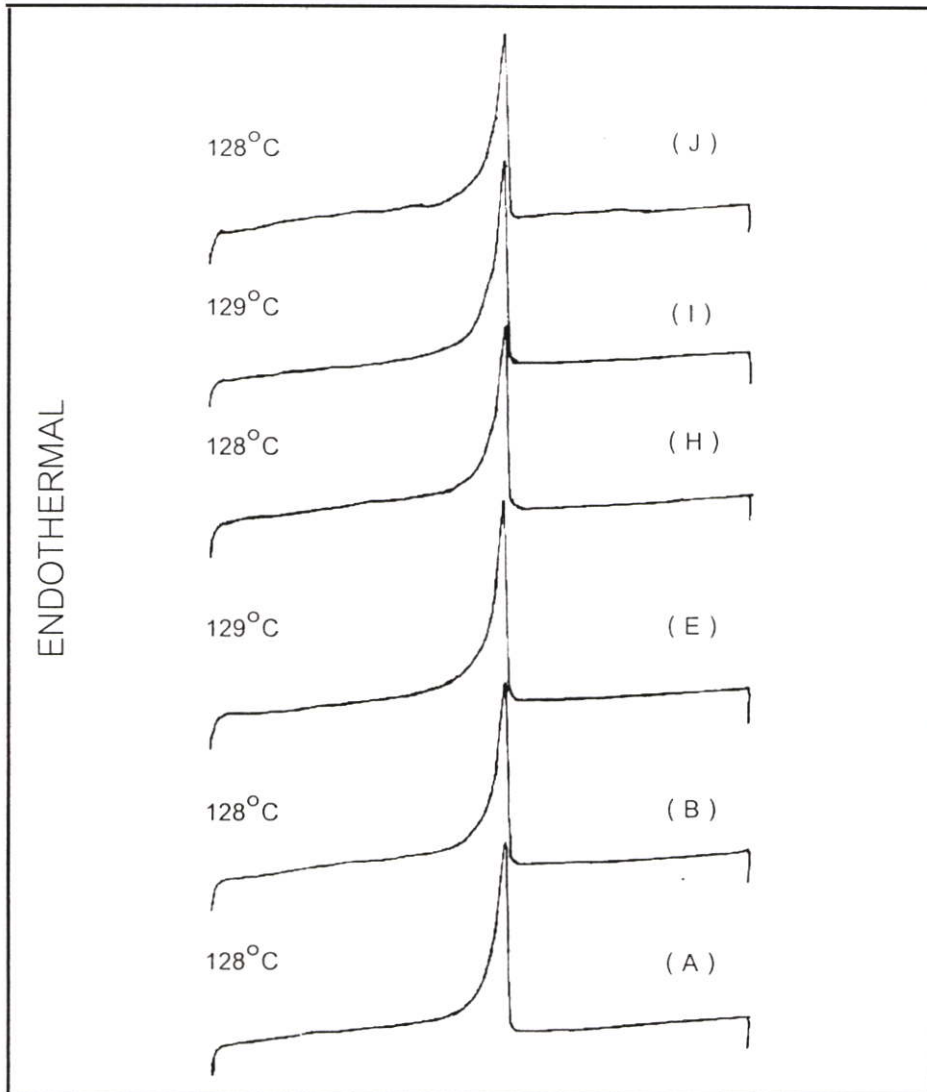
ทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ทุกสูตรก่อนการทดลองในสถานะต่างๆได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.44 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการทดลอง

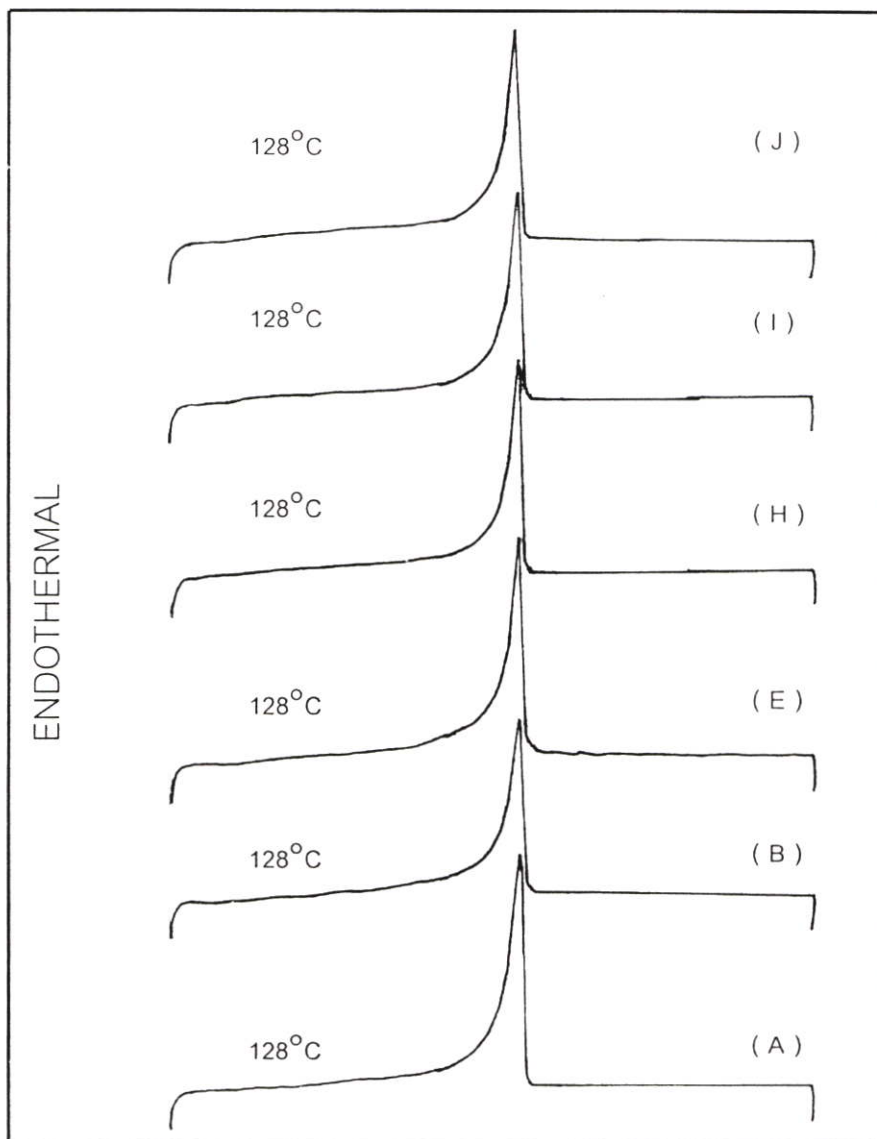
- | | |
|-------------------------------|---|
| (A) HDPE | (B) HDPE+ แป้ง30% |
| (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30% |
| (I) HDPE+เส้นใย30% | (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30% |

ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบใน
 สภาวะความชื้นน้อย ความชื้นมาก และ เบท ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.45-4.47



รูปที่ 4.45 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นน้อยเป็น
 เวลา 4 เดือน

- | | |
|--------------------------------|---|
| (A) HDPE | (B) HDPE+ แป้ง30% |
| (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30% |
| (I) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30 | (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30% |



รูปที่ 4.46 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบในสภาวะความชื้นมากเป็น
เวลา 4 เดือน

(A) HDPE

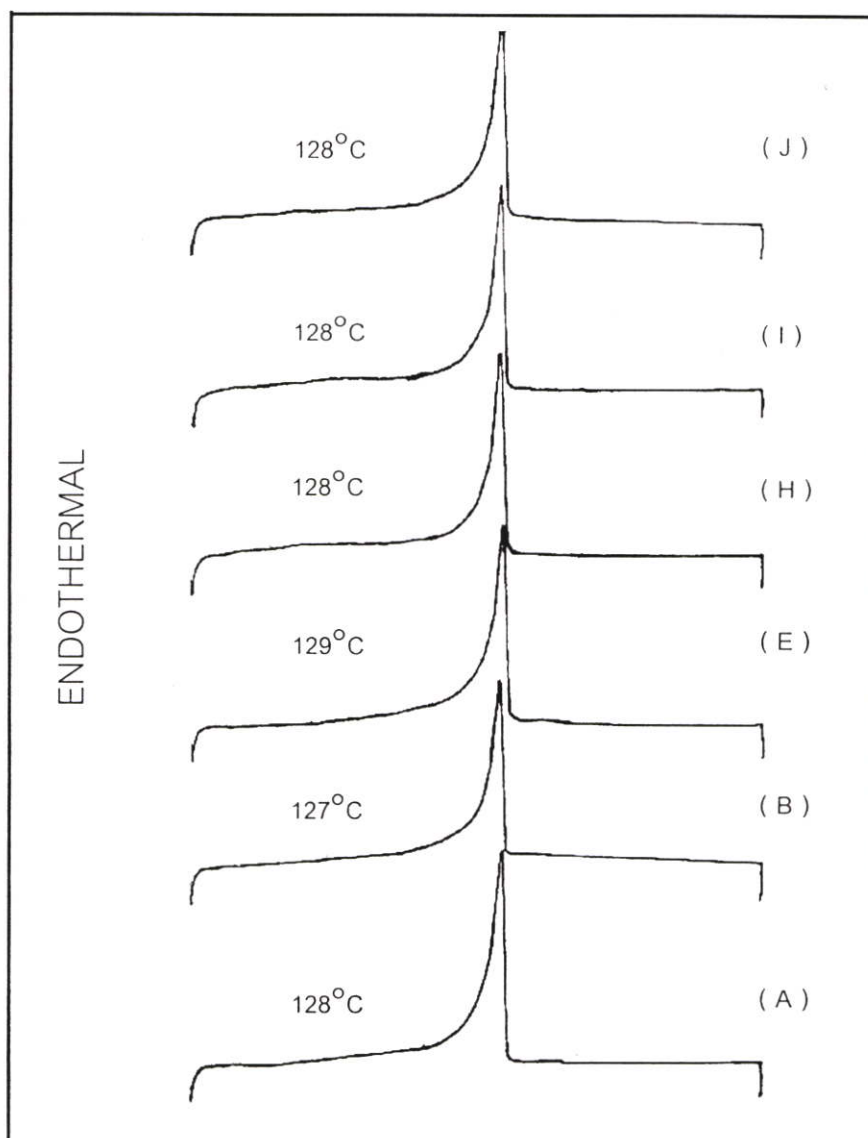
(B) HDPE+ แป้ง30%

(E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30%

(H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%

(I) HDPE+เส้นใย30%

(J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%



รูปที่ 4.47 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังกลบในสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน

- | | |
|-------------------------------|---|
| (A) HDPE | (B) HDPE+ แป้ง30% |
| (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30% |
| (I) HDPE+เส้นใย30% | (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30% |

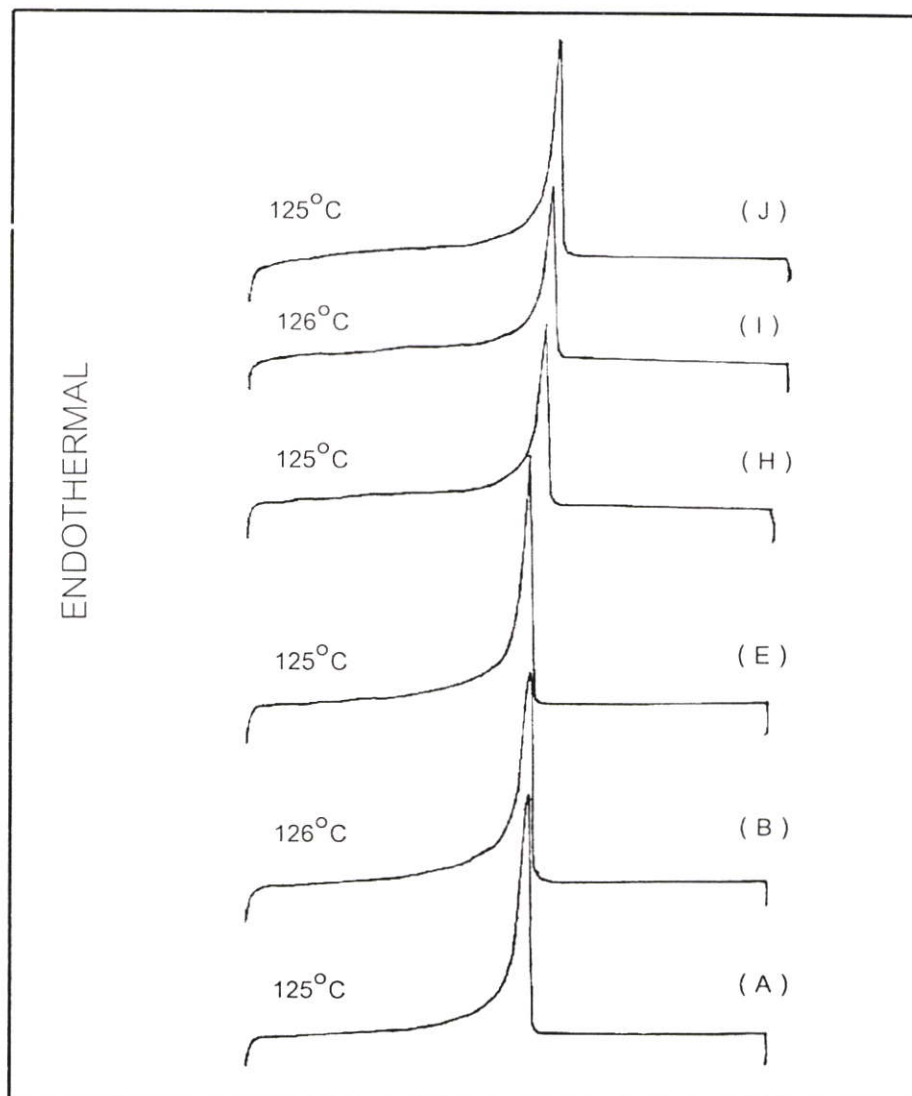
จากรูปที่ 4.44 ก่อนการทดลองฟิล์ม HDPE มีจุดหลอมเหลว 126°C ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การผสมแป้งและเส้นใยลงใน HDPE ไม่ทำให้จุดหลอมเหลว (T_m) ของ HDPE เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.45 ผลการทดลองพบว่า ในสภาวะความชื้นน้อย พิล์มพอลิเมอร์ที่มีและไม่มี
แป้ง เส้นใย หรือ กลีเซอรอล จะทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ HDPE ในช่วง $128-129^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูง
กว่าจุดหลอมเหลวของ HDPE ก่อนฝังกลบในดิน

จากรูปที่ 4.46 ผลการทดลองในสภาวะความชื้นมาก พบว่า HDPE ที่ไม่เติมสารตัวเติมมี
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว 128°C ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ทำการฝังในดินที่มีความชื้นน้อย แต่สูงกว่า
ชิ้นงานตัวอย่างก่อนการฝังกลบ ส่วนในสูตรอื่นๆอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ HDPE มีค่าใกล้เคียง
กัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างสูตรเดียวกันที่ฝังกลบในความชื้นน้อย แต่มีค่าสูงกว่า
อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของชิ้นงานตัวอย่างสูตรเดียวกับก่อนฝังกลบในดิน

จากรูปที่ 4.47 ผลการทดลองในสภาวะเบส พบว่า HDPE ที่ไม่เติมสารตัวเติมมีอุณหภูมิ
จุดหลอมเหลว 128°C ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ทำการฝังในดินที่มีความชื้นน้อย แต่สูงกว่าชิ้นงานตัว
อย่างก่อนการฝังกลบ การฝังกลบทั้ง 3 สภาวะ คือ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส พบว่าทุกสูตร
ของพอลิเมอร์มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังการฉายแสง UV
เป็นเวลา 4 เดือนได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.48 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

- | | |
|-------------------------------|---|
| (A) HDPE | (B) HDPE+ แป้ง30% |
| (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30% |
| (I) HDPE+เส้นใย30% | (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30% |

ผลการทดลอง พบว่า HDPE มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวลดลงจาก 126°C ในชั้นตัวอย่าง ก่อนทำการทดลองเป็น 125°C สำหรับสูตรต่างๆที่ผสมแป้งหรือเส้นใยมีจุดหลอมเหลวลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นตัวอย่างสูตรเดียวกันก่อนการฉายแสง UV และอยู่ในช่วง $125-126^{\circ}\text{C}$

