

ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทีน
ชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ

EFFECT OF VARIOUS STARCH ON DEGRADATION OF HDPE
UNDER SOIL CONDITIONS

วรวิทย์ โปชนิกอร์
WORRAWIT POCHANIKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-544-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ

EFFECT OF VARIOUS STARCH ON DEGRADATION OF HDPE
UNDER SOIL CONDITIONS



วรวิทย์ โปชนิกอร์

WORRAWIT POCHANIKORN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49599
วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-544-8

EFFECT OF VARIOUS STARCH ON DEGRADATION OF HDPE
UNDER SOIL CONDITIONS

WORRAWIT POCHANIKORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL 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
2003
ISBN 974-324-544-8

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของแป้งชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ในสภาวะฝังกลบ
EFFECT OF VARIOUS STARCH ON DEGRADATION OF HDPE UNDER
SOIL CONDITIONS

ชื่อนักศึกษา นายวรวิทย์ โปชนิกกร
รหัสประจำตัว 43065617
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	
ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	
ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล	
รศ.ดร.นवलพรรณ ณ ระนอง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 เมษายน 2546 เวลา 13.00 – 16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 6 ห้อง 609



วันที่.....30.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....2546.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ
นักศึกษา	นาย วรวิทย์ โพชนิก
รหัสประจำตัว	43065617
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2546
ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. มาลีณี ชัยศุภกิจฉินธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymer) โดยการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) จากขวดน้ำดื่ม มาทำการผสมกับ สารตัวเติมอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Fillers) ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของแป้ง ที่ส่งผลกระทบต่อ การย่อยสลายของพอลิเมอร์ ทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณการเกิดออกซิเดชัน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ ก่อนและหลังการฝังกลบในดินธรรมชาติกับดินที่มีการเติมเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นระยะเวลา 4 เดือน

ผลการทดลองพบว่า ชนิดและปริมาณของแป้งมีผลต่อค่าความทนแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส กล่าวคือ เมื่อพอลิเมอร์มีปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความทนแรงดึงกับค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลี 30% หลังการฝังกลบมีค่าลดลงมากที่สุด

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้มีการเติมแป้ง และพอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ผลการหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลหลังการฝังไม่พบหมู่คาร์บอนิล เนื่องจากแป้งทำให้ชิ้นงานที่เตรียมได้มีความชุ่มชื้น เมื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกโดย XRD พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ผลการศึกษาโดย SEM หลังการฝังกลบพบว่า พื้นผิวหน้าของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งทุกสูตร เกิดรูพรุนกระจายไปทั่ว จากผลการทดลองทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่าหลังการฝังกลบ พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลีเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อม

ยายม่อม ตามลำดับ ส่วนพอลิเมอร์ที่มีการฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กจะเกิดการย่อยสลายได้ดีกว่าดินธรรมชาติเล็กน้อย

งานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางที่จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากปริมาณขยะพลาสติกได้

Thesis Title	Effect of Various Starch on Degradation of HDPE under soil conditions
Student	Mr. Worrawit Pochanikorn
Student ID	43065617
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2003
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

In this thesis, study on biodegradability of High Density Polyethylene (HDPE) received from drinking water bottles mixed with natural organic fillers such as rice starch, wheat starch and arrowroot starch. This research focused on types and quantities of starch which affected on polymer degradation. Physical, mechanical and thermal properties, appearing of oxidation reaction, crystal structures and morphology of polymer before and after burial in natural and added Iron (Fe^{2+}) soils for four months were investigated and compared.

The results showed that tensile strength and elongation at break decreased with increasing starch content but modulus increased when compared with pure HDPE. The polymer blended with wheat starch at 30% provided the lowest values of both tests after buried.

The results from thermal properties showed that the mixture of HDPE blended with starch showed higher heat resistance than the non-added starch polymer. The data from thermal properties of all samples stated the consistently temperature of T_m and T_c . No carbonyl group was found after buried since the prepared samples were too dull. The data gained from XRD indicated that bury conditions showed no effect on polymer crystal structures. The micrographs received from SEM showed that added starch polymer showed porous surface after bury for four months.

The conclusion of these results showed that the polymer blended starch induced degradation faster than the non-added starch polymer after buried. The polymer, moreover, blended with wheat starch induced degradation faster than blended with rice

starch and arrowroot starch, respectively. The buried polymers under added Iron soil had a slightly good of degradation than natural soil.

This research should be the way to reduce the problem of wasted plastics.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็น
อย่างสูงที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหาและเอาใจใส่ดูแลการทำงานของผู้วิจัย วิทยานิพนธ์
ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล และ
ผศ.ดร. นवलพรรณ ณ ระนอง คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์รวมทั้ง อาจารย์ภาควิชาเคมี
ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี เจ้าหน้าที่สถานปฏิบัติการโรงฝึกงาน
อุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยีที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่เคารพอย่างสูง ที่คอยเป็นกำลังใจและคอย
สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้มาตลอด ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ สาขาวิชาเทคโนโลยี
พอลิเมอร์ทุกคน สำหรับคำแนะนำและกำลังใจที่แสนดี

นาย วรวิทย์ โพนนิกร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง.....	3
2.2 การสังเคราะห์แป้ง.....	3
2.3 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	4
2.4 กระบวนการผลิตแป้งสาลี.....	10
2.5 กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า.....	13
2.6 กระบวนการผลิตแป้งทำวายม่อม.....	16
2.7 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ	20
2.8 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	20
2.9 สารตัวเติม	21
2.10 ตัวการที่ทำให้เกิดการย่อยสลายในพอลิเมอร์.....	23
2.11 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ.....	25
2.12 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	29
3.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
3.3.1 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	32
3.4 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์	34
3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	34
3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	35
3.4.3 การหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน	35
3.4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	36
3.5 การวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน	36
3.6 การหาปริมาณเหล็กในดิน	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	38
4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล	38
4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	48
4.2.1 การศึกษาด้วยเทคนิค DSC	54
4.2.2 การศึกษาด้วยเทคนิค TGA	63
4.3 การหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน	65
4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	67
4.4.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดย SEM	67
4.4.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างฟิล์มพอลิเมอร์	71
4.4.3 การหาน้ำหนักที่หายไป	74
4.5 การวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน	76
4.6 การหาปริมาณเหล็กในดิน	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	93
ภาคผนวก ง.....	94
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน.....	6
2.2 แสดงสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส.....	8
2.3 แสดงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวสาลี.....	11
2.4 แสดงสมบัติของแป้งสาลี.....	13
2.5 แสดงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวหัก.....	14
2.6 แสดงสมบัติของแป้งข้าวเจ้า.....	16
2.7 แสดงสมบัติของแป้งท้าวยายม่อม	18
2.8 แสดงลักษณะของเมล็ดแป้งแต่ละชนิด.....	18
2.9 แสดงขนาดและรูปร่างของเมล็ดแป้งชนิดต่างๆ	19
2.10 แสดงสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลาย ของแป้งแต่ละชนิดที่ 95°C.....	19
3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสม.....	32
ก.1 แสดงคุณลักษณะอื่น ๆ ที่ต้องการของแป้งข้าวเจ้า.....	88
ก.2 แสดงคุณลักษณะอื่น ๆ ที่ต้องการของแป้งสาลี.....	88
ง.1 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการฝั้งกลบ.....	94
ง.2 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝั้งกลบ 1 เดือน.....	95
ง.3 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝั้งกลบ 2 เดือน.....	96
ง.4 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝั้งกลบ 3 เดือน.....	97
ง.5 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝั้งกลบ 4 เดือน.....	98
ง.6 แสดงข้อมูลสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝั้งกลบ.....	99
ง.7 แสดงข้อมูลสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝั้งกลบ 4 เดือน.....	100

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงวัฏจักรแคลวิน.....	4
2.2 แสดงวัฏจักรการสังเคราะห์อะมิโลสและอะมิโลเพกติน.....	5
2.3 แสดงระดับโครงสร้างในเมล็ดแป้งมันฝรั่ง.....	6
2.4 แสดงโครงสร้างของอะมิโลส.....	7
2.5 แสดงลักษณะเกลียวของอะมิโลส.....	8
2.6 แสดงโครงสร้างอะมิโลเพกติน.....	9
2.7 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกติน และไขมัน.....	10
2.8 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตแป้งสาลีด้วยวิธี Martin Process.....	12
2.9 แสดงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวเจ้า.....	14
2.10 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า.....	15
2.11 แสดงต้นของทำวยายม่อม.....	17
2.12 แสดงรากของทำวยายม่อม.....	17
3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	31
3.2 แสดงแผนผังขั้นตอนการฝังกลบดิน.....	33
3.3 แสดงภาพการฝังกลบชิ้นงานในดิน.....	34
4.1 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ	38
4.2 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	39
4.3 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก.....	40
4.4 แสดงกราฟความทนแรงดึงของ HDPE ที่ฝังกลบในสภาวะ ดินต่างๆ.....	41
4.5 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่เติมแป้ง ชนิดต่างๆ 10% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ	42