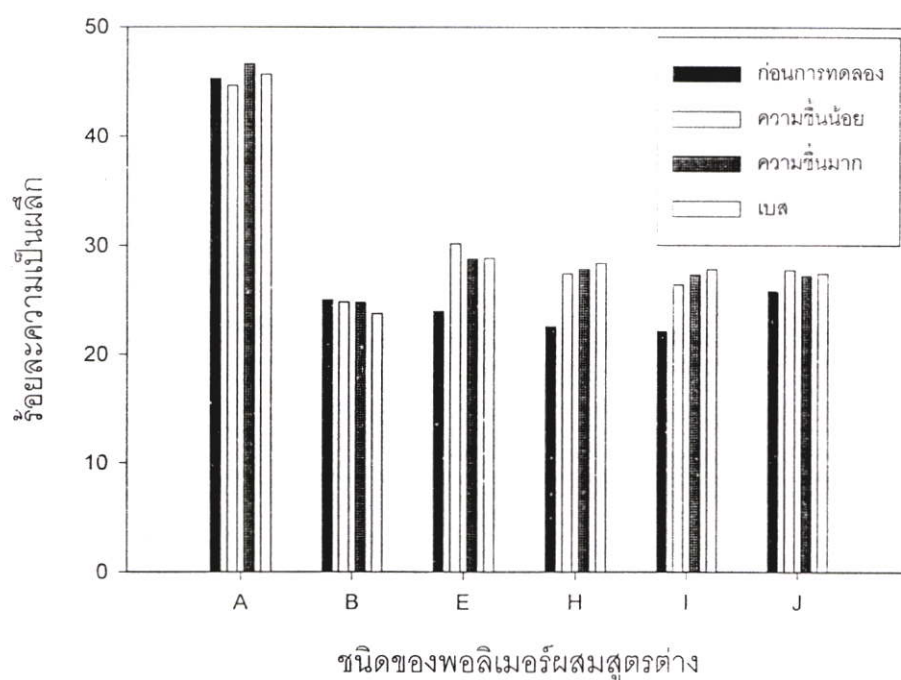
4.3.1 ความเป็นผลึก

ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์หาได้จากเครื่อง Differential Scanning Calorimeter นำมาคำนวณจากสูตร

$$\text{ร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_m \text{ ของพอลิเมอร์ผสม} \times 100}{\Delta H_m \text{ ของ HDPE 100\%}}$$

$$\text{ค่าความเป็นผลึกของ HDPE 100\%} = 293.1 \text{ J/g [24]}$$

ผลการทดลองจาก DSC สามารถหาค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อน ฝังกลบและหลังฝังกลบในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส เป็นเวลา 4 เดือน ได้ความเป็นผลึกดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในสภาวะต่างๆ

(A) HDPE

(B) HDPE+ แป้ง30%

(E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30%

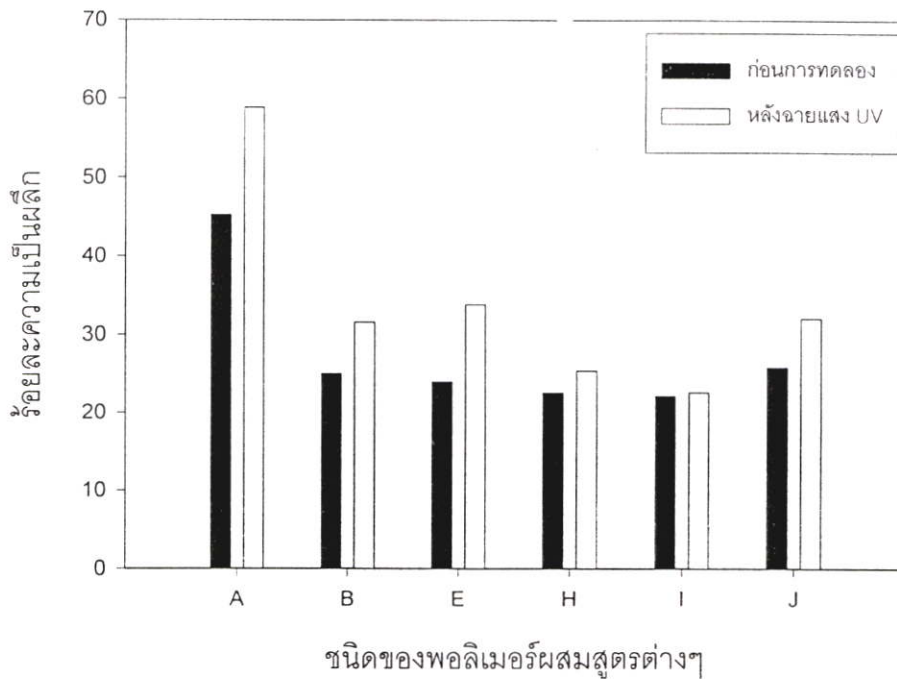
(H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%

(I) HDPE+เส้นใย30%

(J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%

ผลการทดลอง เมื่อฝังกลบในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส เป็นเวลา 4 เดือน พบว่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่าที่ไม่ได้ฝังกลบ ยกเว้น HDPE และ HDPE ผสมแป้งจะมีค่าความเป็นผลึกใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ฝังกลบ

ผลการทดลองจาก DSC สามารถหาค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนฉายแสง UV และหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน ได้ความเป็นผลึกดังรูปที่ 4.50



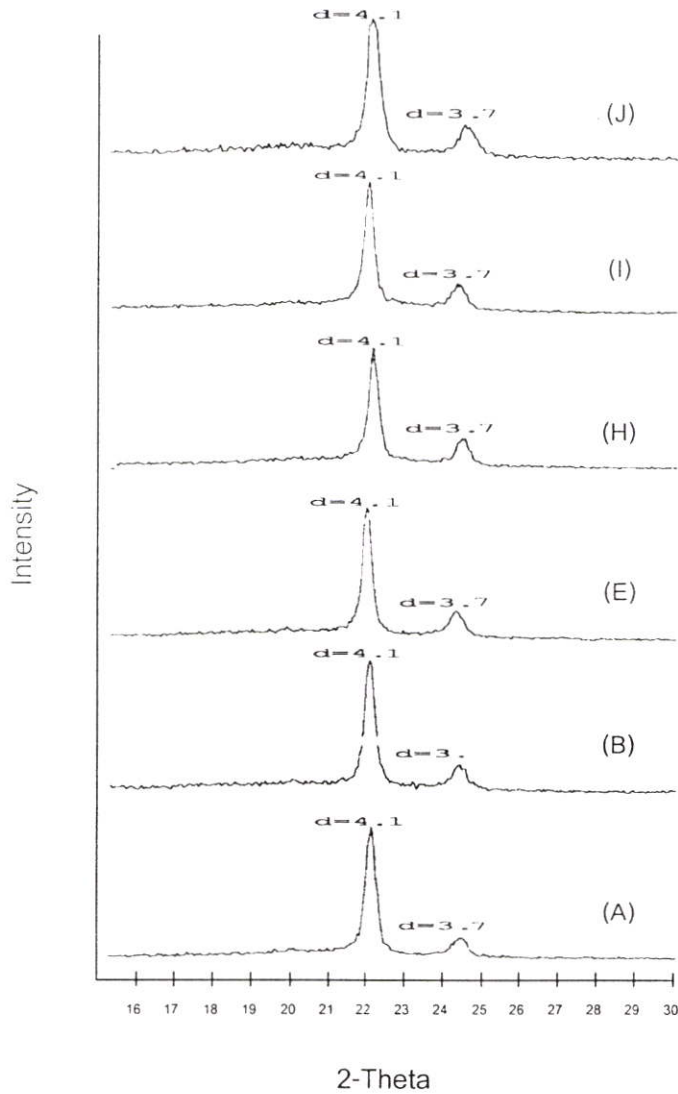
รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในสภาวะก่อนและหลังฉาย UV

- | | |
|-------------------------------|---|
| (A) HDPE | (B) HDPE+ แป้ง30% |
| (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30% |
| (I) HDPE+เส้นใย30% | (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30% |

ผลการทดลอง เมื่อฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน พบว่า ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่าที่ไม่ได้ฉายแสง UV ยกเว้นสูตรที่ผสมเส้นใย (I) HDPE ที่ไม่ได้ผสมให้ความเป็นผลึกสูงสุด ปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการตกผลึกของสายโซ่ที่เกิดจากการตัดขาดเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน [3] นอกจากนี้ปริมาณผลึกหลังฉายแสง UV ของสูตรที่ผสมแป้งสูงกว่าสูตรที่ผสมเส้นใย

4.4 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์มพอลิเมอร์

การตรวจสอบโดยใช้ XRD (X-Ray-Diffraction) ดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนทำการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

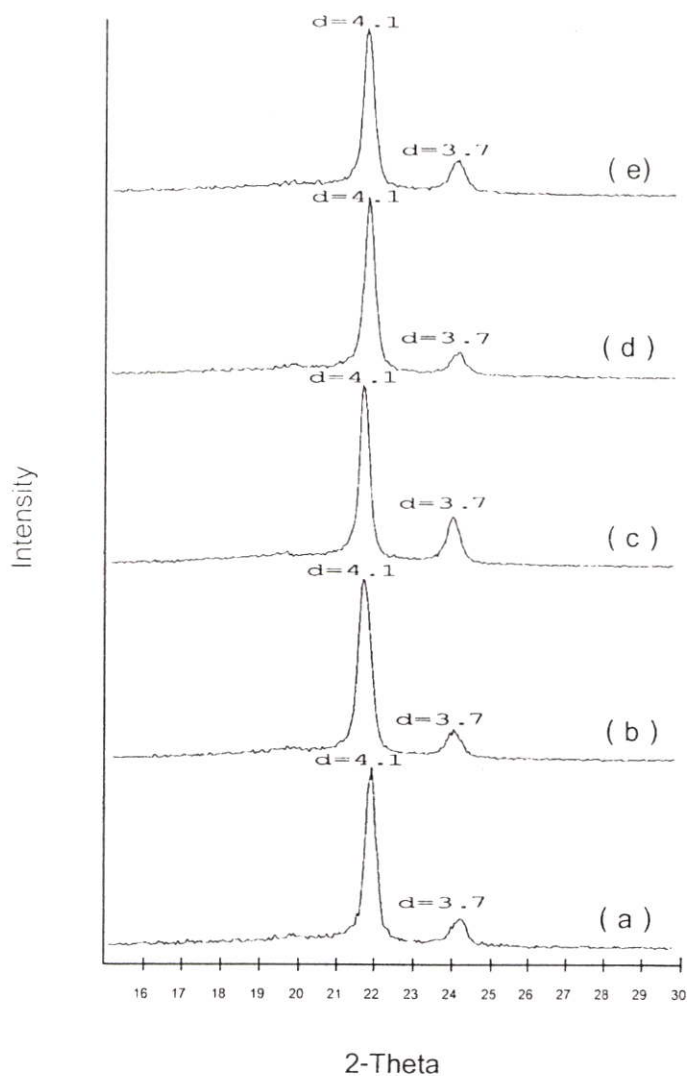


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนทำการทดลอง

- (A) HDPE
- (B) HDPE+แป้ง 30%
- (E) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30%
- (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30%
- (I) HDPE+เส้นใย 30%
- (J) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล30%

การตรวจสอบโดยใช้ XRD (X-Ray-Diffraction) ดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์มพอลิเมอร์หลังฝังกลบในสภาวะ ความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบส และหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน เปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนทำการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

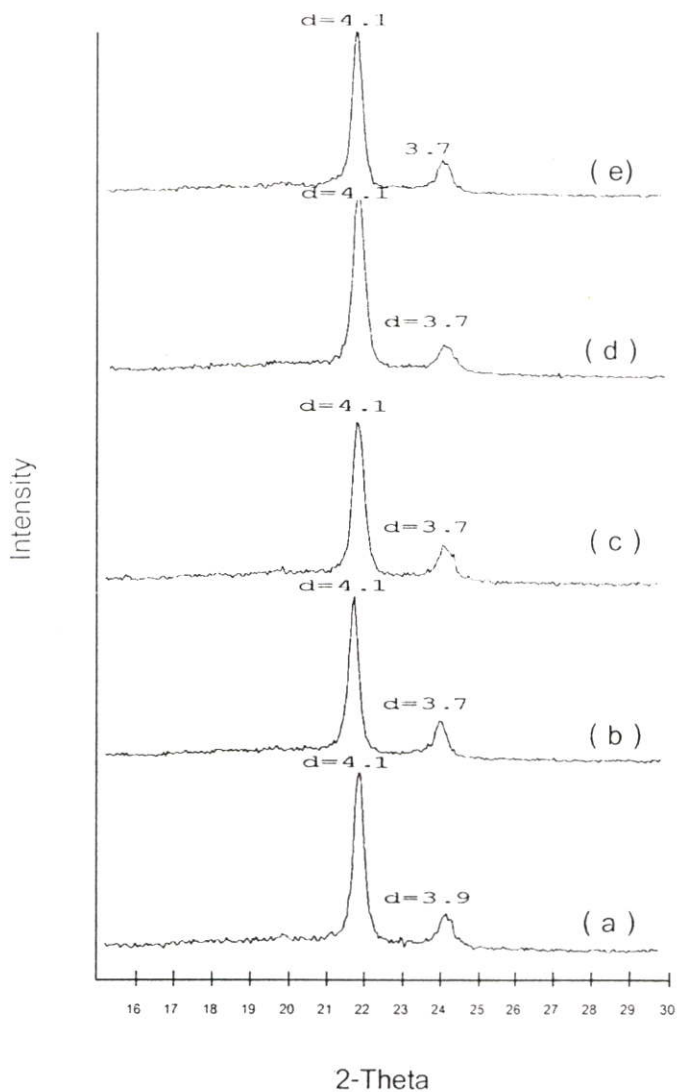
HDPE (A) ก่อนทำการทดลองและหลังการทดลอง



รูปที่ 4.52 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE (A) ก่อนและหลังการทดลอง

- (a) HDPEก่อนการทดลอง
- (b) HDPEหลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPEหลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPEหลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (e) HDPEหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

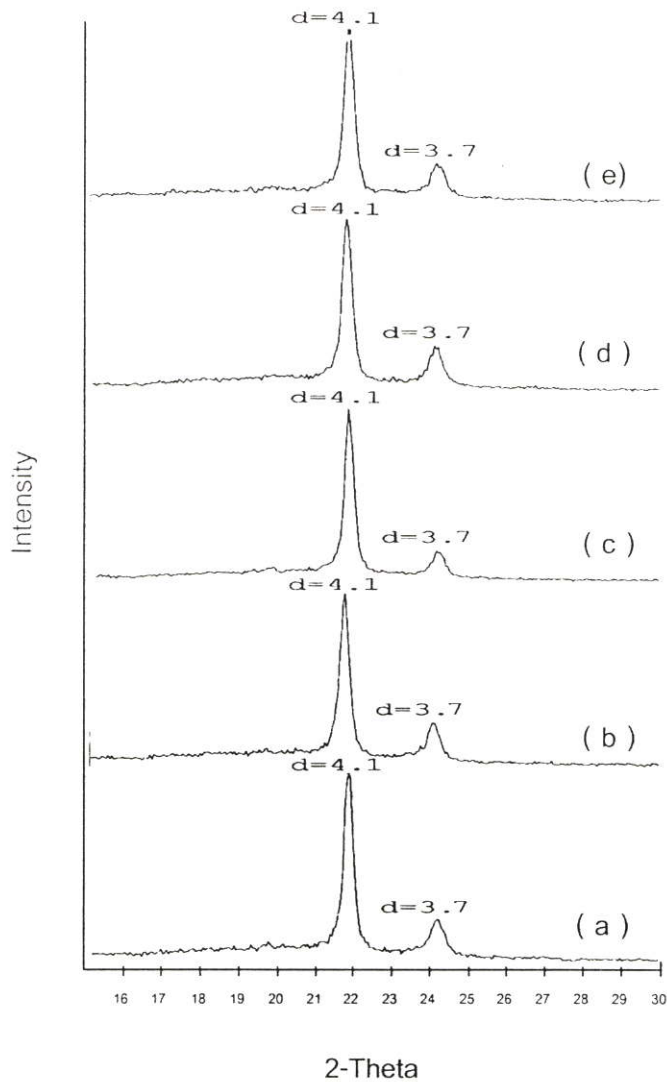
ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบ HDPE+แป้ง 30% (B) ก่อนและหลังการทดลอง
ในสถานะต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 แสดง กราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+แป้ง 30% (B) ก่อนและหลังการทดลอง

- (a) HDPE+แป้ง 30% ก่อนการทดลอง
- (b) HDPE+แป้ง 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+แป้ง 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+แป้ง 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (e) HDPE+แป้ง 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

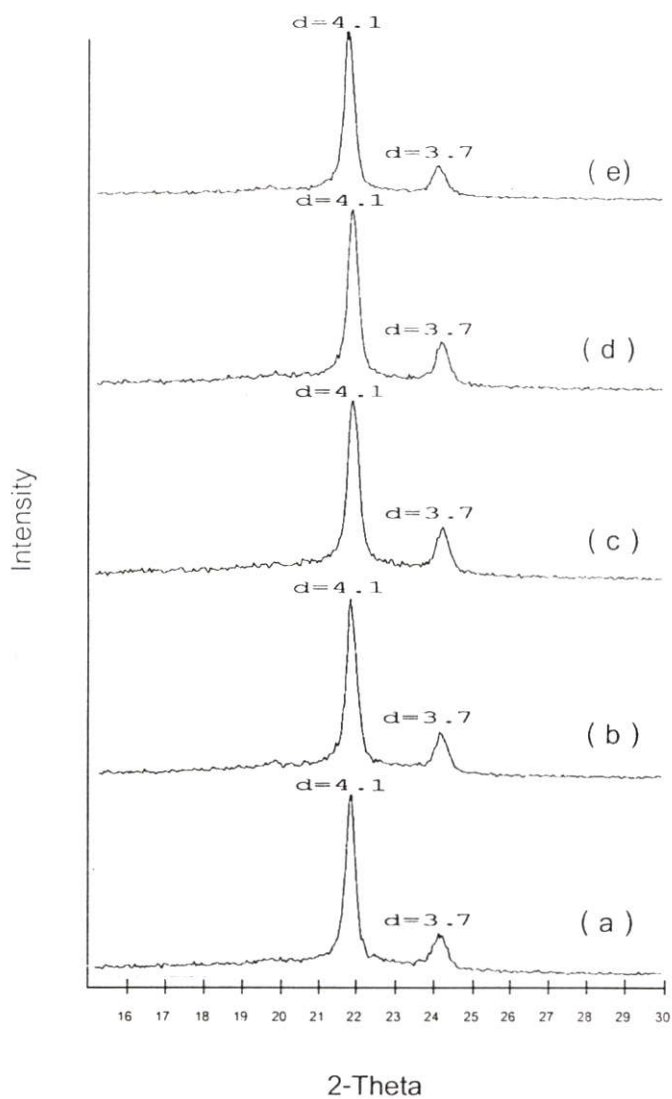
ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบ HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% (E) ก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30%(E) ก่อนและหลังการทดลอง

- (a) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% ก่อนการทดลอง
- (b) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (e) HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

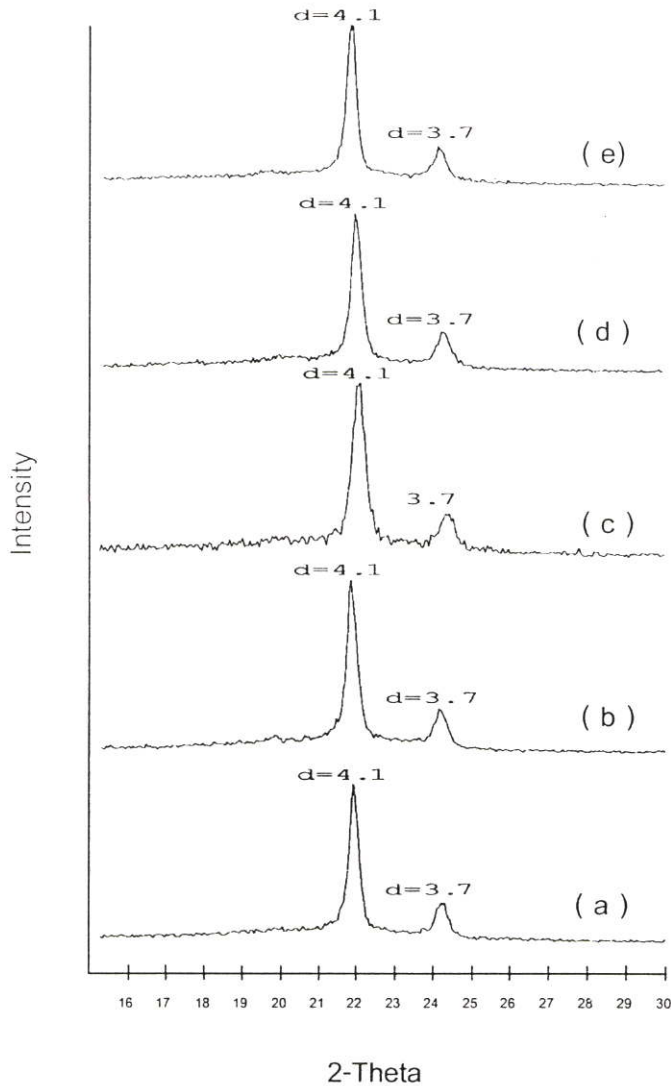
ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบ HDPE+เส้นใย 30% (I) ก่อนและหลังทำการทดลองได้
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30% (I) ก่อนและหลังการทดลอง

- (a) HDPE+เส้นใย 30% ก่อนการทดลอง
- (b) HDPE+เส้นใย 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+เส้นใย 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+เส้นใย 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (e) HDPE+เส้นใย 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

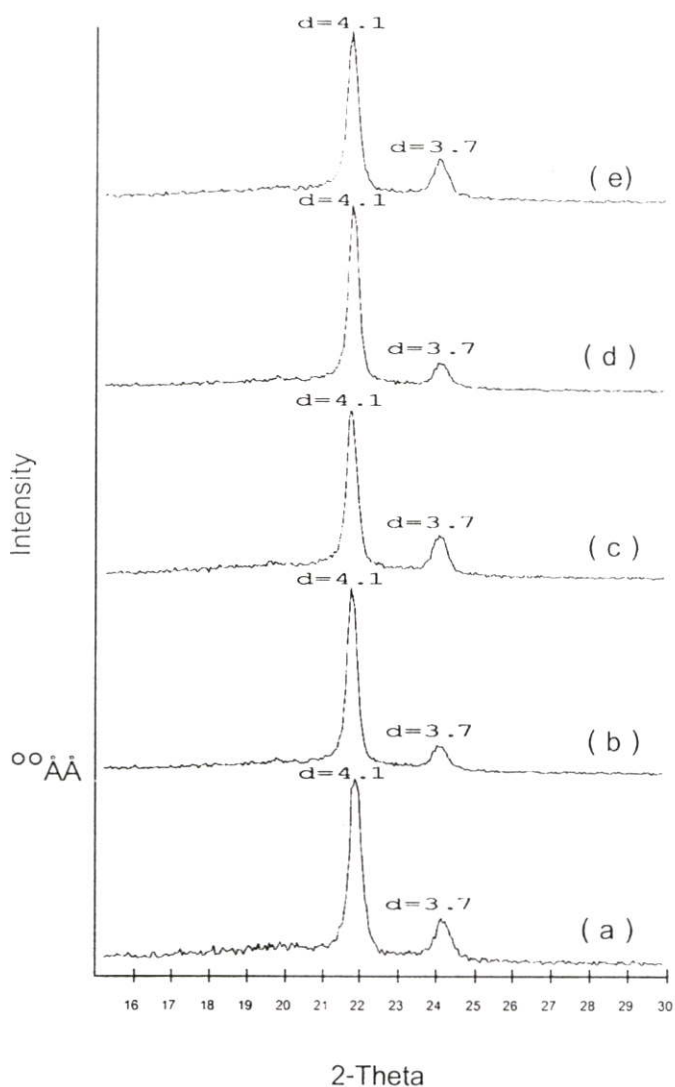
ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบ HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% (H) ก่อนและ
 หลังการทดลองผลการทดลองดังรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.56 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%(H) ก่อนและหลังการ
 ทดลอง

- (a) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% ก่อนการทดลอง
- (b) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4เดือน
- (c) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (e) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบ HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% (J) ก่อนและหลังทำการทดลองดังรูปที่ 4.57



รูปที่ 4.57 แสดงกราฟ XRD ของฟิล์ม HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% (J) ก่อนและหลังการทดลอง

- (a) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% ก่อนการทดลอง
- (b) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน
- (c) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะความชื้นมากเป็นเวลา 4 เดือน
- (d) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% หลังฝังกลบสภาวะเบสเป็นเวลา 4 เดือน
- (e) HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

จากรูป 4.51 พบว่าพอลิเมอร์ทุกสูตรก่อนการทดลองมีพีค 2-Theta อยู่ที่ 21.7-21.9 องศา มีค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีค 2-Theta ที่ 24.1-24.2 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน

จากรูป 4.52 พบว่าฟิล์ม HDPE (A) ทั้งก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆได้กราฟมีลักษณะเหมือนกันคือพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 21.7--21.9 องศา มีค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 24.1-24.3 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE ก่อนการทดลองและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆพบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากรูป 4.53 พบว่า HDPE+แป้ง30% (B) ทั้งก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆได้กราฟมีลักษณะเหมือนกันคือพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 21.7-21.9 องศา ค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 24.1-24.9 องศา ค่า d อยู่ที่ 3.7 Å เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE+แป้ง30% ก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆพบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากรูป 4.54 พบว่าฟิล์ม HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% (E) ทั้งก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆได้กราฟมีลักษณะเหมือนกันคือพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 21.6-21.7 องศา มีค่า d อยู่ 4.1 Å ที่และพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 24.0-24.1 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30% ก่อนการทดลองและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆพบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากรูป 4.55 พบว่าฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30% (I) ก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆได้กราฟมีลักษณะเหมือนกันคือพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 21.7-21.8 องศา ค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 24.0-24.2 องศา ค่า d อยู่ที่ 3.7 Å เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE+ เส้นใย 30% ก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆพบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน

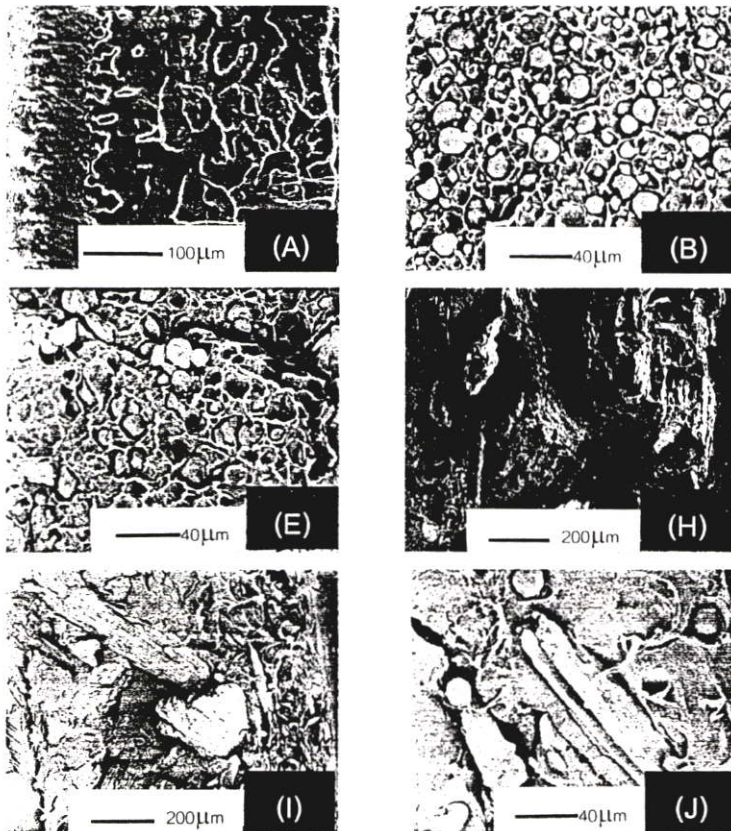
จากรูป 4.56 พบว่าฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% (H) ทั้งก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆได้กราฟมีลักษณะเหมือนกันคือพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 21.7-21.9 องศา มีค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 24.0-24.3 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30% ก่อนการทดลองและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆพบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากรูป 4.57 พบว่าฟิล์ม HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% (J) ทั้งก่อนและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆได้กราฟมีลักษณะเหมือนกันคือพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 21.7-21.9 องศา มีค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีคที่ 2-Theta อยู่ที่ 24.0-24.2 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE+เส้นใย 15%+แป้ง 15%+กลีเซอรอล 30% ก่อนการทดลองและหลังการทดลองในสภาวะต่างๆพบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน

4.5 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.5.1 สัณฐานวิทยาของตัวอย่าง

ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของแป้ง เส้นใยชานอ้อยที่มีกลีเซอรอลและไม่มีกลีเซอรอล ในพอลิเมอร์ผสม โดยนำชิ้นงานจุ่มในไนโตรเจนเหลว แล้วหักชิ้นงานจากนั้นตัดชิ้นงานที่ผิวรอยหักนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM รูป(A)กำลังขยาย 150 เท่า (B)และ(C) กำลังขยาย 603เท่า (D)และ(E) กำลังขยาย 700 เท่า (F) กำลังขยาย 375 เท่า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.58 ภาพจาก SEM แสดงการกระจายตัวของแป้ง เส้นใยโดยมีกลีเซอรอลและไม่มีกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสม

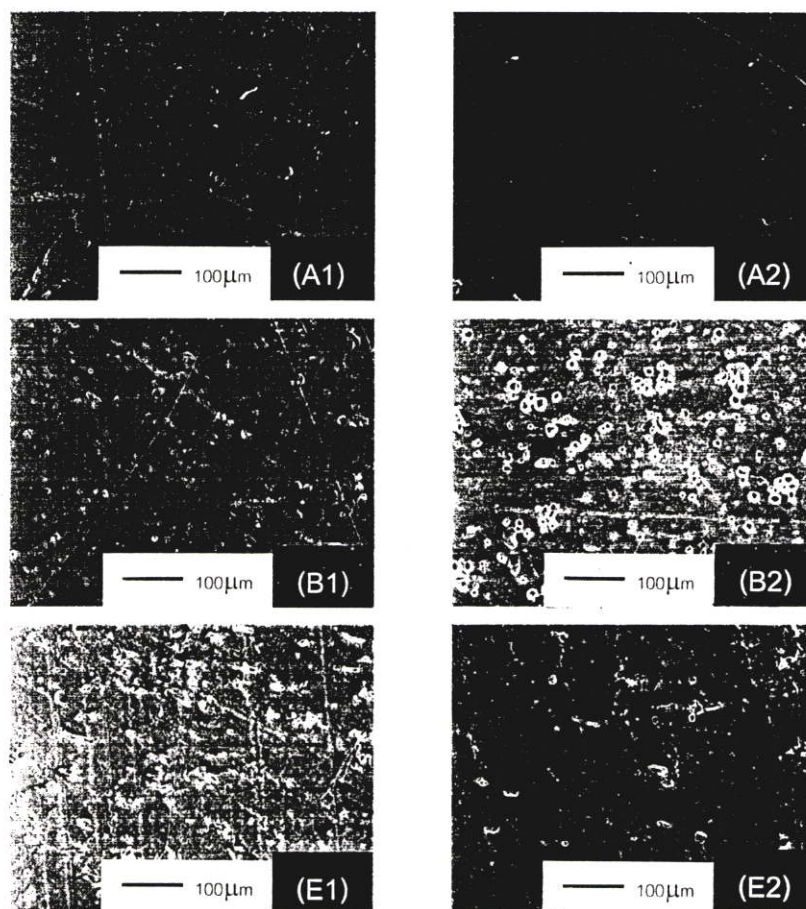
- | | |
|-------------------------------|---|
| (A) HDPE | (B) HDPE+ แป้ง30% |
| (E) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30% | (H) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30% |
| (I) HDPE+เส้นใย30% | (J) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30% |

จากรูปที่ 4.58 พบว่า รอบๆเส้นใยและแป้งมีช่องว่างอยู่ระหว่างเนื้อ HDPE แสดงว่า แรงยึดติดมีน้อย เมื่อเติมกลีเซอรอล 30% (E) พบว่า กลีเซอรอลช่วยหล่อลื่นแป้งได้ดีกว่าหล่อลื่น

เส้นใย (H) และลดช่องว่างระหว่างเนื้อ HDPE ในตัวอย่างที่ใช้แบ่งได้ดีกว่า

4.5.2 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังการฝังดิน

ผลการทดลองการฝังกลบแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ในสภาวะที่ความชื้นน้อย ความชื้นมาก และเบส เป็นระยะเวลา 4 เดือน นำแผ่นฟิล์มตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 150 เท่า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.59-4.62 ตามลำดับ ผลการฝังกลบสภาวะความชื้นน้อยได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.59 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบในดินที่มีความชื้นน้อยเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(A1) HDPE ก่อนฝังกลบ

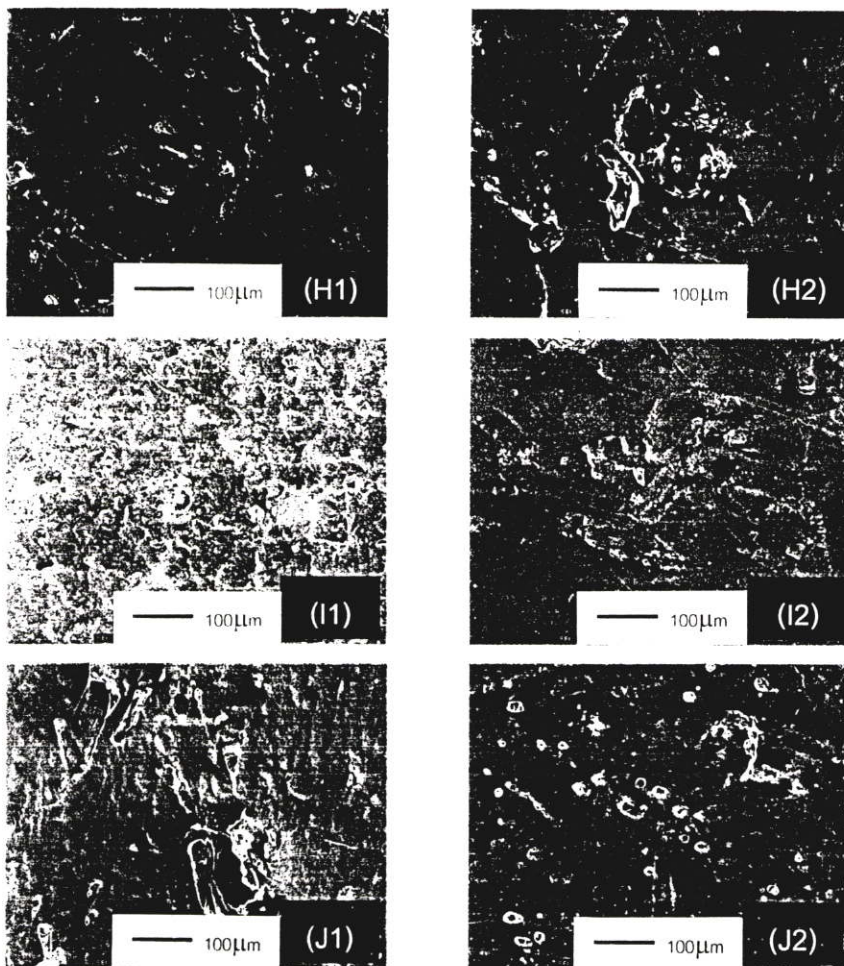
(A2) HDPE หลังฝังกลบ

(B1) HDPE+แบ่ง30%ก่อนฝังกลบ

(B2) HDPE+แบ่ง30%หลังฝังกลบ

(E1) HDPE+แบ่ง30%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(E2) HDPE+แบ่ง30%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ