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่เติมแป้ง ชนิดต่างๆ 20% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ	42
4.7 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่เติมแป้ง ชนิดต่างๆ 30% ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ.....	43
4.8 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม สูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ.....	44
4.9 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	45
4.10 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก.....	45
4.11 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของ HDPE ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ.....	46
4.12 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 10% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	47
4.13 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 20% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	47
4.14 แสดงกราฟร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 30% ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ	48
4.15 แสดงกราฟมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ.....	49
4.16 แสดงกราฟมอดูลัสของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	50
4.17 แสดงกราฟมอดูลัสของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก.....	50
4.18 แสดงกราฟมอดูลัสของ HDPE ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ.....	51
4.19 แสดงกราฟมอดูลัสของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 10% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	52

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 แสดงกราฟพมอดุลัสของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 20% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	52
4.21 แสดงกราฟพมอดุลัสของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 30% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ.....	53
4.22 แสดงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบที่ได้จาก DSC	54
4.23 แสดงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการ ฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือนที่ได้จาก DSC	55
4.24 แสดงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการ ฝังกลบในดินที่เติมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือนที่ได้จาก DSC	56
4.25 แสดงอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการทดลองที่ได้จาก DSC	57
4.26 แสดงอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการ ฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือนที่ได้จาก DSC	58
4.27 แสดงอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการ ฝังกลบในดินที่เติมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือนที่ได้จาก DSC	59
4.28 แสดงกราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสม สูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติ	60
4.29 แสดงกราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสม สูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก.....	61
4.30 แสดงกราฟสมบัติทางความร้อนของแป้งชนิดต่างๆ ที่ได้จาก TGA	63
4.31 แสดงกราฟสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่เตรียมได้ก่อนการฝังกลบที่ได้จาก TGA	64
4.32 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ	66
4.33 แสดงภาพจาก SEM เปรียบเทียบพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติ	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 แสดงภาพจาก SEM เปรียบเทียบพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินที่เดิมเหล็ก.....	70
4.35 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ	71
4.36 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติ	72
4.37 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังทำการฝังกลบในดินที่เดิมเหล็ก	73
4.38 แสดงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ	74
4.39 แสดงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เดิมเหล็ก	75
4.40 แสดงค่า pH ของดินในสภาวะต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบ	76
4.41 แสดงปริมาณเหล็กในดินชนิดต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบ	77
ก.1 แสดงรูปร่างของเม็ดแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	85
ก.2 แสดงรูปร่างของเม็ดแป้งสาลีที่ใช้ในการทดลอง.....	86
ก.3 แสดงรูปร่างของเม็ดแป้งท้าวยายม่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	87
ข.1 แสดงภาพขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลาย.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่างๆ เจริญขึ้นมากทำให้มีปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งหนึ่งในปัญหาลี้ภัยคือ ปัญหาจากขยะพลาสติก เพราะพลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติก ซึ่งมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นในอัตราสูงกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น กระดาษ โลหะ และแก้ว ส่วนสาเหตุหลักที่พลาสติกได้รับความนิยมสูงกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เนื่องมาจากความก้าวหน้าในการพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมพลาสติก ไม่ว่าจะเป็นการผลิตเม็ดพลาสติกชนิดใหม่ๆ ที่ให้คุณสมบัติในการใช้งานดีขึ้น หรือขบวนการแปรรูปเป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติก ในปัจจุบันพบว่าพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ราคาถูก มีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย มีน้ำหนักเบา แนวโน้มความต้องการใช้พลาสติกจึงมีการขยายตัวมากขึ้น ปริมาณขยะซึ่งเกิดจากพลาสติกจึงสูงขึ้นเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เพราะพลาสติกส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการย่อยสลาย ใช้เวลาเป็นร้อยปีกกว่าจะมีการสูญเสียบางส่วนไป หากนำไปทำลายโดยการเผาก็จะได้ก๊าซที่เป็นพิษและถ่านนำไปทิ้งในทะเลก็จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลได้

สาเหตุที่พลาสติกไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ เพราะพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้มีความคงทนต่อการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี เนื่องจากพลาสติกที่ผลิตได้ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นจึงได้มีการค้นคิดและพัฒนาให้มีการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถผลิตได้หลายวิธี แต่วิธีที่น่าสนใจวิธีหนึ่งคือ การนำแป้งมาผสมลงไปในพลาสติก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีมากเป็นอันดับสองรองมาจากเซลลูโลส มีราคาถูก สามารถพองตัวขึ้นนำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบแทนพลาสติก ปัจจุบันได้มีการนำแป้งมาผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ในรูปสารตัวเติม (Filler), Thermoplastic Starch หรือ Graft Copolymer กันบ้างแล้ว ในการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ควรเน้นถึงอัตราส่วนของแป้ง ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแล้ว ยังทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์สามารถแข่งขันได้กับพลาสติกทั่วๆ ไปได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้นำพลาสติกจากขวดน้ำดื่ม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยการหลอมเพื่อนำไปขึ้นรูป ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกและไม่ยุ่งยากซับซ้อน มาทำการเติมสารตัวเติม (filler) คือ แป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งท้าวยายม่อม เพื่อปรับปรุงพอลิเมอร์จากขยะที่เหลือทิ้งให้มีสมบัติเหมาะแก่การนำกลับมาใช้งานใหม่มากยิ่งขึ้น ทั้งยังเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรอีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาชนิดของแป้ง ได้แก่ แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งท้าวยายม่อม ที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในพอลิเมอร์ได้
2. เพื่อผลิตพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติม (Fillers) จากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย และมีสมบัติเชิงกลที่ดี
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารตัวเติม (Fillers) จากธรรมชาติ
4. เพื่อศึกษาถึงสถานะของดินที่ใช้ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ระหว่างดินที่มีการเติมเหล็ก (Fe^{2+}) กับดินตามธรรมชาติ
5. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารตัวเติม (Fillers) จากธรรมชาติ

ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้ง ได้แก่ แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งท้าวยายม่อม เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมแป้งในสถานะฝังกลบ
2. ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์จากขวดน้ำดื่ม HDPE ที่ใช้แล้วทิ้งซึ่งมีการเติมแป้งเพื่อใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) กับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ทำการเติมสารตัวเติม (Fillers)
3. ทำการศึกษาชนิดของแป้งที่มีผลต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ HDPE
4. ทำการศึกษาปริมาณของแป้งที่มีผลต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ HDPE
5. ทำการศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายของพอลิเมอร์ในดินที่มีการเติมเหล็ก (Fe^{2+}) กับดินตามธรรมชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง [1]

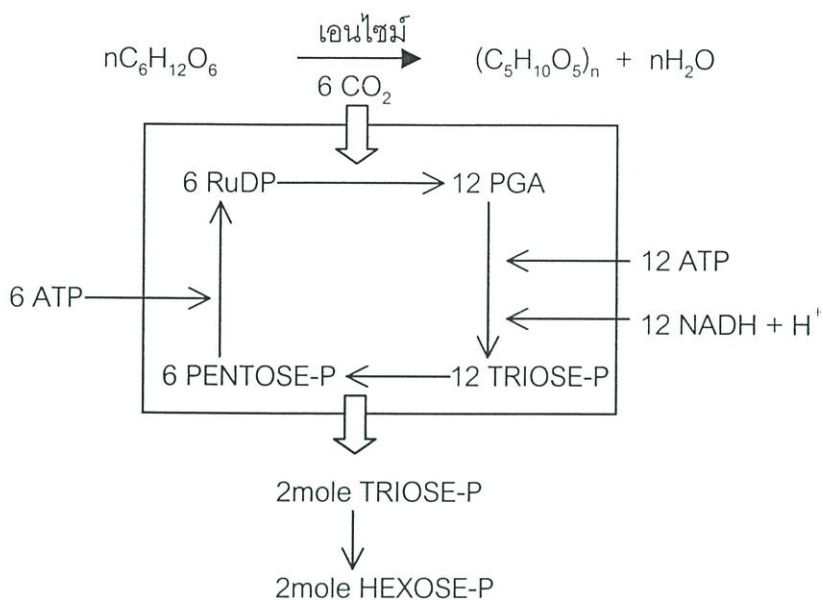
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือหรือกลางจะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลังเป็นต้น แต่ที่สำคัญที่มีการใช้กันทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและแป้งมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ องค์ประกอบหลักของอาหารทุกชนชาติส่วนใหญ่จะมีแป้ง เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า

2.2 การสังเคราะห์แป้ง

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งมีคลอโรฟิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและน้ำในการสร้างกลูโคสและออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างกรดฟอสโฟลิกซีเชอริก (phosphoglyceric acid, PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม PGA จะผ่านวัฏจักรแคลวิน (calvin cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (hexose) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกในขั้นต้นว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่าย ๆ ได้ดังนี้