รูปที่ 4.59(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบในดินที่มีความชื้นน้อยเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(H1) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(H2) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ

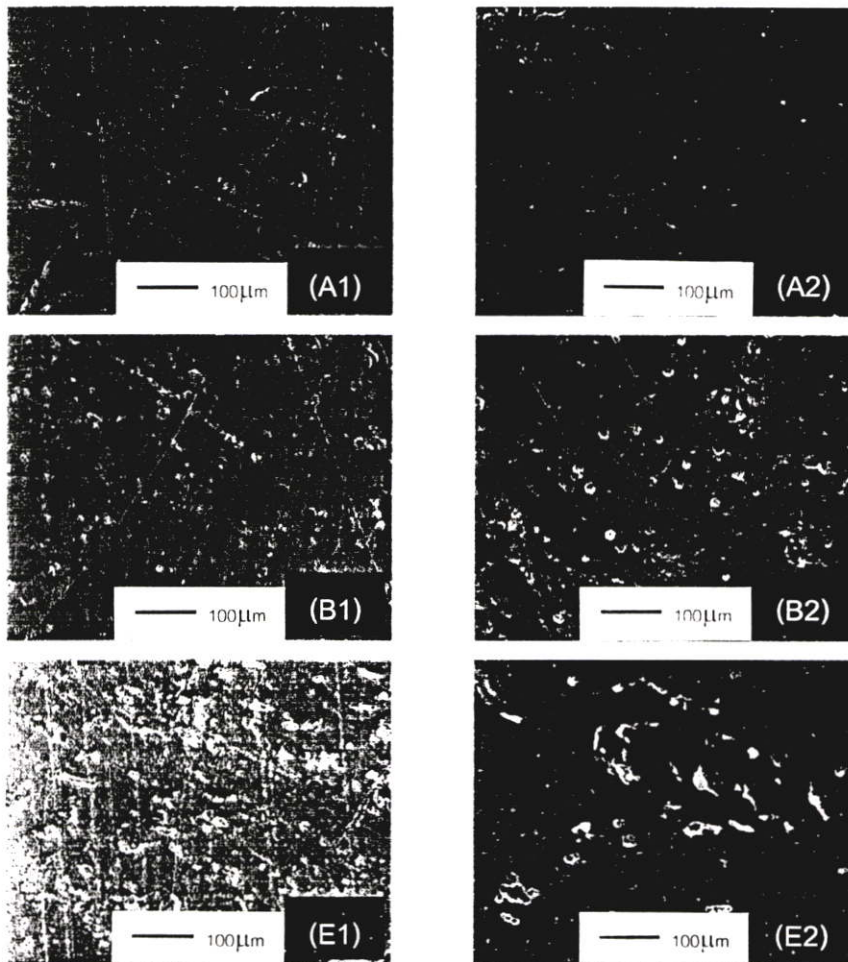
(I1) HDPE+เส้นใย30%ก่อนฝังกลบ

(I2) HDPE+เส้นใย30%หลังฝังกลบ

(J1) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(J2) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ

ผลการทดลองฝังกลบแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ในสภาวะความชื้นมากได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.60 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบในดินที่มีความชื้นมากเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(A1) HDPE ก่อนฝังกลบ

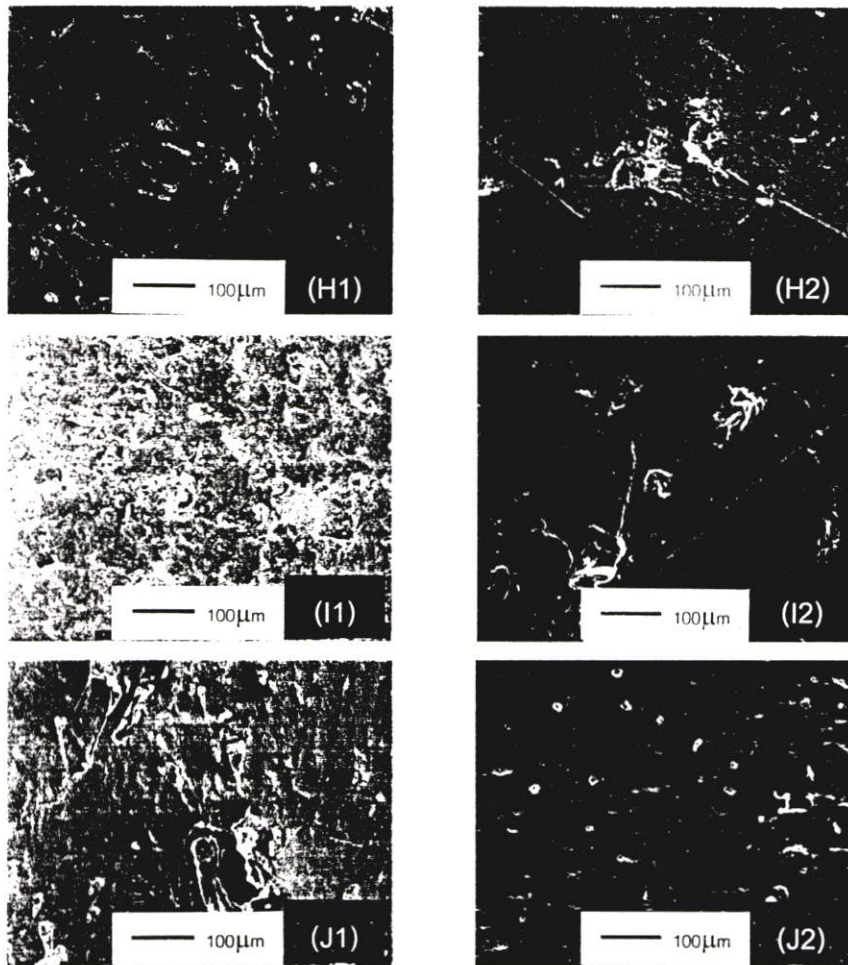
(A2) HDPE หลังฝังกลบ

(B1) HDPE+แบริ่ง30%ก่อนฝังกลบ

(B2) HDPE+แบริ่ง30%หลังฝังกลบ

(E1) HDPE+แบริ่ง30%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(E2) HDPE+แบริ่ง30%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ



รูปที่ 4.60(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลัง

การฝังกลบในดินที่มีความชื้นมากเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(H1) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(H2) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ

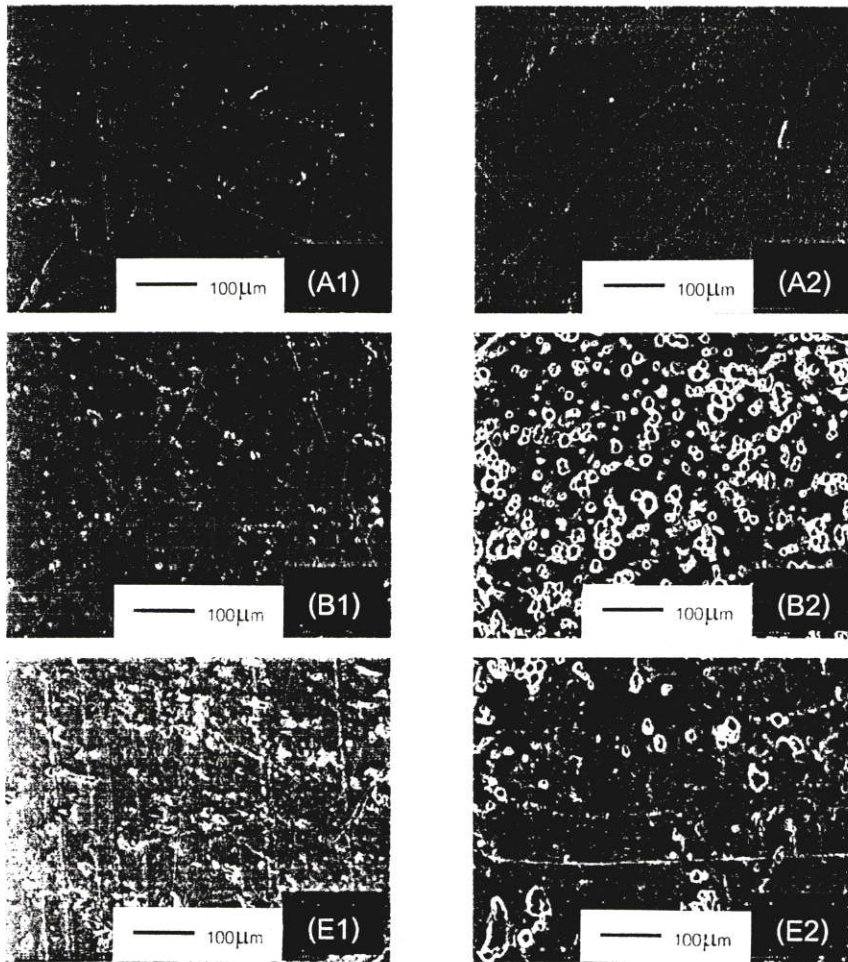
(I1) HDPE+เส้นใย30%ก่อนฝังกลบ

(I2) HDPE+เส้นใย30%หลังฝังกลบ

(J1) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(J2) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ

ผลการทดลองฝังกลบแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ในสภาวะเบสได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.61 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบในดินที่มีเบสเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(A1) HDPE ก่อนฝังกลบ

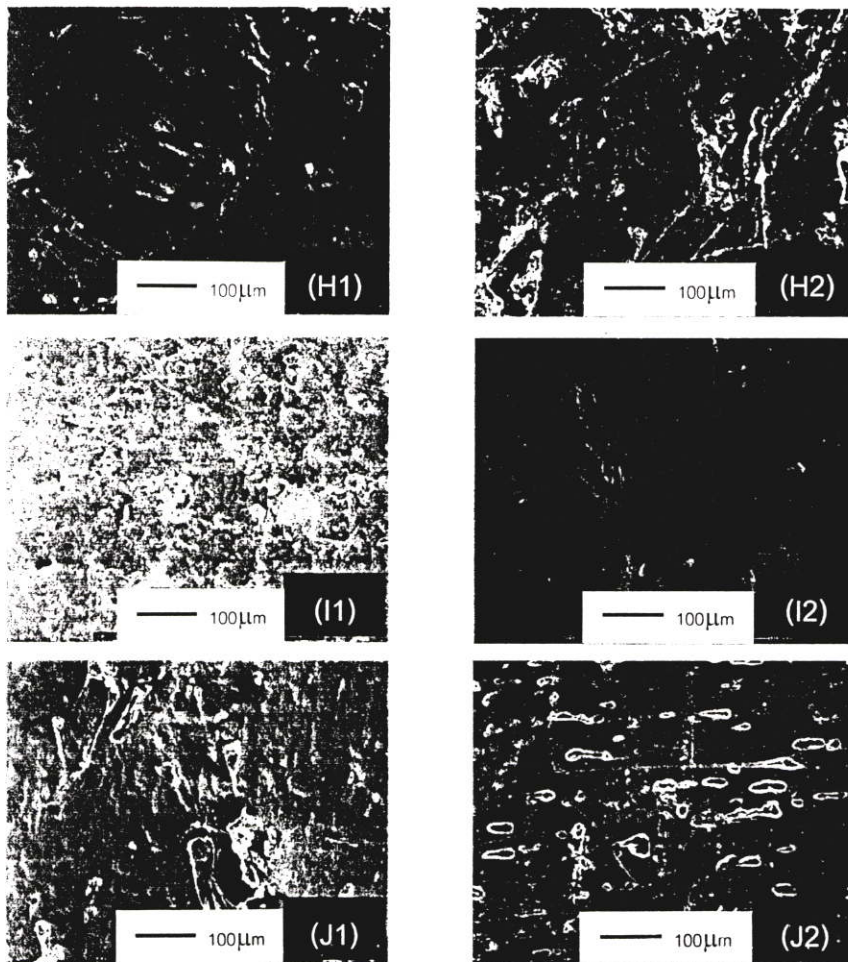
(A2) HDPE หลังฝังกลบ

(B1) HDPE+แป้ง30%ก่อนฝังกลบ

(B2) HDPE+แป้ง30%หลังฝังกลบ

(E1) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ

(E2) HDPE+แป้ง30%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ



รูปที่ 4.61(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฝังกลบในดินที่มีเบสเป็นระยะเวลา 4 เดือน

- (H1) HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ
- (H2) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ
- (I1) HDPE+เส้นใย30%ก่อนฝังกลบ
- (I2) HDPE+เส้นใย30%หลังฝังกลบ
- (J1) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%ก่อนฝังกลบ
- (J2) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%หลังฝังกลบ

จากรูปที่4.59 ผลการทดลองในสภาวะความชื้นน้อย พบว่า ผิวหน้าฟิล์ม HDPE มองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง แต่ HDPE ผสมกับแป้งทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลจะพบรูพรุนบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสอง ฟิล์ม HDPE ที่ผสมกลีเซอรอล (E2) เกิดรูพรุนน้อยกว่าที่ไม่ได้ผสมกลีเซอรอล B2 เมื่อพิจารณาฟิล์ม HDPE ผสมกับเส้นใยที่มีและไม่มีกลีเซอรอล พบว่า ฟิล์มที่ผสมกลีเซอรอล

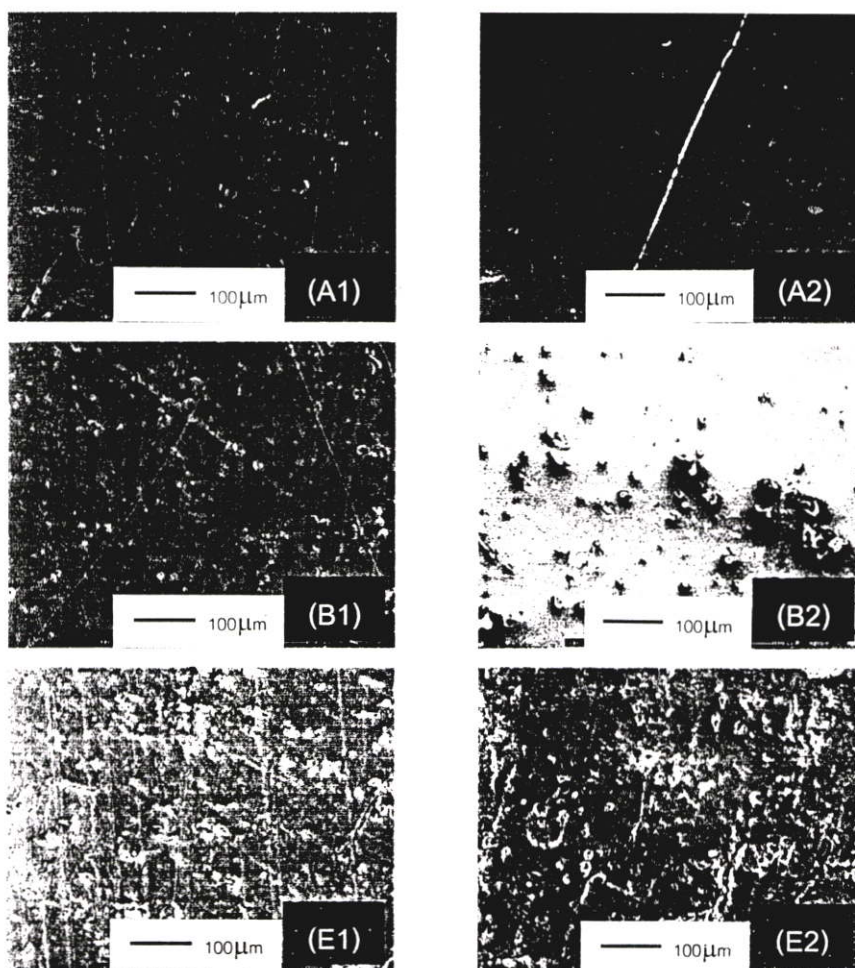
รอดมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อฝังกลบในสภาวะนี้ เมื่อพิจารณาพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างทุกสูตร จากรูปถ่าย SEM พบว่า HDPE ที่ไม่ผสมแป้งและเส้นใย พื้นผิวไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะการฝังกลบที่มีความชื้นน้อย ส่วนฟิล์มที่ผสมแป้งและไม่มีกลีเซอรอลจะมองเห็นรูพรุนเกิดขึ้นภายในเวลา 4 เดือน สำหรับฟิล์มที่ผสมเส้นใยและกลีเซอรอลจะมองเห็นรอยแตกกว้างเกิดขึ้นได้ชัดเจนเมื่อเรียงลำดับสภาพพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงมากหลังฝังกลบในดินที่มีความชื้นน้อยเป็นเวลา 4 เดือน สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ $B2 > J2 > E2 > I2 > H2 > A2$ นั่นคือตัวอย่างที่ผสมแป้งจะมีการย่อยสลายดีกว่าเส้นใย

จากรูปที่ 4.60 ผลการทดลองในสภาวะความชื้นมาก พบว่า ผิวหน้าฟิล์ม HDPE ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ HDPE ผสมกับแป้งทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์มีรูพรุน ฟิล์ม HDPE ที่ผสมกลีเซอรอล (E2) เกิดรูพรุนน้อยกว่าที่ไม่ได้ผสมกลีเซอรอล(B2) ฟิล์ม HDPE ที่ผสมกับเส้นใยที่มีและไม่มีกลีเซอรอลการเปลี่ยนแปลงมองไม่เห็นชัดเจน สำหรับฟิล์มที่มีแป้ง เส้นใย และกลีเซอรอล (J2) เกิดรูพรุนบ้างเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบผิวหน้าที่เกิดรูพรุน หลังการฝังกลบในดินที่มีความชื้นมาก สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ $B2 > E2 > J2 > I2 > H2 > A2$ นั่นคือ ตัวอย่างที่ผสมแป้งจะมีการย่อยสลายดีกว่าผสมเส้นใย

จากรูปที่ 4.61 ผลการทดลองในสภาวะเบส รูป (A1) (A2) พบว่า ผิวหน้าฟิล์ม HDPE ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ HDPE ผสมกับแป้งทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลพบพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์มีรูพรุน โดยฟิล์ม HDPE ที่ไม่ผสมกลีเซอรอลเกิดรูพรุนกระจายทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม (B2) ส่วนฟิล์มที่ผสมกลีเซอรอลเห็นรูพรุนเป็นกลุ่มๆขนาดรูพรุนใหญ่กว่าในรูป B2 ฟิล์ม HDPE ที่ผสมกับเส้นใยที่มีและไม่มีกลีเซอรอล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับฟิล์ม HDPE ที่ผสมแป้ง เส้นใย และกลีเซอรอล มีรูเกิดขึ้นบนผิวหน้าฟิล์ม เมื่อเปรียบเทียบผิวหน้าที่เกิดรูพรุน หลังการฝังกลบในดินที่มีสภาวะเบส สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ $B2 > E2 > J2 > I2 > H2 > A2$ ซึ่งคล้ายกับที่เกิดในสภาวะความชื้นมาก เมื่อเปรียบเทียบสภาวะกลบฝังทั้ง 3 สภาวะ สามารถเรียงลำดับสภาวะที่ทำให้เกิดรูพรุนที่ผิวได้ดังนี้ เบส>ความชื้นน้อย>ความชื้นมาก

4.5.3 ลักษณะพื้นผิวของขึ้นตัวอย่างก่อนและหลังการฉายแสง UV

ผลการทดลองฉายแสง UV โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าฟิล์มที่เกิดขึ้นหลังจากการฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน พบว่า ตัวอย่างที่มีการผสมแป้ง และเส้นใย สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับผิวหน้าฟิล์มก่อนฉายแสง UV



รูปที่ 4.62 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

(A1) HDPE ก่อนฉายแสง UV

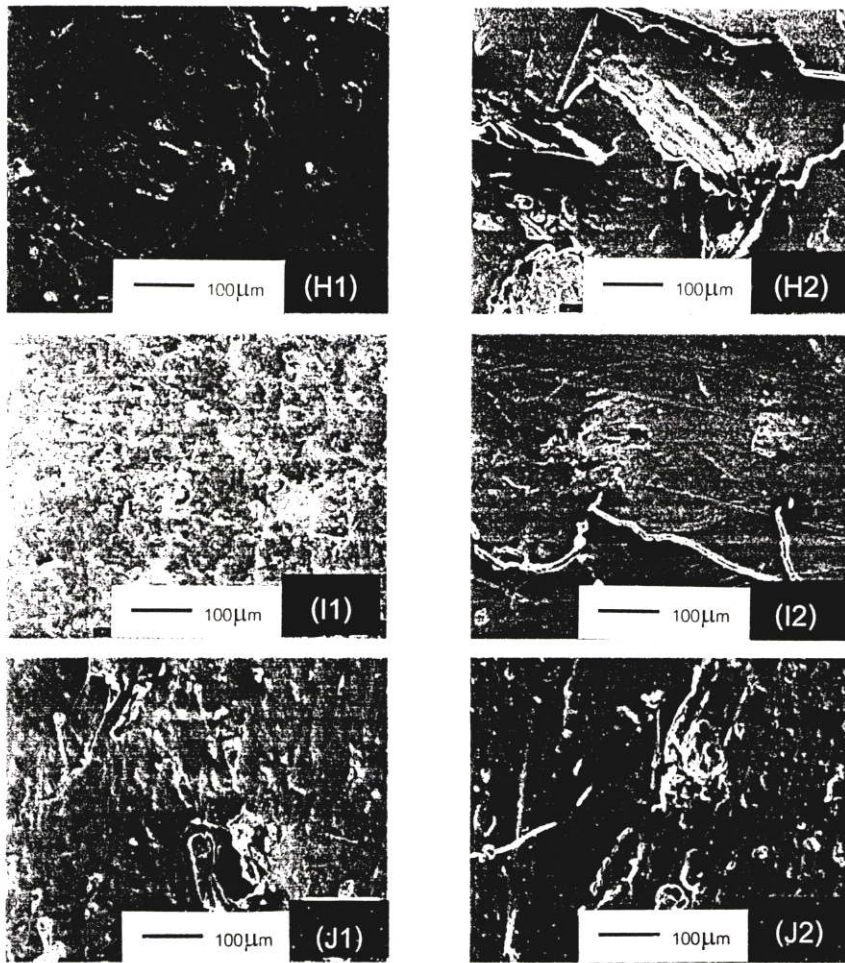
(A2) HDPE หลังฉายแสง UV

(B1) HDPE + แป้ง 30% ก่อนฉายแสง UV

(B2) HDPE + แป้ง 30% หลังฉายแสง UV

(E1) HDPE + แป้ง 30% HDPE + กลีเซอรอล 30% ก่อนฉายแสง UV

(E2) HDPE + แป้ง 30% HDPE + กลีเซอรอล 30% หลังฉายแสง UV



รูปที่ 4.62(ต่อ) ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน

- (H1) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30% ก่อนฉายแสง UV
 (H2) HDPE+เส้นใย30%+กลีเซอรอล30% หลังฉายแสง UV
 (I1) HDPE+เส้นใย30%ก่อนฉายแสง UV
 (I2) HDPE+เส้นใย30%หลังฉายแสง UV
 (J1) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%ก่อนฉายแสง UV
 (J2) HDPE+แป้ง15%+เส้นใย15%+กลีเซอรอล30%หลังฉายแสง UV

จากรูป A1 และ A2 เมื่อเปรียบเทียบผิวหน้า HDPE ก่อนฉายแสง UV และหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือนจะเห็นผิวหน้าฟิล์มเกิดการแตกร้าวลเล็กน้อย ฟิล์ม HDPE ที่ผสมกับแป้งก่อนฉายแสง UV (B1) ผิวหน้าของฟิล์มจะมีลักษณะนูน และหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือนผิวหน้าฟิล์มจะยุบตัวลงมองเห็นเม็ดแป้งมีลักษณะนูนดังรูป (B2) สำหรับฟิล์ม HDPE ผสมแป้งและกลีเซอรอลก่อนฉายแสง UV ดังรูป (E1) ผิวหน้าของฟิล์มแสดงให้เห็นการรวมกันเป็นกลุ่มของแป้ง

และมีลักษณะบวมลงไปหลังฉายแสง UV เป็นเวลา 4 เดือน ดังรูป (E2) รูปพรุนที่เกิดขึ้นต่างไปจากฟิล์ม HDPE ที่ผสมแป้งที่ไม่มีกลีเซอรอลในรูป (B2)

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์ม HDPE ผสมเส้นใยทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลกับฟิล์ม HDPE ผสมเส้นใย แป้ง กลีเซอรอล จะพบว่าฟิล์ม HDPE ผสมเส้นใยทั้งที่มีและไม่มีกลีเซอรอลเกิดการแตก ร้าวได้ดีกว่าฟิล์ม HDPE ผสมเส้นใย แป้ง และกลีเซอรอล

เปรียบเทียบรูป (I1) (I2) (H1) และ (H2) พบว่า ฟิล์มที่ผสมเส้นใยมีผิวหนังเรียบก่อนการฉายแสง และหลังฉายแสง UV 4 เดือน ผิวหนังเป็นรอยแตกโดยเฉพาะฟิล์ม (H2) ซึ่งผสมเส้นใยกับกลีเซอรอล สำหรับฟิล์มที่มีทั้งแป้งและเส้นใยผสมกลีเซอรอล ผิวหนังเกิดรอยแตกเป็นรูโดยเฉพาอย่างยิ่งบริเวณรอบๆเส้นใย ผลจาก SEM แสดงว่าแสง UV ทำให้ตัวอย่างที่ผสมเส้นใยมีผิวหนังแตกร้าวส่วนตัวอย่างที่มีแป้งจะเกิดการยุบตัวของพอลิเมอร์ทำให้เม็ดแป้งไหลออกจากนอกผิวและง่ายต่อการเป็นรูปพรุน

บทที่ 5

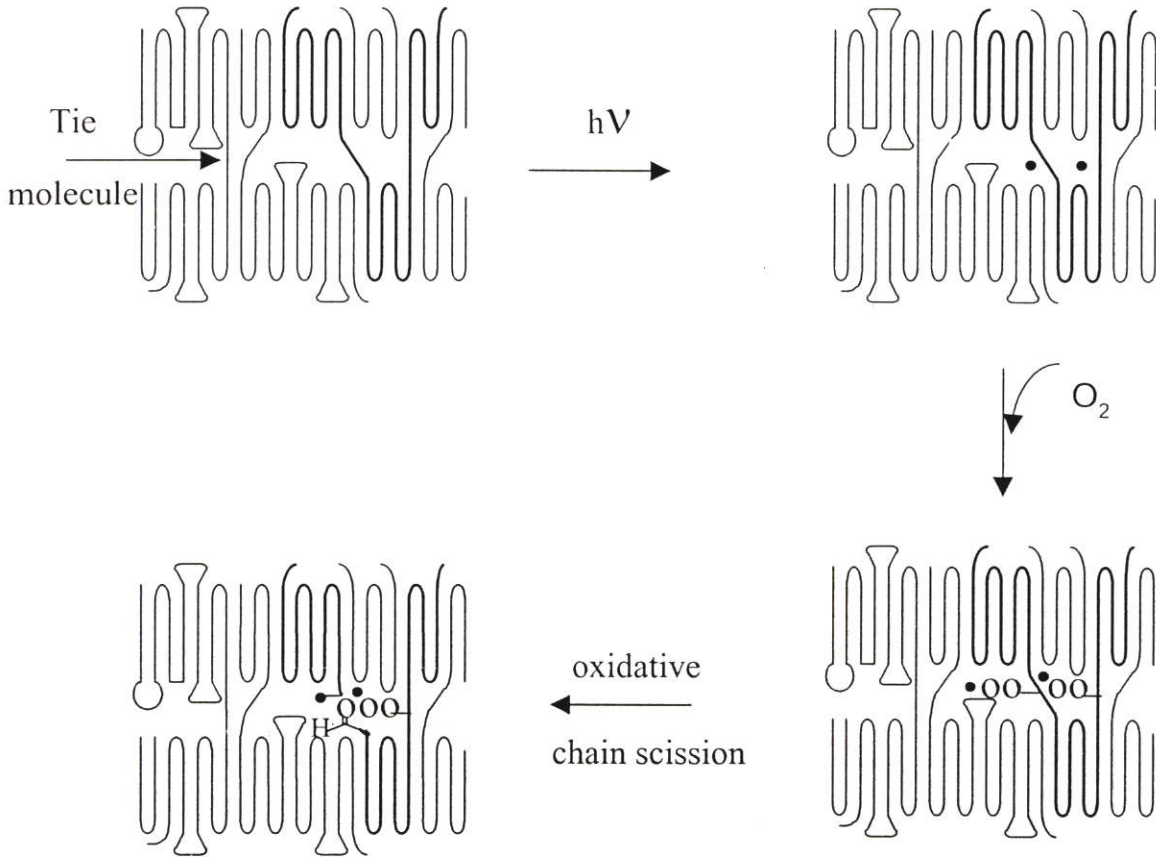
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ HDPE แปะ เส้นใยชานอ้อยและกลีเซอรอล อัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆทดสอบ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ตรวจหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลและไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก และสัณฐานวิทยา โดยเปรียบเทียบชิ้นงานก่อนการทดลองกับชิ้นงานหลังผ่านการฝังกลบในดินความชื้นน้อย ความชื้นมาก เบสและแสง UV ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. สมบัติเชิงกล เช่น ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและความทนแรงดึงของ HDPE ลดลงเมื่อเติมแปะหรือเส้นใยและเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น สมบัติเหล่านี้จะยิ่งด้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาการฉายแสง UV และสภาวะฝังกลบเป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกล

2. ในสภาวะการฝังกลบทุกสภาวะพอลิเมอร์ที่ผสมแปะให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใย

3. แสง UV ส่งผลต่อร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดชัดเจนโดยเฉพาะ HDPE ที่ไม่ผสมสารตัวเติม สามารถอธิบายได้ว่า พลังงานแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ในชั้นออสันฐาน ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้สัมพันธ์กับร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดลดลงดังรูปที่ 5.1 เมื่อพิจารณาบทบาทของสารเติม พบว่า แปะทำให้ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ภายใต้แสง UV ลดลงมากกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยแสดงว่าแปะเกิดการสลายตัวภายใต้แสง UV ได้เร็วกว่าเส้นใยจึงเสริมให้ ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเร็วกว่า อย่างไรก็ตาม การสลายตัวของแปะจะส่งผลกระทบต่อความทนแรงดึง เมื่อระยะเวลาการฉายแสง 3 เดือนขึ้นไป



รูปที่ 5.1 แสดงการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากแสง

4. การฉายแสง UV ทำให้ค่า T_m ของพอลิเมอร์ทุกสูตรลดลง ขณะที่ทำการฝังกลบทำให้ค่า T_m ของพอลิเมอร์สูงขึ้นประมาณ $2^\circ C$ ในทุกสูตร สอดคล้องกับสมบัติเชิงกล และสนับสนุนว่าการฉายแสงทำให้เกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่วนการฝังกลบอาจทำให้พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงสายโซ่ใหม่จึงทำให้ T_m สูงขึ้น

5. ทั้งการฉายแสงและการฝังกลบทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ทุกสูตรเพิ่มขึ้น

6. การฉายแสงทำให้ปริมาณหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์และคาร์บอนิลของพอลิเมอร์ทุกสูตรเพิ่มขึ้นเป็นการสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนการฝังกลบไม่พบหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นและยังเกิดการลดลงของหมู่ไฮดรอกไซด์ อันเนื่องจากจุลินทรีย์ในดินย่อยสลายแบ่งและดักในเซลล์โลส

7. แสง UV และสภาวะฝังกลบไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ HDPE

8. กลีเซอรอลทำหน้าที่ให้สารตัวเติมแบ่งผสมเข้ากันได้กับพอลิเมอร์

9. ภายใต้สภาวะฝึกลบ แบ่งช่วยเร่งการมีรูพรุนที่ผิวพอลิเมอร์ สภาวะที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนในพอลิเมอร์สูตรต่าง เรียงลำดับได้ดังนี้ เบส>ความชื้นน้อย>ความชื้นมาก>การฉายแสง และ HDPE ที่ผสมแบ่งอย่างเดียวก่เกิดการย่อยสลายในสภาวะเบสได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทุกสูตร

ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้ระยะเวลาฝึกลบมากกว่า 4 เดือนเพื่อจะได้ข้อมูลชัดเจนขึ้น
2. ควรเติมสารจากธรรมชาติชนิดอื่นที่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์เป็นการสนับสนุนการย่อยสลายทางแสง

เอกสารอ้างอิง

1. Catia , B. 1998. "Biodegradable materials present situation and future perspectives" *Macromol. Symp.* 135 : 193 –204.
2. Catia, B. 1998. "Properties and applications of Mater-Bi starch –based materials" *Polymer Degradation and Stability.* 59 : 263 –272.
3. Greizerstein, H.B. et. al. 1993. "Degradation of starch modified polyethylene bags in a compost field study" *Polymer Degradation and Stability.* 39 : 251 – 259.
4. Albertsson, A.C. et. al. 1992. " Susceptibility of enhanced environmentally degradable polyethylene to thermal and photo – oxidation" *Polymer Degradation and Stability.* 37 : 163 –171.
5. Griffin, G.J. 1973. *Conference on Degradation of Polymer and Plastics.* Institute of electrical engineer. London,15/1.
6. Albertsson, A.C. et. al. 1994. "Spectroscopic and mechanical chang in irradiated starch – fill LDPE" *Polymer Degradation and stability.* 45 : 173 -178.
7. Shah, P.B. et. al. 1995. "Environmentally degradable starch filled low density polyethylene" *Polymer Degradation and Stability.* 47 : 165 –173.
8. Zuchowska, D. et. al. 1994. " Physical structure of polyolefins –starch blends after ageing" *Polymer Degradation and Stability.* 64 : 339-346.
9. Bikiaris, D. et. al. 1998. "LDPE/plasticized starch blends containing PE –g-MA copolymer as compatibilizer" *Polymer Degradation and Stability.* 59 : 287 –291.
10. Albano, C. et. al. 1999. "Thermal stability of blend of polyolefins and sisal fiber" *Polymer Degradation and Stability.* 66 : 179 -190.
11. Funke, U. et. al. 1998. "Processing and characterization of biodegradable product based on starch" *Polymer Degradation and Stability.* 59: 293- 296.
12. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2544. "สารปรับแต่งพอลิเมอร์" เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
13. แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม. 2535. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์.