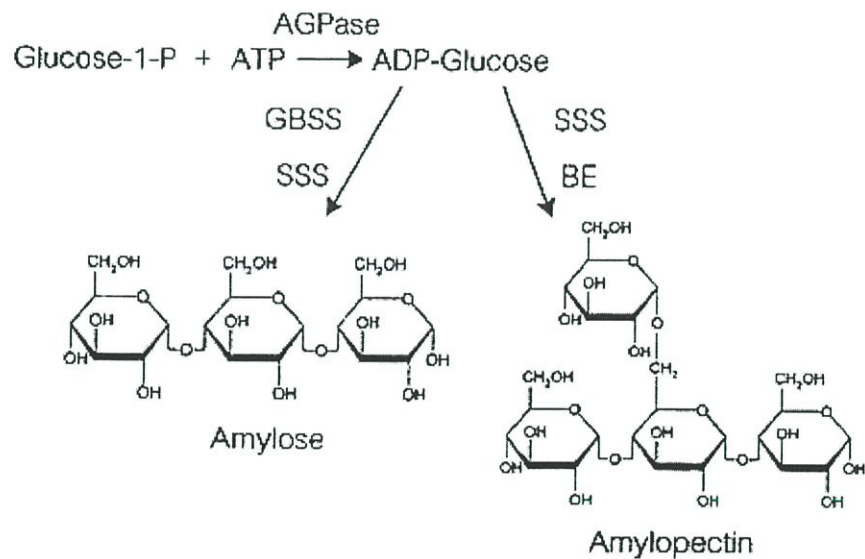
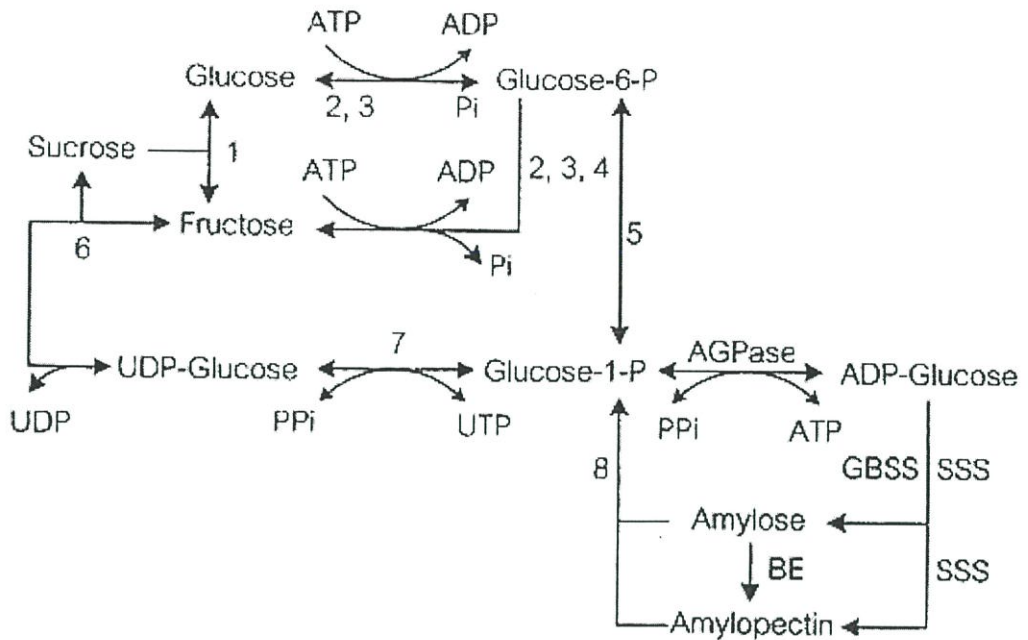


รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรแคลวิน (calvin cycle) [1]

ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน แป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบในรูปของเม็ดแป้งขนาด 1 ไมครอน ในช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้เป็นน้ำตาลซูโครส และถูกส่งไปเก็บสะสมอยู่ในรูปของแป้งที่ส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เก็บไว้ในเมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวโพดข้าวฟ่าง) เก็บไว้ในราก (มันสำปะหลัง) เก็บไว้ในส่วนหัว (มันฝรั่ง มันเทศ ท้าวยายม่อม) เก็บไว้ในลำต้น (สาकु สับปะรด)

2.3 องค์ประกอบภายในแป้ง

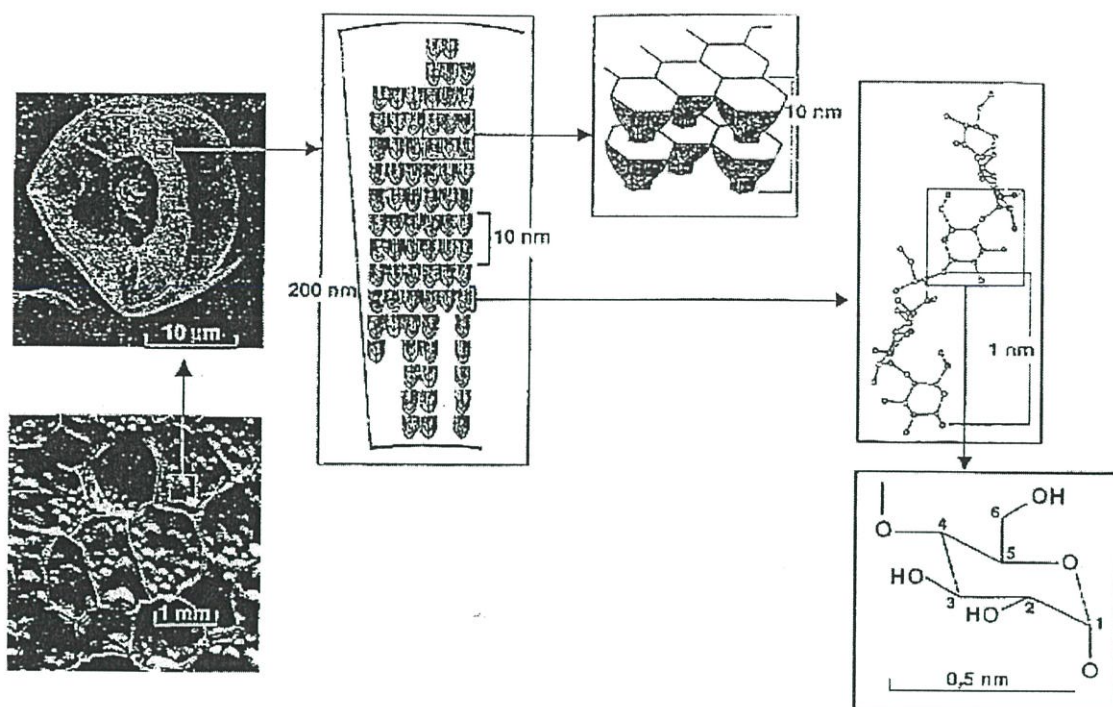
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.2 แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.1) ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 แสดงวัฏจักรการสังเคราะห์อะมิโลสและอะมิโลเพกติน [2]

คำย่อ ; AGPase: ADP-glucose pyrophosphorylase; G-1-P: glucose-1-phosphate; GBSS: granule-bound starch synthase; SSS:soluble starch synthase; BE: branching enzyme

เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง ; 1.invertase 2.hexokinase 3.hexose-6-phosphatase 4.glucose-phosphate isomerase 5.phosphoglucomutase 6.sucrose synthase 7.UDP-glucose pyrophosphorylase 8.starch phosphorylase



รูปที่ 2.3 แสดงระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งมันฝรั่ง [3]

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

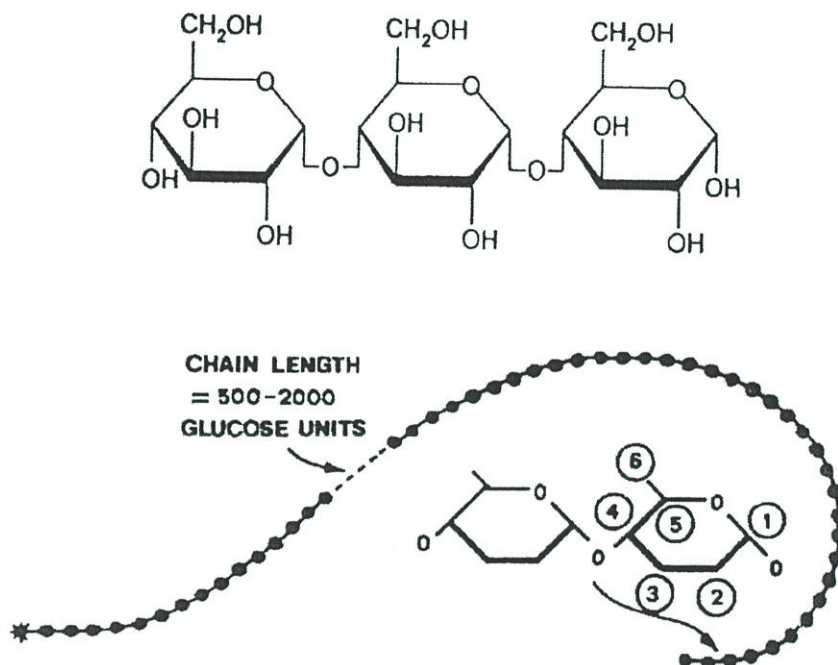
1. อะมิโลส (amylose)
2. อะมิโลเพกติน (amylopectin)
3. สารตัวกลาง (intermediate material)