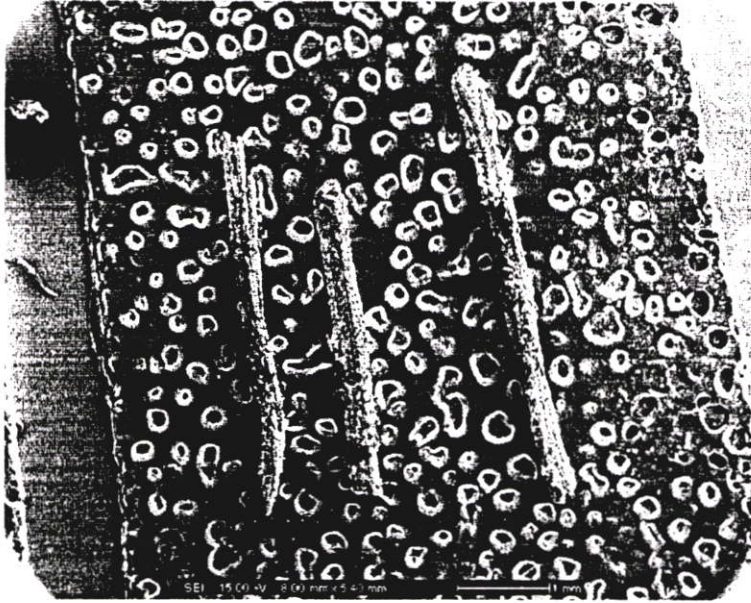
14. ชัยวัฒน์ เจนวาณิช. 2527. **เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน**. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
15. นันทพร พันธุ์ภักดี และ เรวดี สกุลอาริยะ. "วัสดุคอมพอสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใย อ้อย" โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
16. Mark, M.F. et. al. 1965. **Encyclopedia to Polymer Science and Technology**. Vol.2. New York : John Wiley&Son.
17. ปกิต อุดมโชติ. 2523. "ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล" **วารสารน้ำตาล**. 16(4) : 18-27.
18. Glycerol. 1997. Microsoft Encarta [online]. Encyclopedia 2000 : <http://encarta.msn.com/index.htm>.
19. Halim, H.S. 1992. **Handbook of Polymer Degradation**. New York : Maved Dekker.
20. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. 2521. กระทรวงอุตสาหกรรม.
21. Jan, R.F. 1995. **Polymer Photodegradation**. London : Chapman&Hall.
22. Roger, C.F. 1993 **Polymer Durability**. Chicago : Polymer Chemistry Inc.
23. Tephon, E.W. et. al. 1990. **Infrared and Raman spectroscopy**. Academic. Press, Inc.
24. Brandrup, J. et. al. 1999. **Polymer Handbook**. New York : John wiley & Son Inc.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ขนาดของเส้นใยอ้อยที่ผ่านการขึ้นรูป

ขนาดของเส้นใยอ้อยที่ผ่านการขึ้นรูปผลภาพถ่ายจาก SEM พบว่า เส้นใยที่ผ่านการขึ้นรูปมีความยาวเฉลี่ย 3.915 mm



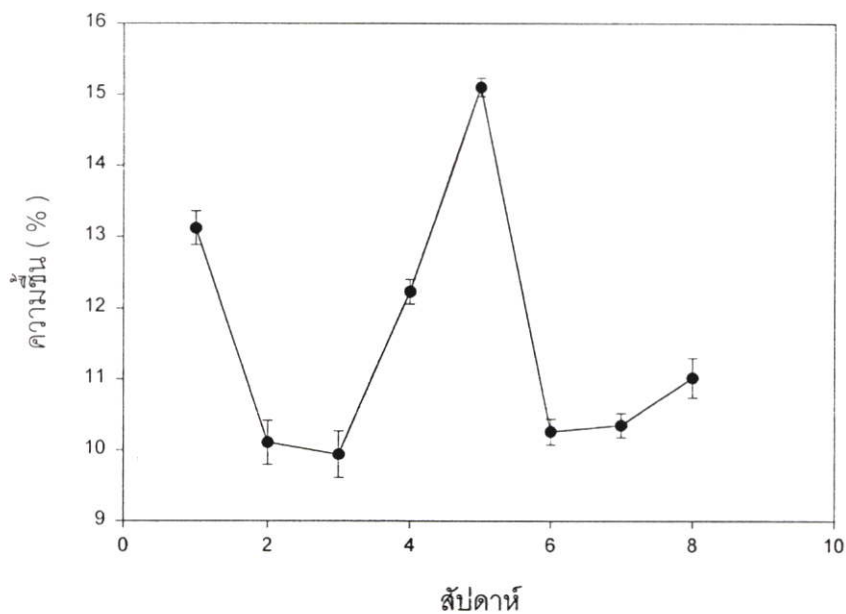
รูปที่ ก.1 ขนาดของเส้นใยอ้อยที่ผ่านการขึ้นรูป(กำลังขยาย 25 เท่า)



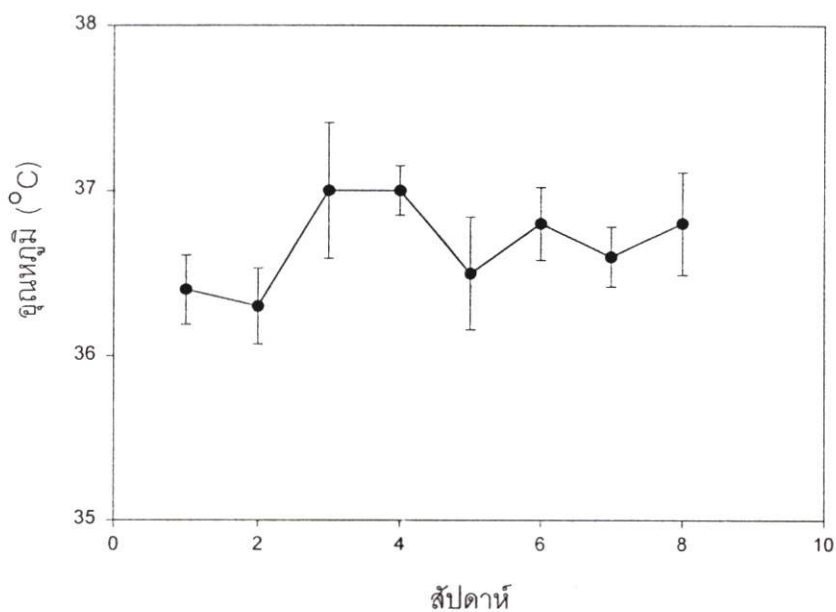
รูปที่ ก.2 แสดงพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการขึ้นรูป(กำลังขยาย165 เท่า)

ภาคผนวก ข

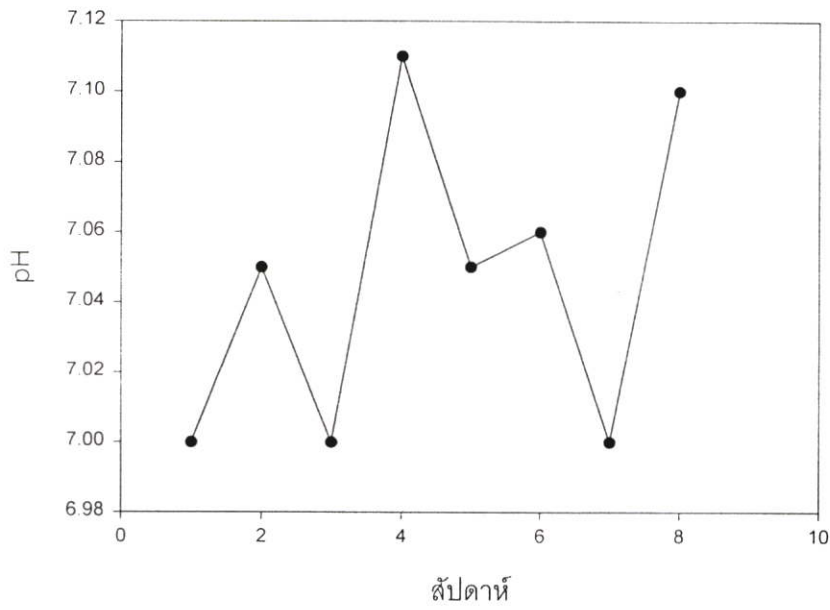
การเปลี่ยนแปลง ความชื้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด เบสของดินที่ใช้ทดลอง
 การเปลี่ยนแปลง ความชื้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด เบส ของดินที่ใช้ทดลองในสภาวะ
 ความชื้นน้อย ที่ทำการวัดในเวลาเที่ยงวันเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาวะความชื้นน้อย

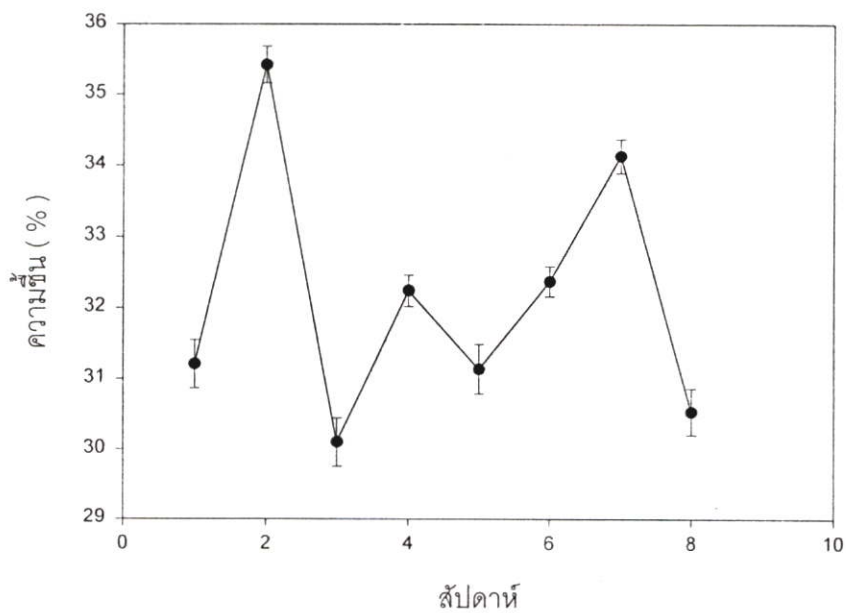


รูปที่ ข.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะความชื้นน้อย

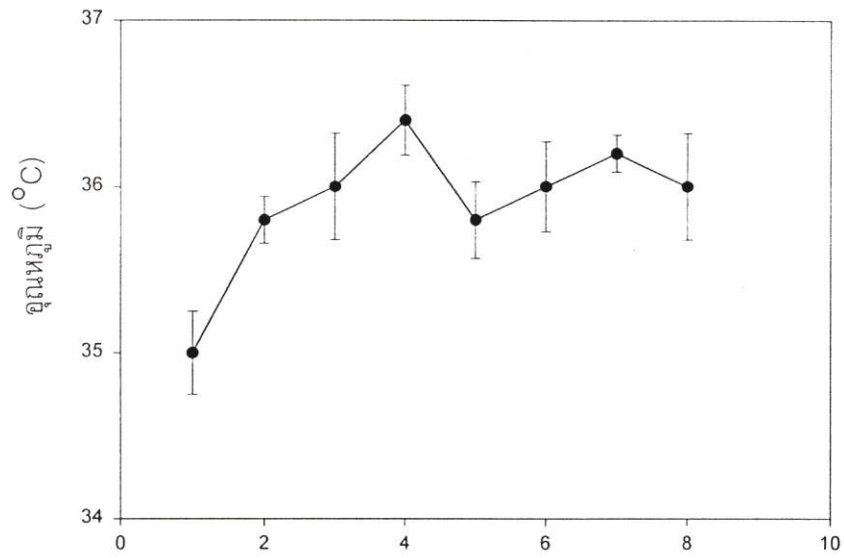


รูปที่ ข.3 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด เบส ในสภาวะความชื้นน้อย

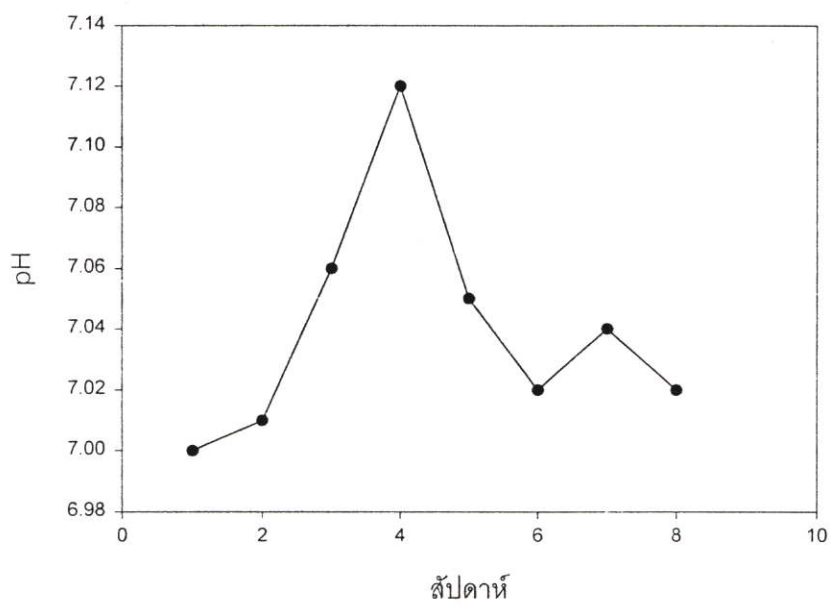
การเปลี่ยนแปลง ความชื้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด เบส ของดินที่ใช้ทดลองในสภาวะความชื้นมาก ที่ทำการวัดในเวลาเที่ยงวันเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ ข.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาวะความชื้นมาก

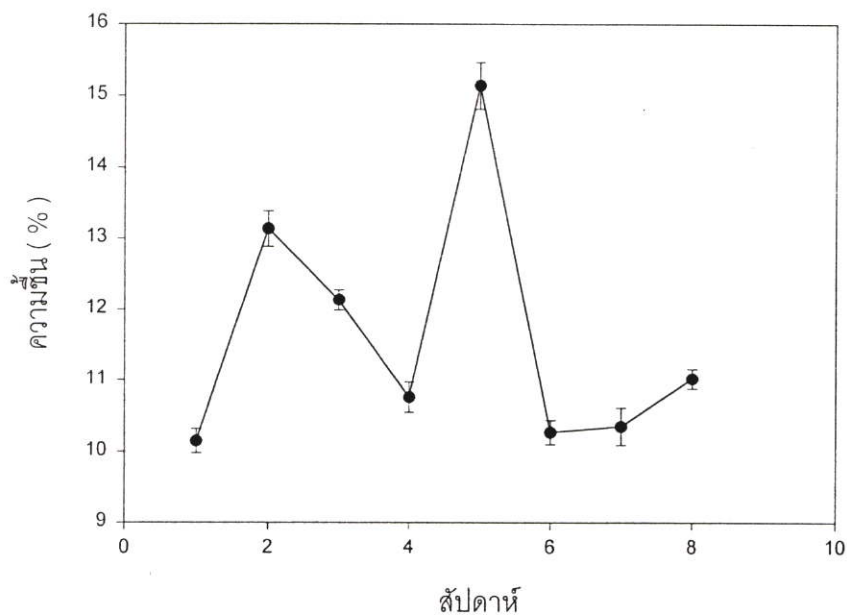


รูปที่ ข.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะความชื้นมาก

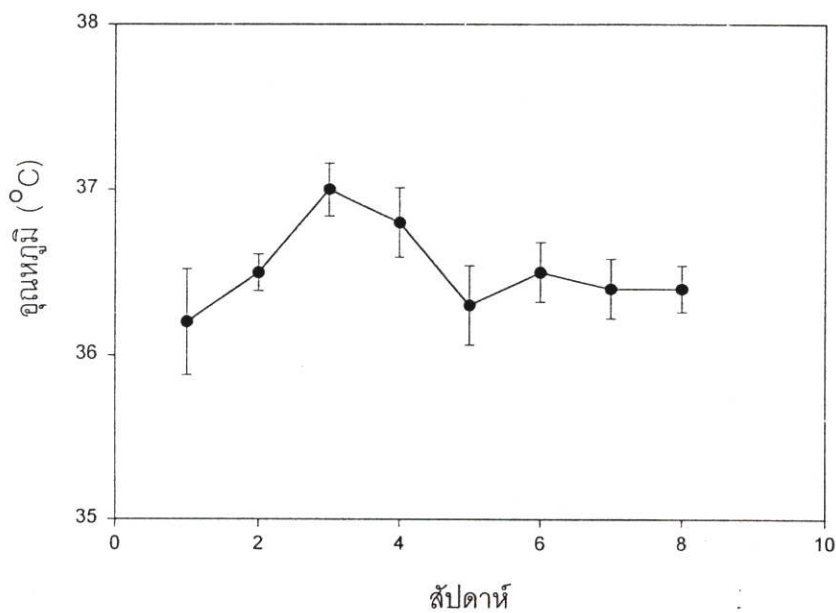


รูปที่ ข.6 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด เบส ในสภาวะความชื้นมาก