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน [4]

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นก้อนและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

อะมิโลส (amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของอะมิโลส [5]

อะมิโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติ ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้างฟาง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แบ่งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคุ มีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% waxy starch ไม่มีอะมิโลสเลย และแบ่งจาก amylo maize มีอะมิโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะมิโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกึ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก คุณสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายๆ ชนิดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [6]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลส (%)	β - Amylolysis Limit (%)	DP เฉลี่ย	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
Indica	-	73	1,000	4.0	250	49
Japonica	-	81	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	-

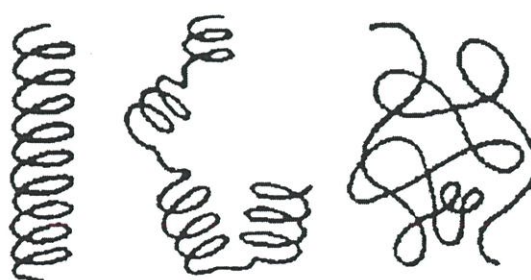
หมายเหตุ : β -Amylolysis = % การย่อยแป้งโดย β -Amylase

DP = Degree of Polymerization

NC = Number of Chain

CL = Chain Length

โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ดังรูปที่ 2.5 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง



เกลียวม้วน

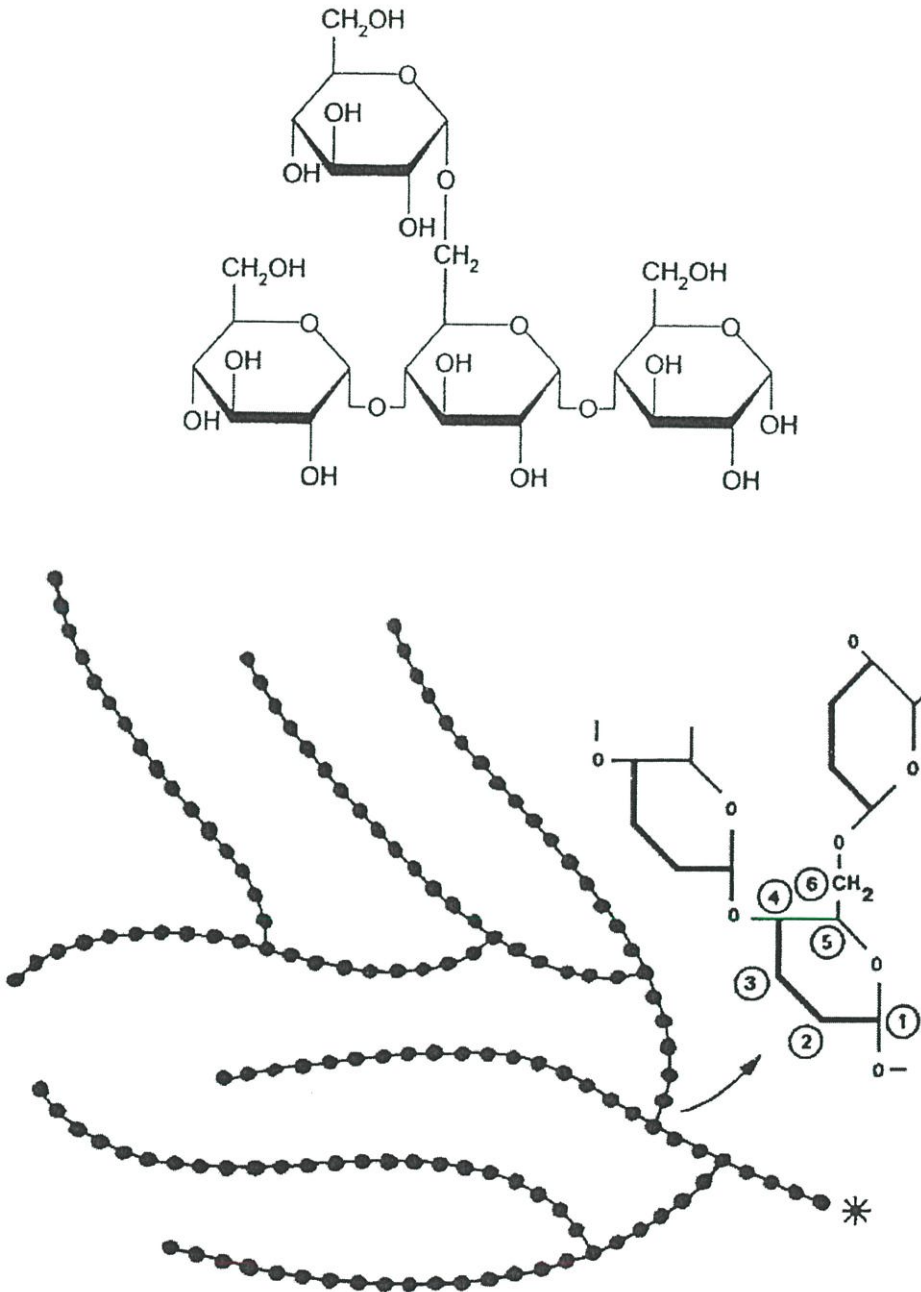
เกลียวคลายตัว

ม้วนอิสระ

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะเกลียวของอะมิโลส [7]

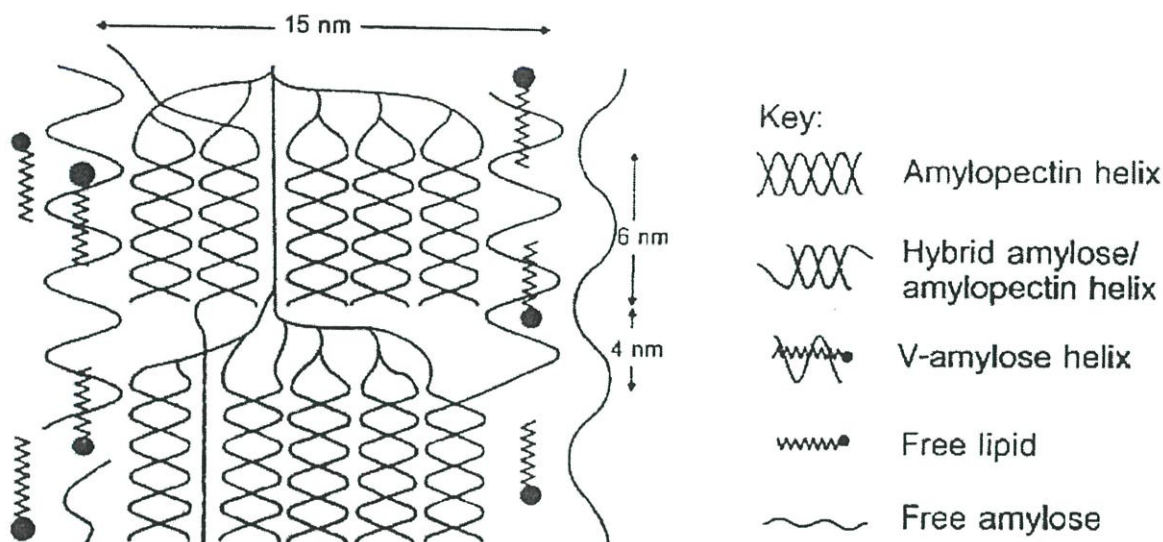
อะมิโลเพกติน (amylopectin)

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างอะมิโลเพกติน [5]

แบบจำลองของโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกติน และ monoacyl lipid ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.7 อะมิโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะมิโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (double helix)



รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกตินและไขมัน [8]

2.4 กระบวนการผลิตแป้งสาลี [9]

ข้าวสาลี (wheat) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Triticum* spp. มีปลูกตั้งแต่สมัยโบราณ ในประเทศอิหร่าน อียิปต์ กรีซ และประเทศในทวีปยุโรป ต่อมาได้ขยายพื้นที่ไปตามส่วนต่างๆ ของโลก ข้าวสาลีที่นิยมปลูกได้แก่ พันธุ์ที่ใช้ทำขนมปัง (*T. aestivum*) พันธุ์ที่ใช้ทำมักกะโรนี (*T. durum*) และพันธุ์ที่ใช้ทำขนมเค้ก (*T. compactum*) ในปัจจุบันได้มีการนำแป้งสาลีมาใช้ประโยชน์ในร้านซักรีดต่างๆ เนื่องจากความแตกต่างของขนาดเม็ดแป้ง เม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปในช่องว่างระหว่างเส้นใยของเนื้อผ้า ส่วนเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเคลือบผิวหน้าเสื้อผ้า ให้เป็นสารประกอบในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอางเนื่องจากมีสีขาวยบริสุทธิ์ สำหรับอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำแป้งสาลีมาใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติการเป็นเจลที่อุณหภูมิเย็น ใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ เค้ก ใช้ในการผลิตกาวติด wallpaper นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้งแปรรูปต่างๆ เช่น ไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (dialdehyde starch) สตาร์ชแซนไทด์ (starch xanthide) และเป็นวัตถุดิบในการหมักกรดอินทรีย์อีกมากมาย องค์ประกอบต่างๆ ในเมล็ดข้าวสาลี ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวสาลี [10]

องค์ประกอบ	%
ความชื้น	14
แป้ง	64
โปรตีน	12.5
ไขมัน	1.65
เยื่อใย	2.5
เถ้า	1.75
น้ำตาลและกัม	3.6

กระบวนการผลิตแป้งสาลีมีหลักการเช่นเดียวกับการผลิตแป้งข้าวโพด ข้าวสาลีที่นำมาไม่แห้ง และทำความสะอาดโดยการดักกรองผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็คือ ฟลัวร์ (wheat flour) ซึ่งอุดมไปด้วยโปรตีน กลีโคแร่ เหมาะสำหรับทำอาหาร เช่น ขนมปังต่างๆ แต่ถ้าจะผลิตเป็นแป้งสตาร์ช (wheat starch) จะต้องใช้น้ำเป็นตัวกลางแยกสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ได้แก่ ไขมัน และโปรตีนออกจากแป้ง

กระบวนการผลิตแป้งข้าวสาลีมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ วิธีที่นิยมมากที่สุด คือ Martin process วิธี Ammonia process เป็นวิธีแยกแป้งออกจากกลูเตน โดยใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) และวิธี Batter process ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี Martin process

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของแป้งสาลี [12]

คุณสมบัติ	แป้งสาลี
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	1-40
ปริมาณอะมิโลส (%)	24-27
DP อะมิโลส	800-1600
Pasting temperature ($^{\circ}\text{C}$)	77
Peak viscosity (BU)	65
Final viscosity (BU)	270
Trough viscosity (BU)	60
Onset temperature (T_0 , $^{\circ}\text{C}$)	48-50
Peak temperature (T_p , $^{\circ}\text{C}$)	59-60

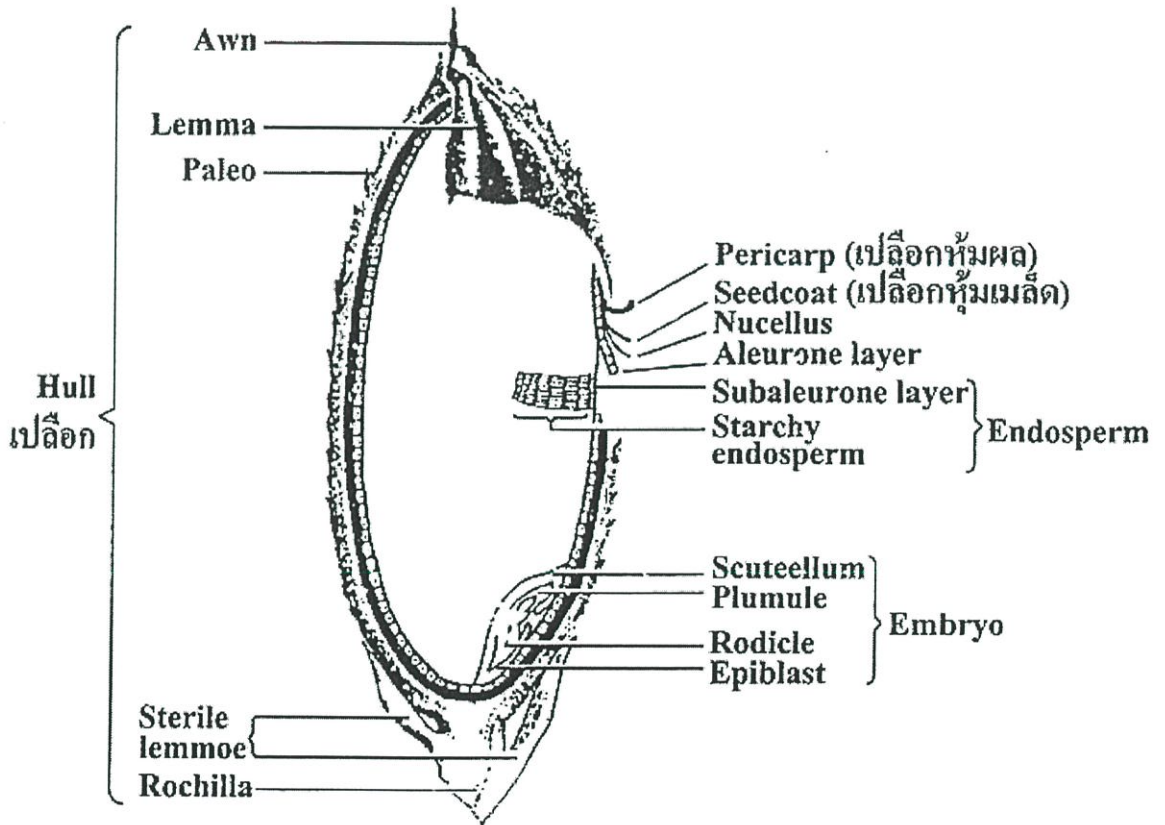
2.5 กระบวนการผลิตแป้งข้าว

ข้าวเจ้าหรือ *Oryza sativa* L. มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีหลายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินดิกา (*O. sativa indica*) ปลูกมากในแถบมรสุม ซึ่งมีฝนตกชุกและแสงแดดเพียงพอ และพันธุ์จาปอนิกา (*O. sativa japonica*) ปลูกในพื้นที่เขตอบอุ่น ข้าวที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นข้าวหักหรือข้าวเกรดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง ข้าวหักมีองค์ประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.9 แป้งข้าวเจ้ามีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็กเนื่องจากแป้งข้าวไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคือง และใช้เป็นสารทำให้แข็ง (laundry stiffening agent) ในการซักผ้า

ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าในประเทศไทยนั้น ถึงจะเป็นการไม่เปียก แต่โปรตีนและสิ่งแปลกปลอมส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เป็นประเภทฟลาวร์ (rice flour) และนิยมใช้ข้าวประเภทที่มีอะมิโลสสูง ทั้งนี้เพราะเมื่อนำไปประกอบอาหาร เช่น ทอด จะให้ความกรอบแข็งหรือนำไปนึ่ง เมื่อเย็นลงจะเกิดแผ่นฟิล์ม (เช่น กว๊วยเตี๋ยว เส้นหมี่) ข้าวหอมมะลิที่บริโภคไม่เหมาะสมใช้ผลิต rice flour เพราะมีปริมาณอะมิโลสต่ำ ส่วนการผลิตแป้งสตาร์ช (rice starch) คือการสกัดเอาโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมในแป้งฟลาวร์ออกจนเกือบหมด

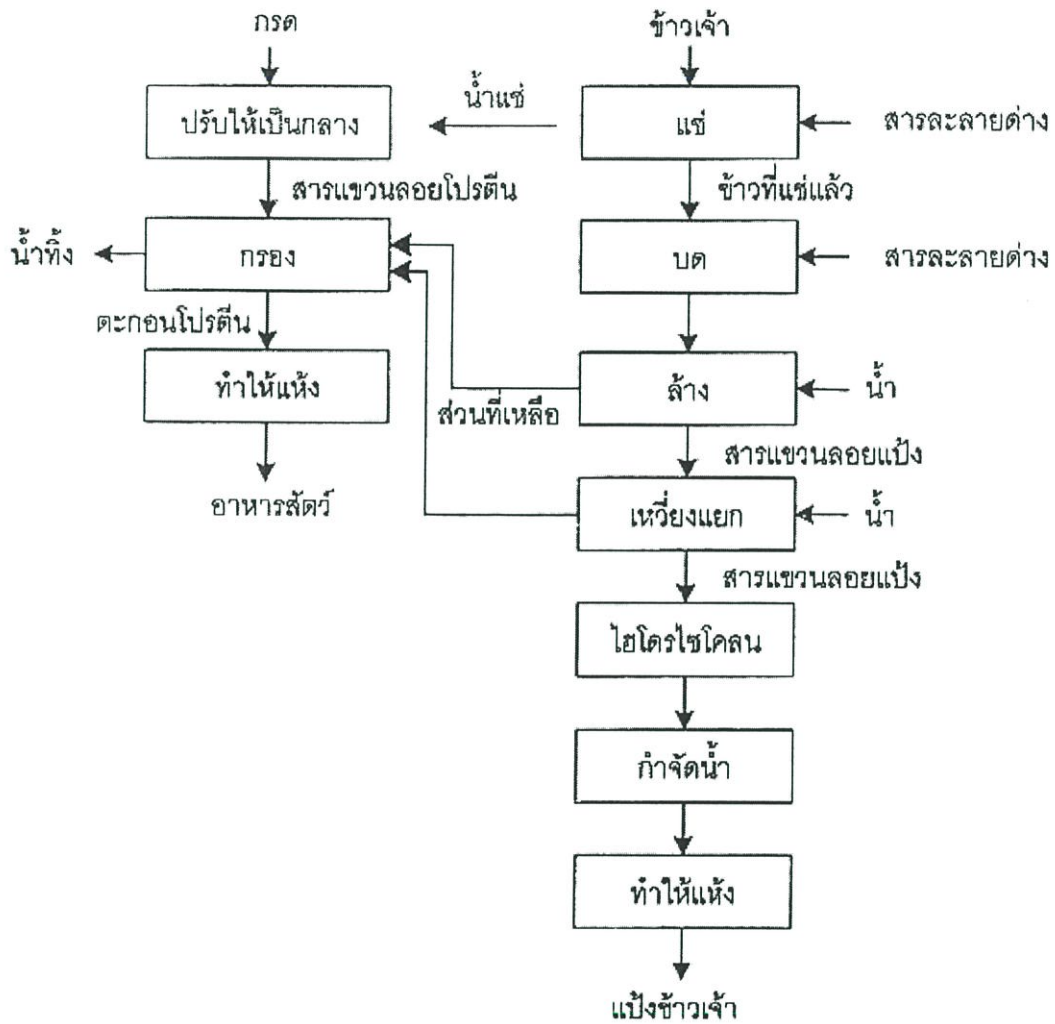
ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวหัก [11]