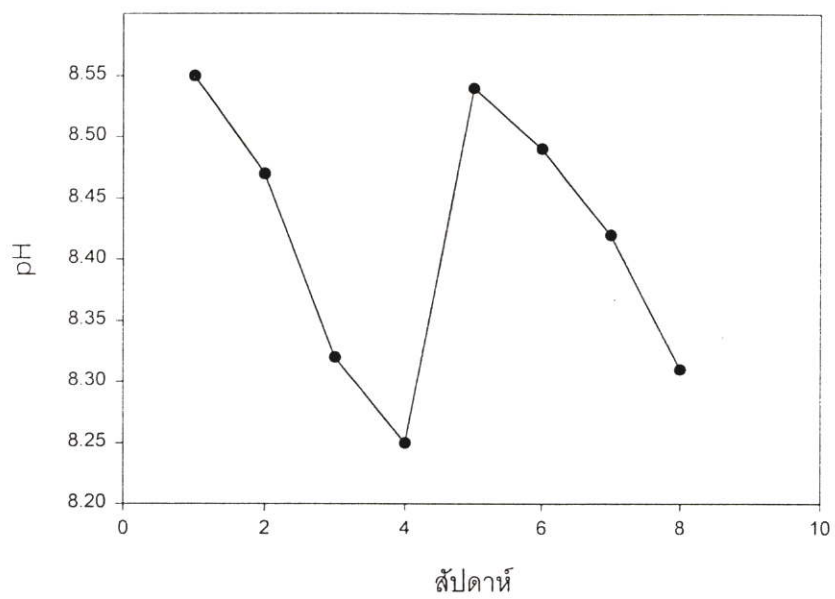
การเปลี่ยนแปลง ความชื้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด เบส ของดินที่ใช้ทดลองในสภาวะ
เบส ที่ทำการวัดในเวลาเที่ยงวันเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ ข.7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในสภาวะเบส



รูปที่ ข.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาวะเบส



รูปที่ ข.9 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด เบส ในสภาวะเบส

ผนวก ค

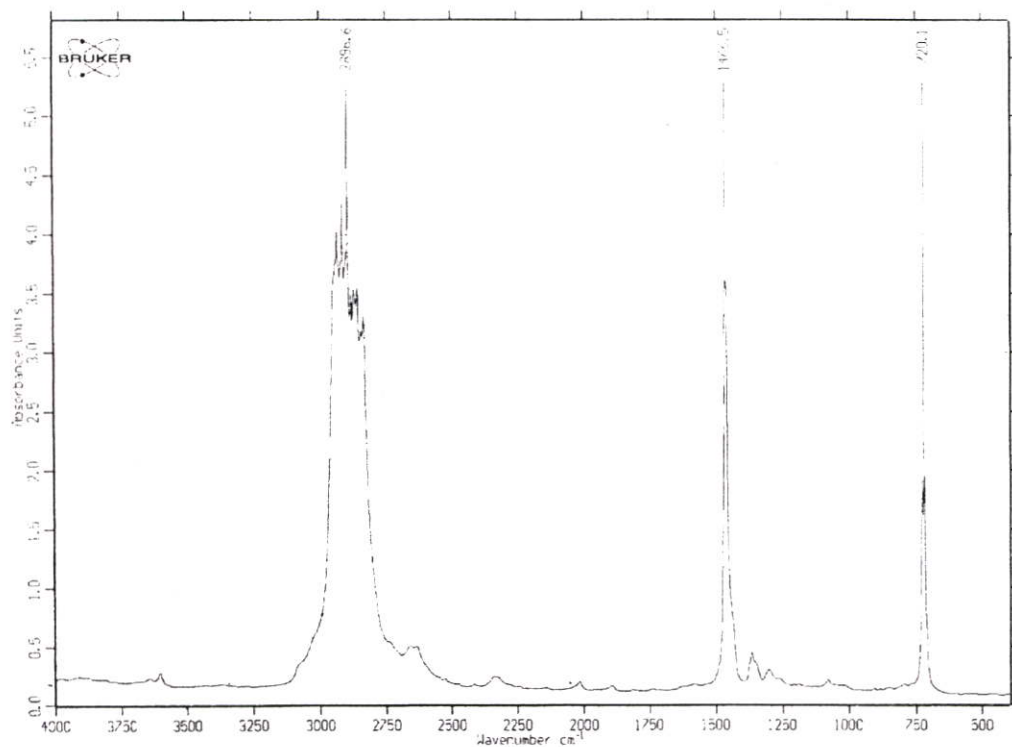
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ก่อนและหลังทำการทดลองในสภาวะต่างๆ

ตาราง ค.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการทดลองในสภาวะต่างๆ

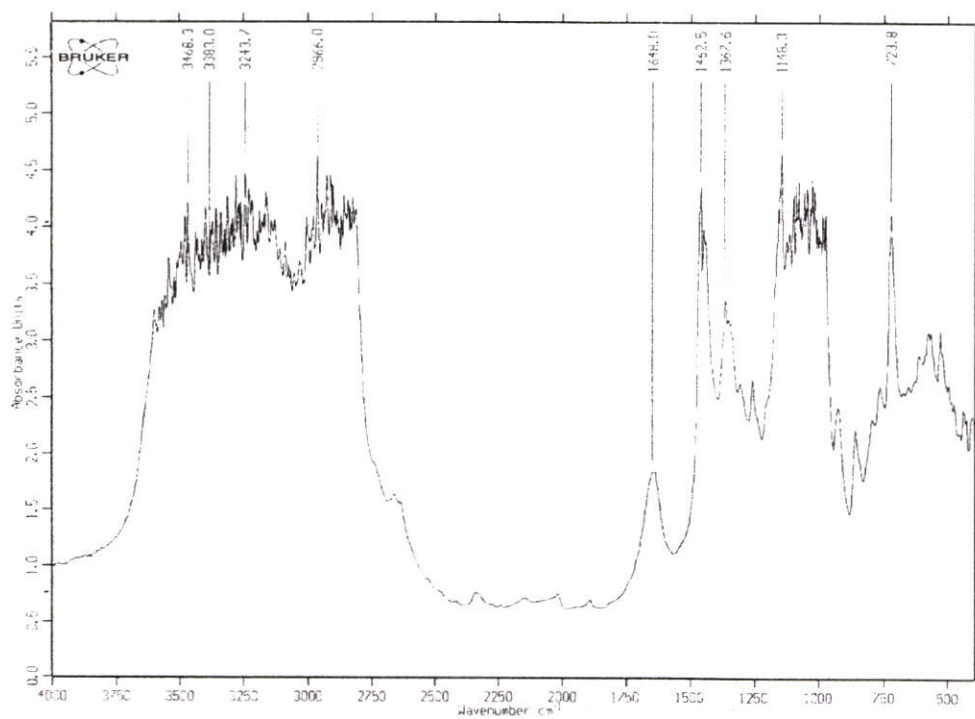
สูตร	T_m (°C)				
	ก่อนการทดลอง	ความชื้นน้อย	ความชื้นมาก	เบส	ฉายแสง UV
HDPE (A)	126.03	128.02	128.32	128.32	124.87
HDPE+แป้ง30% (B)	125.54	128.32	127.95	127.43	125.55
HDPE+แป้ง30% + กลีเซอรอล30%(E)	126.37	128.68	127.92	128.54	124.74
HDPE+เส้นใย30% + กลีเซอรอล30%(H)	126.54	128.68	128.14	127.91	125.87
HDPE+เส้นใย30% (I)	125.77	128	127.93	127.87	125.37
HDPE+แป้ง15%+ เส้นใย15% + กลีเซอรอล30%(J)	125.59	127.7	127.74	128.33	125.2

ภาคผนวก ง

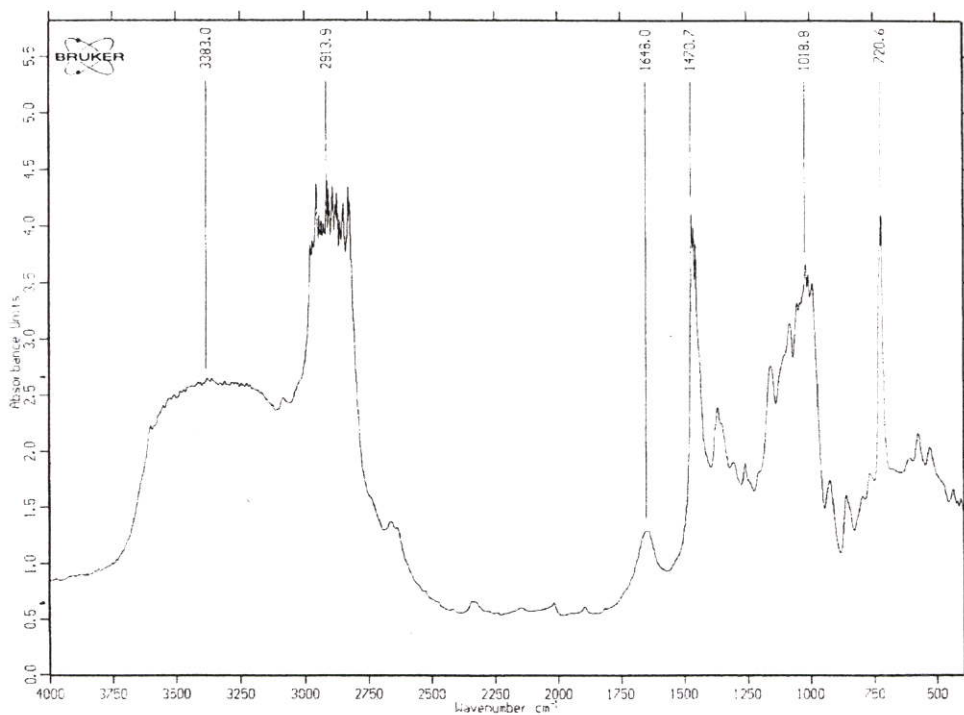
กราฟ FTIR พอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนทำการทดลองและหลังการฉายแสง UV



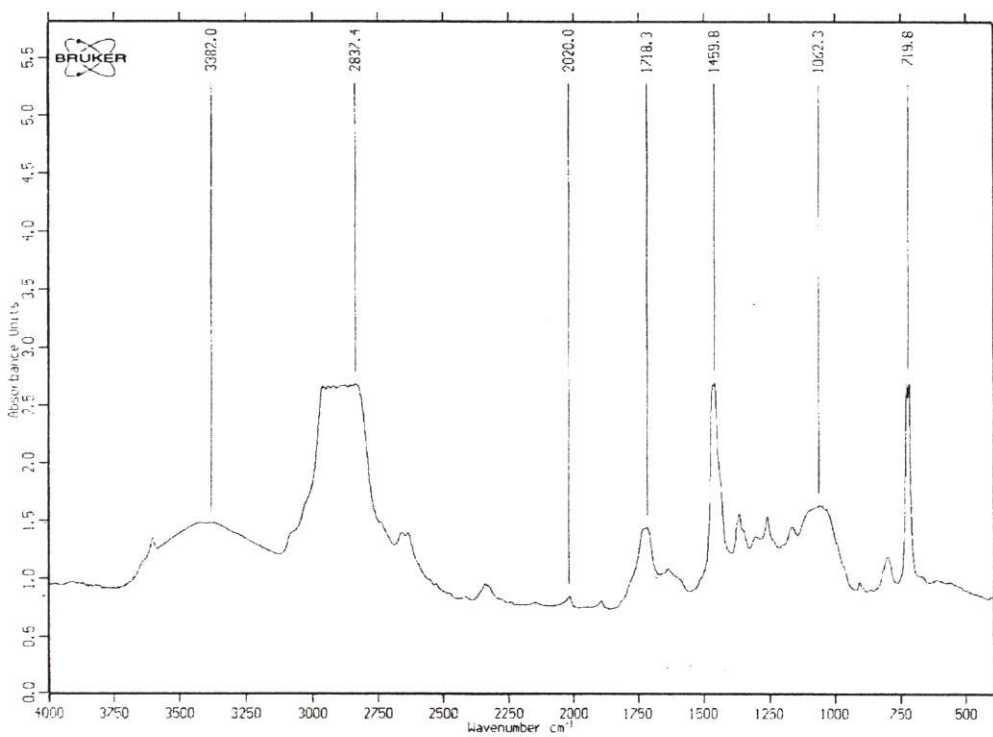
รูปที่ ง.1 กราฟ FTIR ของ HDPE (A) ก่อนทำการทดลอง



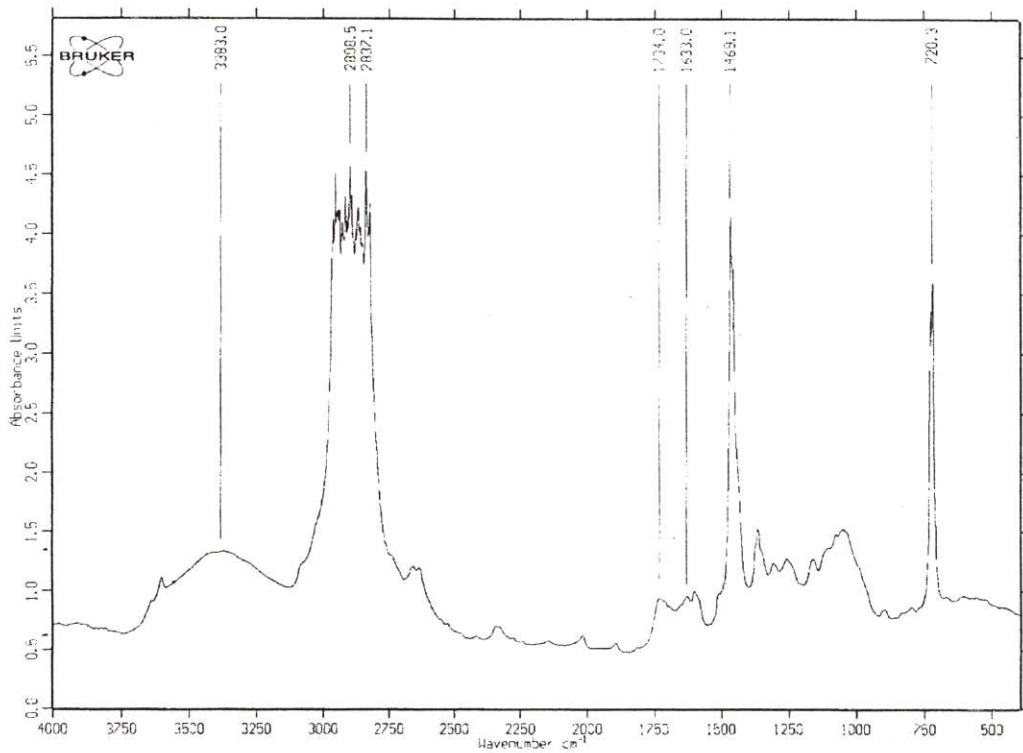
รูปที่ ง.2 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%(B) ก่อนทำการทดลอง



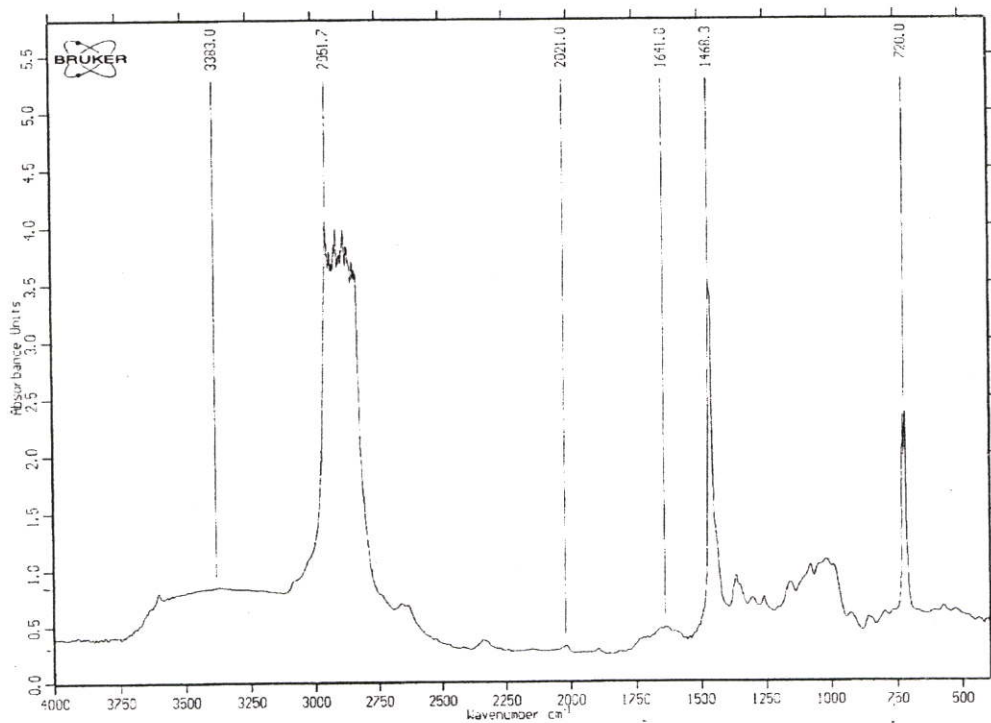
รูปที่ 3.3 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30%(E) ก่อนทำการทดลอง



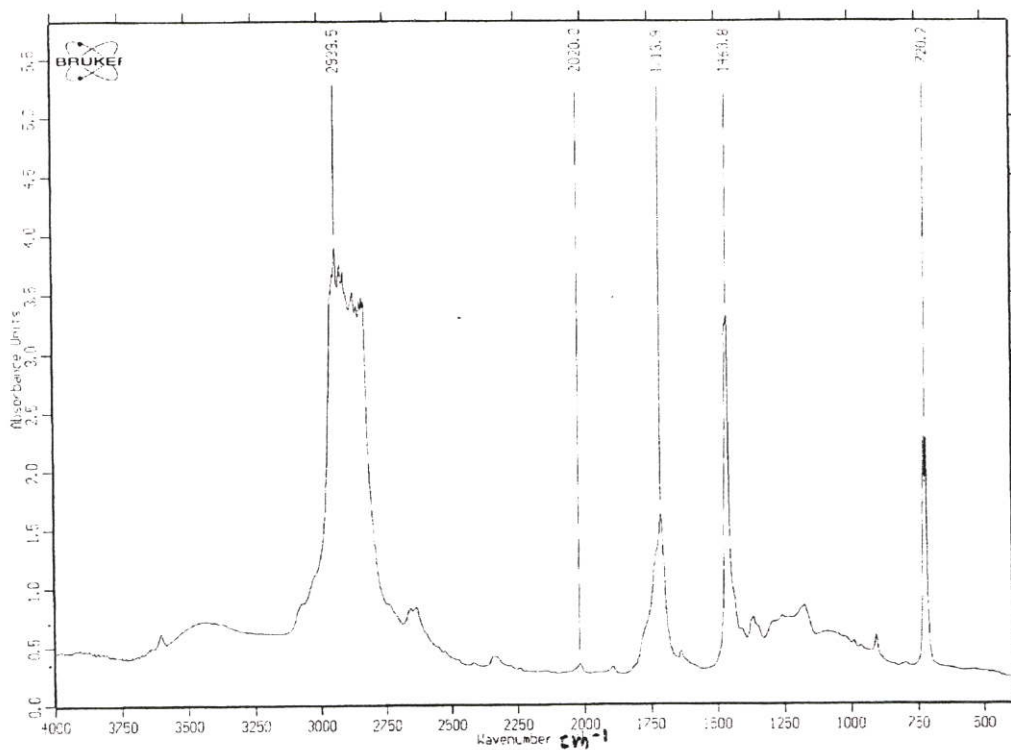
รูปที่ 3.4 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30%(H) ก่อนทำการทดลอง



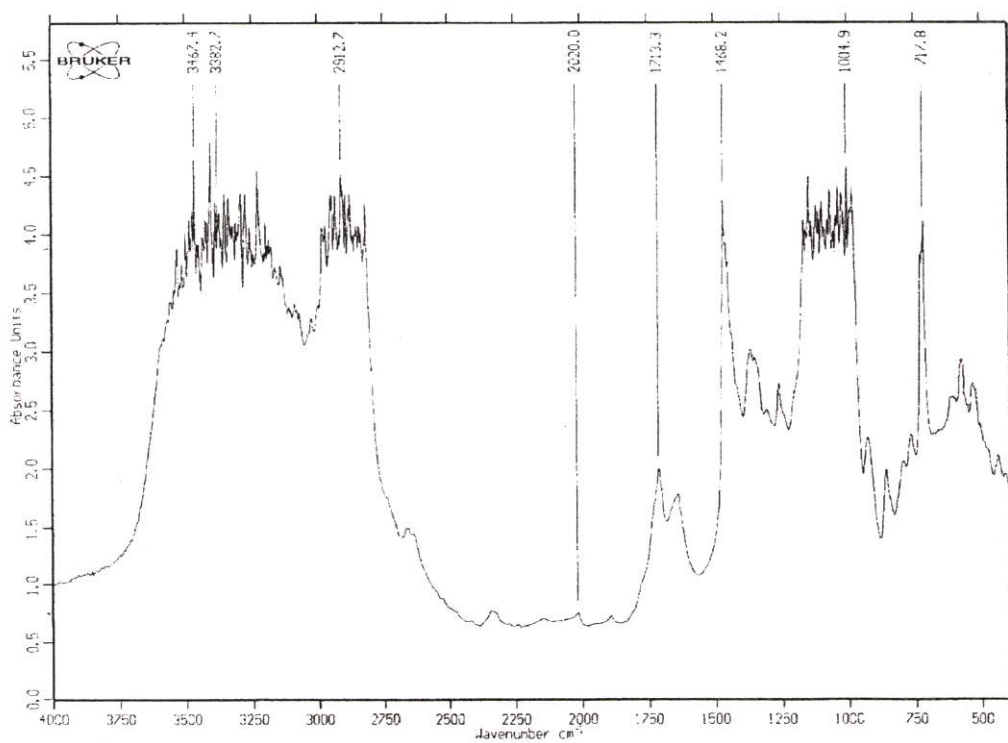
รูปที่ ๕.5 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30 (I) ก่อนทำการทดลอง



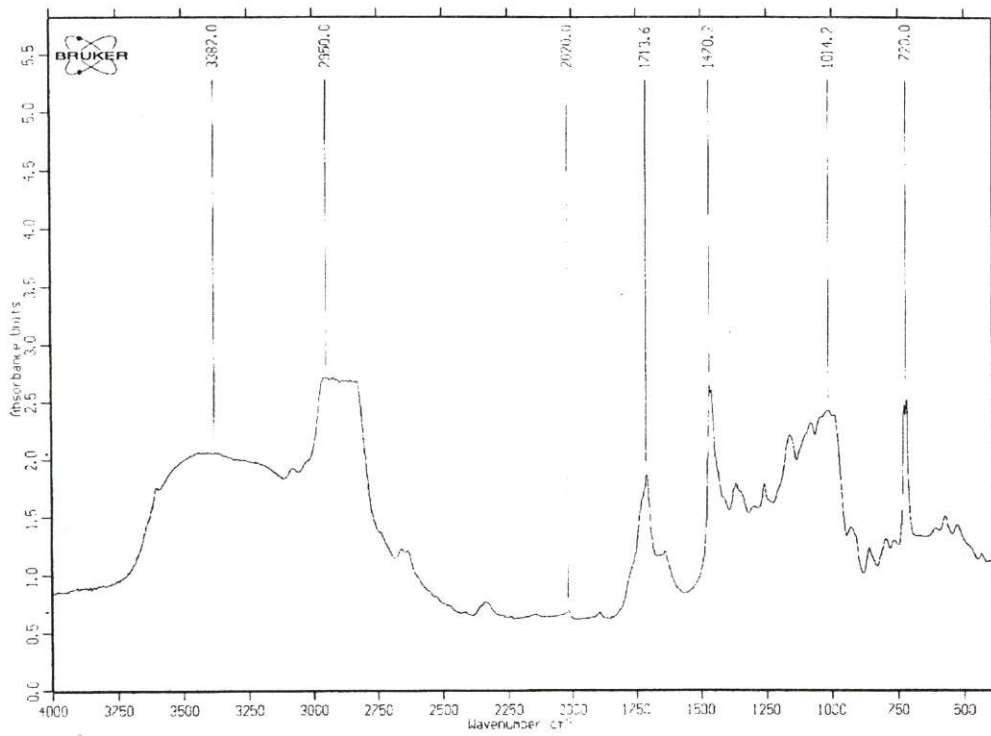
รูปที่ ๕.6 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 15%+เส้นใย 15%+กลีเซอรอล 30% (J) ก่อนทำการทดลอง



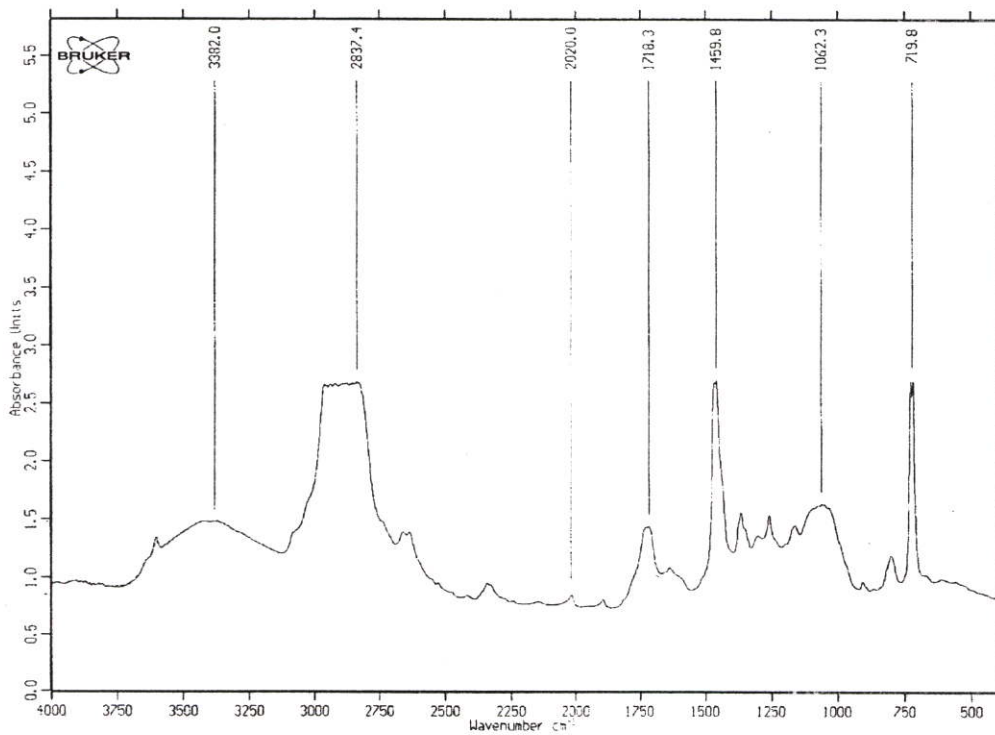
รูปที่ ๗.๗ กราฟ FTIR ของ HDP(A) หลังฉายแสง UV 4 เดือน



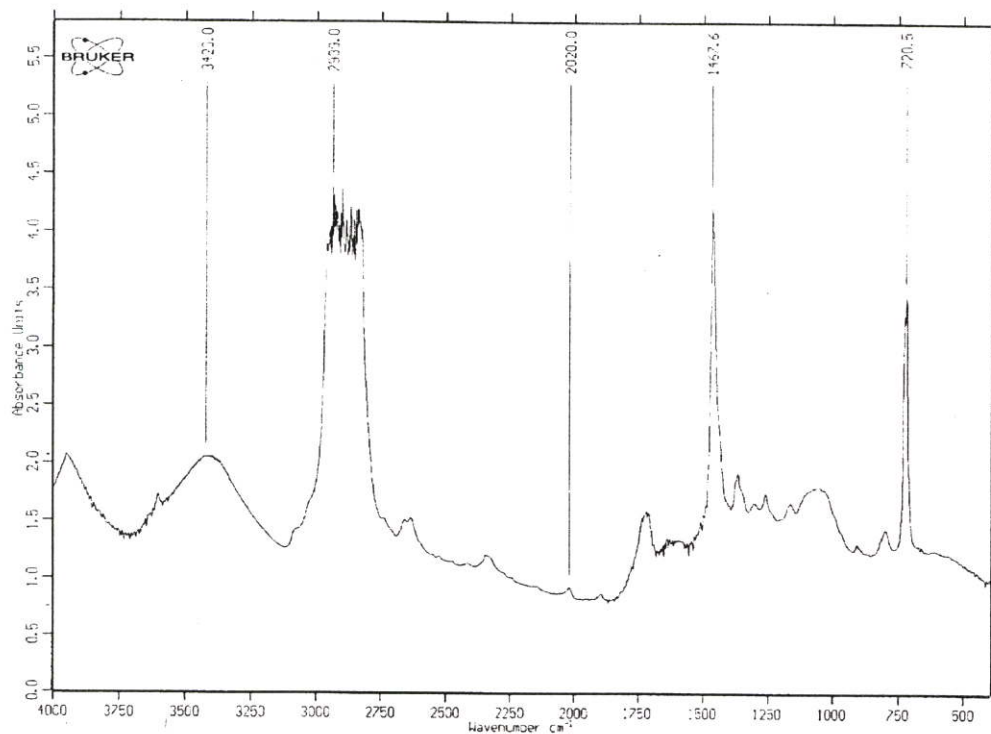
รูปที่ ๗.๘ กราฟ FTIR ของ HDPE+แบ่ง 30%(B) หลังฉายแสง UV 4



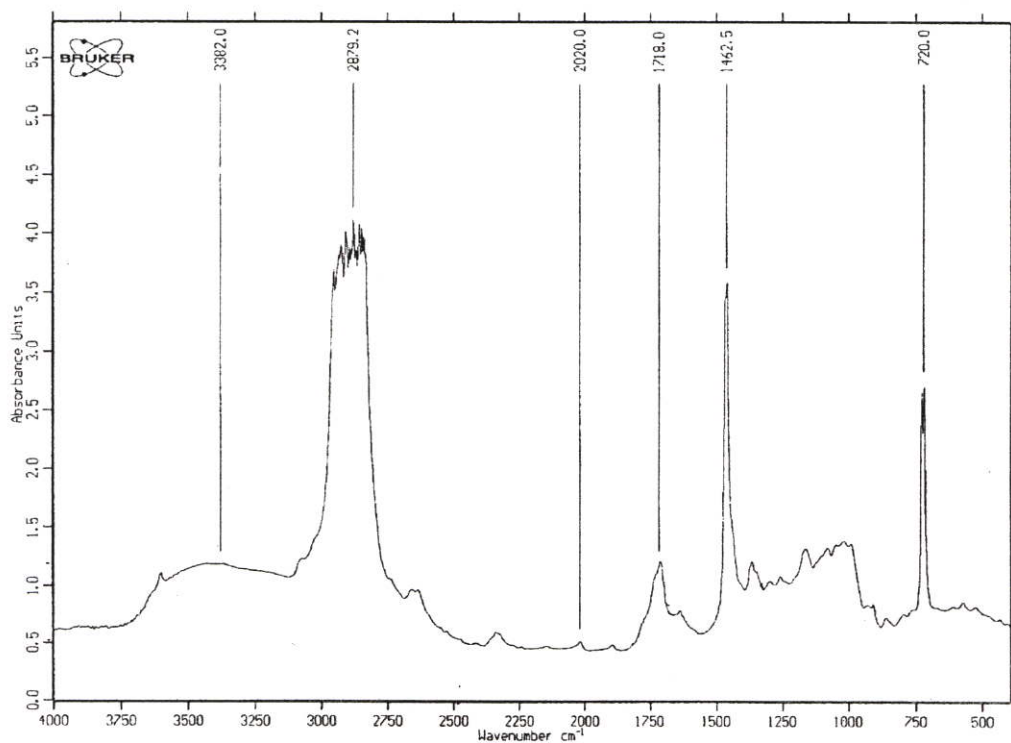
รูปที่ ๙.๙ กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 30%+กลีเซอรอล 30%(E) หลังฉายแสง UV 4 เดือน



รูปที่ ๙.๑๐ กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30%+กลีเซอรอล 30%(H) หลังฉายแสง UV 4 เดือน



รูปที่ ง.11 กราฟ FTIR ของ HDPE+เส้นใย 30 (I) หลังฉายแสง UV 4 เดือน



รูปที่ ง.12 กราฟ FTIR ของ HDPE+แป้ง 15%+เส้นใย 15%+กลีเซอรอล 30%(J) หลังฉายแสง UV 4 เดือน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	สมเจตน์ เชียงวานิช
วันเกิด	14 สิงหาคม พ.ศ. 2515
สถานที่เกิด	อ.ศรีเชียงใหม่ จ.หนองคาย
การศึกษา	-ระดับมัธยม โรงเรียนทวีธาภิเศก พ.ศ.2528-2533 -ระดับปริญญาตรี(วท.บ.เคมี) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2535-2539 -ระดับปริญญาโท (วท.ม.เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2542-2545