องค์ประกอบ	%
ความชื้น	12.0
แป้ง	79.2
โปรตีน	7.0
ไขมัน	0.4
เถ้า	0.5
ส่วนที่เหลือ	0.9



รูปที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวเจ้า [13]

กระบวนการผลิต เริ่มจากนำข้าวเปลือกมาล้างทำความสะอาด แยกสิ่งแปลกปลอม (ถ้าเป็นข้าวเปลือกต้องผ่านการสีก่อน) ดังแสดงกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า [11]

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้า [14]

คุณสมบัติ	แป้งข้าวเจ้า
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	6.8
ปริมาณอะมิโลส (%)	18-27
DP อะมิโลส	900-1,100
Onset temperature (T_0 , °C)	60
Peak temperature (T_p , °C)	77

2.6 กระบวนการผลิตแป้งท้าวายม่อม

แป้งท้าวายม่อม arrowroot (*Maranta arundinacea*) มีชื่อเรียกว่าต้นสาคุ เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ arrowroot ในภาษาพื้นเมืองชื่อว่า zulu มีพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ arrowroot คือ amaranth มีภาษาพื้นเมืองว่า sagu เนื่องจากพืชสองชนิดนี้มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เป็นไปได้ว่า เราเรียกชื่อ arrowroot สลับกับ sagu และไม่เกี่ยวข้องกันกับลำต้นปาล์มสาคุ (*Metroxylon sagu*)

ส่วนของต้นท้าวายม่อมที่เก็บแป้งเป็นส่วนราก (rhizome) และเป็นส่วนที่ขยายพันธุ์ได้ ต้นท้าวายม่อมเป็นพืชล้มลุก อายุ 1 ปีในฤดูร้อน ใบจะแห้ง หยุดการเจริญสามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่อฝนตกต้นใหม่ก็จะออกเจริญเติบโตต่อไป ในกระบวนการผลิตแป้งเหมือนกับกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แต่ต้องผ่านขั้นตอนการล้างมากกว่า เพื่อหลีกเลี่ยงรสขมจากเปลือกนอกของหัว เม็ดแป้งมีขนาด 13-70 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีขนาด 5-35 ไมครอน สามารถสกัดแป้งได้ 25-30%

เนื่องจากการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมีในแถบหมู่เกาะ West Indies ส่วนในฟิลิปปินส์ และจีนยังเป็นแบบอุตสาหกรรมขนาดเล็ก การแยกแป้งยังใช้วิธีการตกตะกอน และการทำแห้งยังใช้วิธีการตากแดด หรือทำแห้งบนพื้นที่ให้ความร้อน (อังไฟ)

ในประเทศไทยมีการปลูกกันทั่วไป แต่ยังไม่ใช้พืชหลักและยังไม่มีการผลิตแป้งในระดับอุตสาหกรรมในท้องถิ่นมักเรียกกันว่ารากสาคุ รูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะต้นและรากของท้าวายม่อมตามลำดับ ลักษณะพิเศษของแป้งท้าวายม่อม คือมีเม็ดแป้งที่ใหญ่และมีความแข็งแรงของเม็ดสูง ทำให้มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะ (pasting temperature) สูง คุณสมบัติของแป้งท้าวายม่อมแสดงไว้ในตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.11 แสดงต้นของทำวยายม่อม [9]



รูปที่ 2.12 แสดงรากของต้นทำวยายม่อม [9]

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของแป้งท้าวยายม่อม [15]

คุณสมบัติ	แป้งท้าวยายม่อม
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	13-70
ปริมาณอะมิโลส (%)	18
DP อะมิโลส	3,430
Pasting temperature (°C)	76.20
Peak viscosity (RVU)	420
Final viscosity (RVU)	271
Trough viscosity (RVU)	188
Onset temperature (T ₀ , °C)	71.12
Peak temperature (T _p , °C)	76.06
Enthalpy (ΔH, J/g)	16.60

ตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะของเม็ดแป้งแต่ละชนิด [16]

	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้ง มันสำปะหลัง	แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว
แหล่งของแป้ง	ส่วนหัว	เมล็ดธัญพืช	เมล็ดธัญพืช	ส่วนราก	เมล็ดธัญพืช
เส้นผ่านศูนย์กลาง(μm)	5 – 100	2 – 30	1 – 45	4 – 35	2 – 30
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย โดยจำนวน	27	10	8	15	10
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย โดยน้ำหนัก	40	15	25	25	15
จำนวนเม็ดแป้ง (x 10 ⁶) ต่อแป้ง 1 กรัม	60	1300	2600	500	1300
โมเลกุลของแป้ง (x 10 ¹²) ต่อเม็ดแป้ง 1 หน่วย	50	10	4	4	0.01
Specific area (m ² /kg)	100	300	500	200	300

ตารางที่ 2.9 แสดงขนาดและรูปร่างของเมล็ดแป้งชนิดต่างๆ [17]

แหล่งแป้ง	ขนาด (ไมครอน)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2 – 35	กลม ค่อนข้างรี
ข้าวโพด	5 – 25	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวเจ้า	3 – 5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2 – 35	กลม คล้ายไข่
ข้าวฟ่าง	15 – 35	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวโอต	5 – 8	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10 – 50	กลม ค่อนข้างรี
ลูกเดือย	8 – 20	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
Triticale	2 – 35	กลม ค่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15 – 121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
มันสำปะหลัง	5 – 35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
ทำวยายม่อม	13 – 70	รูปไข่
สาคุ	15 - 65	รูปไข่ที่มีรอยตัด

ตารางที่ 2.10 แสดงคุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95°C [18]

แป้ง	กำลังการพองตัว	การละลาย (%)
มันฝรั่ง	> 1000	82
สาคุ	97	39
มันสำปะหลัง	71	48
ทำวยายม่อม	54	28
มันเทศ	46	18
ข้าวโพด	24	25
ข้าวฟ่าง	22	22
ข้าวสาลี	21	41
ข้าวเจ้า	19	18
ข้าวโพดข้าวเหนียว	64	23
ข้าวเจ้าข้าวเหนียว	56	13
ข้าวฟ่างข้าวเหนียว	49	19

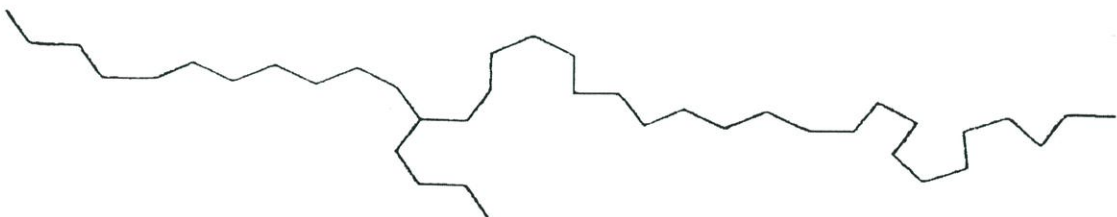
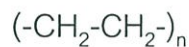
2.7 การนำแบ่งไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ [19]

แบ่งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมและใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างมากมาย เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ยารักษาโรค และวัสดุก่อสร้างต่างๆ เป็นต้น การที่สามารถนำแบ่งไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เกิดจากสมบัติของแบ่งในด้านความเหนียวชั้น การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดเป็นฟิล์ม แถมยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย นอกจากนั้นแบ่งยังสามารถใช้ผสมในพลาสติกเป็นสารตัวเติม เพื่อให้มีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพและยังมีประโยชน์ในการใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อด้วย โดยปัจจุบันได้มีการทำ โฟมพลาสติกจากแบ่ง โฟมจากแบ่ง เพื่อทำภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

2.8 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) [20]

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด จะมีสาขาใช้บ้างแต่น้อยมาก อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นี้โดยทั่วไปใช้ความดันต่ำมาก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นในเชิงการค้าตั้งแต่ปีค.ศ. 1955

สูตรโครงสร้างทางเคมีดังนี้



สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด ใ้พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูงมาก ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยกระบวนการใช้ความดันสูงทั่วไป ความหนาแน่นจะอยู่ในช่วง 0.95 – 0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมตัวประมาณ 135 องศาเซลเซียส ความเหนียว ความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุอื่นๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อหุ้มของและอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) หุ้มสายไฟ ทำสายยาง และอื่นๆ

2.9 สารตัวเติม (Fillers) [21]

คำว่า "ฟิลเลอร์" ปกติจะใช้กับสารเติมแต่งซึ่งเป็นของแข็งที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล สารตัวเติมที่เป็นของแข็งอาจมีได้หลายลักษณะ ดังนี้

2.9.1 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นเม็ด (Particulate filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ไชนาเคลย์ (China clay) ผงเขม่าดำ หรือคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สารตัวเติมไม่เสริมแรง (Inert filler) เป็นสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติบางอย่าง ตัวอย่างเช่น ในสารประกอบของพลาสติกไฮดรอกซีคาร์บอเนต การเติมสารตัวเติมไม่เสริมแรงช่วยลดการบวมตัวที่หัวตาย (Die swell) เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีด เพิ่มมอดุลัสและความแข็งแรง อาจทำให้มีพื้นผิวเพื่อการใส่สีต่อไป ปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า และลดการยึดเหนียวติดกัน (Tackiness) โดยทั่วไปมักเป็นสารที่ช่วยลดต้นทุนของสารประกอบเพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ไชนาเคลย์ ทัลค์ (Talc) แบเรียมซัลเฟต (Barium sulphate) โดยปกติสารตัวเติมนี้ไม่ละลายในของเหลวใดๆ ที่สารประกอบพอลิเมอร์อาจจะต้องสัมผัส สารตัวเติมแต่ละชนิดอาจมีได้หลายเกรด แตกต่างกันไป เนื่องจาก

1. ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย และการกระจายขนาดของอนุภาค เมื่อใช้สารตัวเติมในพอลิเมอร์พบว่า สารตัวเติมที่มีอนุภาคละเอียดจะให้สมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัส ความแข็ง (Hardness) ที่สูงขึ้น สำหรับอนุภาคที่หยาบจะให้ความแข็งแรงของสารประกอบต่ำกว่าสารประกอบที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม แต่ถ้าขนาดของอนุภาคละเอียดมากจนกระทั่งทำให้สมบัติที่กล่าวมาแล้วนี้สูงขึ้นมากปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่าการเสริมแรง (Reinforcement)

2. รูปร่างของอนุภาคและความพรุน (Porosity) โดยรูปร่างของอนุภาคมีอิทธิพลต่อสมบัติต่างๆ ด้วย ตัวอย่างเช่น อนุภาคของไชนาเคลย์มีลักษณะเป็นแผ่น (Plate like) มีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวในระหว่างกระบวนการผลิตทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติเป็น Anisotropic ส่วนอนุภาคของสารตัวเติมที่มีรูพรุนจะดูดซับสารตัวเติมอื่นๆ ไว้ทำให้สารตัวเติมที่ถูกดูดไว้ไร้ประสิทธิภาพ

3. ธรรมชาติทางเคมีของผิวหน้า (Chemical nature of the surface) สารตัวเติมที่เป็นแร่ธาตุ (Mineral filler) มักมีหมู่ที่มีขั้วอยู่บนผิว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้เปียกน้ำได้ง่าย แต่ไม่เกาะติดกับพอลิเมอร์ การปรับปรุงให้สารตัวเติมเกาะติดกับพอลิเมอร์ได้ดีจำเป็นต้องบำบัด (Treat) ผิวของสารตัวเติมเสียก่อน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตอาจถูกบำบัดด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) เพื่อให้หมู่ของกรดยึดติดกับอนุภาคของสารตัวเติม ขณะที่สายโซ่อะลิฟาติกสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้

4. สารปนเปื้อน (Impurity) เช่น กรวดทราย (Grit) และไอออนของพวกโลหะ (Metal ions) สารปนเปื้อนที่มีอยู่ในสารตัวเดิมซึ่งมาจากแร่ธาตุจะมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์อย่างมาก กรวดทรายขนาดใหญ่จะเป็นจุดอ่อนอยู่ในเนื้อพลาสติก ทำให้พลาสติกแตกหักภายใต้ความเค้นได้ง่าย หรือถ้ามีเศษทองแดง มังกานีส และเหล็กเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเกิดออกซิเดชัน ขณะที่ตะกั่วจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ที่อยู่ในสารเติมแต่ง หรือไอของซัลเฟอร์ (Sulphurous fumes) ที่มีอยู่ในบรรยากาศ ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีขึ้น

2. สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ใช้ได้ผลมากกับพวกอีลาสโตเมอร์ (แต่อาจใช้กับพลาสติกชนิดพีวีซีซึ่งทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้น) สำหรับยางสไตรีน-บิวตะไดอีน (SBR) ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เมื่อผสมคาร์บอนแบล็คเข้าไปช่วยเสริมแรง ค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังเพิ่มความอดุลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) อีกด้วย แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็คมากเกินไป จะทำให้ปริมาตรของยางในคอมโพสิต (Composites) ลดลงจนไม่สามารถที่จะยึดอนุภาคของสารตัวเติมไว้ได้ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง สำหรับสารตัวเติมที่อนุภาคมีขนาดเท่าๆ กันคาร์บอนแบล็คจัดเป็นสารตัวเติมที่มีอำนาจในการเสริมแรงสูงสุด แต่ผงซิลิกา (Silica) สามารถใช้ประโยชน์ในสารประกอบที่ไม่มีสีดำ (Non-black compound) ส่วนสารตัวเติมอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซิงก์ออกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกต มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้บ้าง

2.9.2 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นยาง (Rubbery filler) มักใส่เข้าไปในเทอร์โมพลาสติก อสังฐานที่แข็งเปราะ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียว (Toughness) ตัวอย่างที่รู้จักดีคือการเติมยาง SBR และพอลิบิวตะไดอีน เข้าไปในพอลิสไตรีน ทำให้ได้พอลิสไตรีน ที่สามารถทนแรงกระแทกสูง ที่เรียกว่า HIPS (High impact polystyrene) หรือการใส่ยางบิวตะไดอีน-อะครีโลไนไตรล์ในพีวีซี และยางเอทิลีน-พโรพิลีน ในพอลิพโรพิลีน เป็นต้น

2.9.3 สารตัวเติมที่เป็นเรซินสังเคราะห์ (Synthetic resin) ในขณะที่ยุคพัฒนาพลาสติก (Plastics technologist) ได้ผสมยางเข้าไปในเรซินหรือวัสดุพลาสติก ผู้พัฒนายาง (Rubber technologist) ก็ได้ทำการผสมเรซินสังเคราะห์หรือพลาสติกเข้าไปในยาง ตัวอย่างเช่น บิวตะไดอีน-สไตรีนเรซินที่ประกอบด้วยอย่างน้อย 50% สไตรีน สามารถนำไปผสมกับยางเพื่อทำเป็นพื้นรองเท้า และแปรงล้างรถ ฟีนอลิกเรซินซึ่งมีความหนืดต่ำที่อุณหภูมิของการผลิตอาจช่วยเพิ่มการไหลและความสามารถในการแปรรูปของสารประกอบได้ ในระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชันพร้อมๆ กับเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แข็งขึ้น

2.9.4 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) สารตัวเติมชนิดนี้มีการนำมาใช้เป็นเวลานานแล้ว โดยใช้เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติและเส้นใยอินทรีย์สังเคราะห์สั้นๆ เช่น

ในลอน ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทก ความเหนียวของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เส้นใยอินทรีย์ เช่น ใยหิน (Asbestos) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) มักใช้กับทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ซึ่งต้องการสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อน และความแข็งแรง

สารตัวเติมจะถูกใช้ให้ได้ผลดีที่สุด เมื่อมีแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ วิธีที่นิยมใช้กันมานาน ได้แก่ การเคลือบผิวสารตัวเติมด้วยสารเคมีที่มีส่วนซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยา 2 ส่วน โดยส่วนหนึ่งจะยึดกับสารตัวเติม อีกส่วนหนึ่งยึดกับพอลิเมอร์ ตัวอย่างที่รู้จักกันดี ได้แก่ การเคลือบแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก (เรียกแคลเซียมคาร์บอเนตที่เคลือบผิวนี้ว่า “Activated” whiting) ซึ่งมักใช้กับยางไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ หรือการเคลือบผิวไซนาเคลย์ด้วยสารพวกเอมีน

สารเคมีที่เพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมนี้เรียกว่า สารคู่ควบ (Coupling agent) โดยหลักการ คือ ด้านหนึ่งของสารคู่ควบจะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะโควาเลนต์กับสารตัวเติม และเมื่อใส่สารตัวเติมซึ่งผ่านการเคลือบผิวแล้วเข้าไปในพอลิเมอร์ ปลายอีกด้านของสารคู่ควบจะเกิดพันธะทางกายภาพหรือทางเคมีกับพอลิเมอร์ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การใช้สารคู่ควบในผลิตภัณฑ์เส้นใยแก้วโดยการใช้ไวนิลไตรคลอโรไซเลน (Vinyltrichlorosilane) ซึ่งเชื่อมกับเรซินของพอลิเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ทางหมู่ไวนิลที่ไม่อิ่มตัวเป็นต้น

2.10 ตัวการที่ทำให้เกิดการย่อยสลายในพอลิเมอร์ [22]

การย่อยสลายที่เกิดกับพอลิเมอร์ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในลักษณะที่มีการแตกออกของโครงสร้าง หลังจากที่น่าพอลิเมอร์นั้นไปใช้งานแล้ว การย่อยสลายที่เกิดในพอลิเมอร์มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลสลายไปเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทำให้สมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการสูญเสียตัวพลาสติกไซเซอร์ที่ผสมเข้าไว้ เนื่องจากการถูกความร้อนหรือแสงเหล่านี้เป็นต้น เราอาจแยกสาเหตุที่ทำให้เกิดการย่อยสลายในพอลิเมอร์ได้เป็น 2 กลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1 เป็นตัวการทางด้านพลังงาน แบ่งออกเป็น

- พลังงานจากความร้อน
- พลังงานกล
- พลังงานจากรังสี

กลุ่มที่ 2 เป็นตัวการทางเคมี แบ่งออกเป็น

- การเกิดไฮโดรลิซิส
- การเกิดออกซิเดชัน

- การเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ

ตัวการแต่ละชนิดมีผลต่อการเกิดการย่อยสลายของพอลิเมอร์ ดังนี้

1. การย่อยสลายโดยความร้อน พอลิเมอร์ที่ใช้งานกับอุณหภูมิสูงๆ จะเกิดการย่อยสลายโดยสายโซ่โมเลกุลจะแตกออกหรือขาด ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ลักษณะของการย่อยสลายอาจเกิดได้ 2 ลักษณะคือ

- การย่อยสลายแบบสุ่ม (random degradation) มักเกิดกับพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น การแตกออกของสายโซ่จะเกิดที่จุดใดๆ ก็ได้ในสายโซ่พอลิเมอร์ คือมีโอกาสเกิดการแตกออกได้เท่าๆ กันทุกจุดไม่แน่นอน ส่วนที่เหลือจะยังคงใหญ่กว่ามอนอเมอร์

- เกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) หรืออาจเรียกว่า unzipping คือมอนอเมอร์จะหลุดออกทีละ 1 หน่วยจากสายโซ่โมเลกุล มักเกิดกับพอลิเมอร์ที่ได้จากพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว

2. การย่อยสลายโดยพลังงานกล ในพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวๆ บางครั้งถ้าได้รับแรงกระทำจากภายนอกอาจทำให้เกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ตัวอย่างเช่น เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงกระทำด้วยอัตราการเลื่อนไหลสูงไม่ว่าจะอยู่ในสถานะสารละลายหรือของแข็งก็ตามทำให้เกิดการฉีกขาดได้

3. การย่อยสลายโดยพลังงานจากรังสี พอลิเมอร์ที่นำไปใช้งานส่วนมากจะต้องถูกแสงเกือบทั้งนั้น เพราะฉะนั้นโอกาสเกิดการย่อยสลายโดยพลังงานจากรังสีจึงมีมากทีเดียว รังสีดังกล่าวอาจทำให้เกิดการเร้า (exciting) หรืออาจทำให้เกิดการอ็อกซิไดซ์ ซึ่งเรียกรังสีพลังงานสูงกรณีแรกพลังงานที่เพียงพอที่จะเร้าให้อิเล็กตรอนย้ายไปอยู่ในออร์บิทัลใหม่ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเดิม ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกออกของพันธะระหว่างอะตอม แต่ถ้าพลังงานสูงขึ้นจะทำให้มีโอกาสเกิดการย้ายอิเล็กตรอนออกจากอะตอม ทำให้เกิดการอ็อกซิไดซ์ได้เป็นอ็อกซิ

4. การย่อยสลายจากการเกิดไฮโดรลิซิส พอลิเมอร์ที่เกิดจากพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายได้โดยการไฮโดรไลซิส เช่น พอลิเอสเทอร์

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะถูกเร่งให้เร็วขึ้นถ้ามีไฮโดรเจนอ็อกซิเจน หรือไฮดรอกซิลอ็อกซิเจน นอกจากนี้ตัวเร่งในธรรมชาติ เช่น เอนไซม์ ก็เป็นตัวเร่งให้เกิดไฮโดรลิซิสด้วยเช่นกัน พวกพอลิเมอร์ประเภทอะตอมต่างชนิดกันในสายโซ่ เช่น พอลิอะซีตอล พอลิเอสเทอร์ และพอลิเอไมด์ จะถูกไฮโดรไลซิสง่ายกว่าพอลิเมอร์ประเภทอะตอมในสายโซ่ชนิดเดียวกัน

5. การย่อยสลายจากการถูกออกซิไดซ์ การย่อยสลายที่เกิดในพอลิเมอร์ซึ่งมีผลมาจากการถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจน นับเป็นการย่อยสลายที่พบมากเช่นกัน แต่กลไกของการเกิดออกซิเดชันในพอลิเมอร์ค่อนข้างจะซับซ้อนมาก และเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ชนิดของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่พบว่าออกซิเดชันที่เกิดในพอลิเมอร์พวกไฮโดรคาร์บอน เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน

และยาง จะมีกลไกที่แตกต่างกันไปในขบวนการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว พิจารณาการเกิดออกซิเดชันในพอลิเอทิลีน เนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ถ้าไม่ได้ถูกแสงจากดวงอาทิตย์จะเกิดออกซิเดชันโดยออกซิเจนน้อยมาก ลักษณะที่ถูกลูกออกไซด์คือ ออกซิเจนจะสอดเข้าไปตรงระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับอะตอมของไฮโดรเจนได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์

ถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้น ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ อาจจะสลายตัวได้หมู่คีโตนกับน้ำ การเกิดออกซิเดชันลักษณะดังกล่าวนี้ไม่ทำให้เกิดการย่อยสลายภายในสายโซ่ เพียงแต่เกิดหมู่คีโตนขึ้นมาภายในสายโซ่โมเลกุล สีจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ความแข็งแรงจะลดน้อยลง ในกรณีที่ถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต ปฏิกิริยาจะซับซ้อนมากขึ้น และจะเกิดเรดดิคอลลายโซ่จะถูกย่อยสลาย

2.11 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ [23]

การสลายตัวได้ในทางชีวภาพของพลาสติกมี 3 ลักษณะคือ

1. พลาสติกไม่ได้เสื่อมสลายเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุน และต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด

2. การเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลงเพื่อให้จุลินทรีย์สลายต่อ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำต่อไป

3. การเสื่อมสลายเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นโดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตนและพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรทอาคีเรทเป็นต้น

2.12 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.B. Greizertein และคณะ [24] การย่อยสลายของถุงที่ทำมาจากพอลิเอทิลีนโดยมี ECOSTAR PLUS® และแป้งผสมอยู่ นำไปตากแดดทิ้งไว้ตามธรรมชาติ โดยเติมเศษใบไม้และเศษหญ้าเข้าไปในถุงนี้ครึ่งหนึ่งถูกฝังอยู่ในดิน ส่วนอีกครึ่งหนึ่งอยู่บนพื้นผิวน้ำดิน ศึกษาสมบัติความต้านทานแรงดึง, FTIR และ UV-vis spectra, differential scanning calorimetry และ light microscopy จากผลการทดลองพบว่าถุงที่อยู่บนผิวน้ำดินเกิด oxidation ปริมาณแป้งที่ผสมอยู่ในถุงลดลง melting point ลดลง และเปราะ ส่วนถุงที่ฝังอยู่ในดินมี melting point ต่ำกว่าและเกิด oxidation ซึ่งให้เห็นว่าการทิ้งไว้ให้โดนแดดทำให้เกิดการย่อยสลายที่บริเวณผิวน้ำของถุงและการย่อยสลายของถุงที่ฝังอยู่ในดินอาจเกี่ยวข้องกับขบวนการอื่นๆ อีก

ธนิดา ปะบุญเรือง [25] ศึกษาถึงวัสดุบรรจุหีบห่อที่สลายตัวได้ โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเมอร์หลักและผสมแป้งมันสำปะหลัง ได้ฟิล์มพอลิเอทิลีน 2 ชนิด ความแตกต่างของฟิล์มทั้งสอง คือ ฟิล์มที่ผสมและไม่ผสมสาร prooxidant ทดสอบการสลายตัวของฟิล์มเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยการนำฟิล์มไปตากแดดนอกอาคารและฝังดิน ในขณะที่การสลายตัวทางชีวภาพทำโดยการทดสอบด้วยเชื้อรา *Aspergillus niger* และ *Penicillium pinophilum* ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี โดยวัดค่าความต้านทานแรงดึง ค่าการยืดเมื่อขาด ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยการวัดความหนืด ผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่ผสมแป้งในปริมาณมากมีอัตราการสลายตัวสูง และมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยมากหลังการตากแดด 6 เดือน จากการนำฟิล์มนี้ไปตากแดดและฝังดินไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญกับฟิล์มพอลิเอทิลีน การสลายตัวทางชีวภาพด้วยเชื้อรามีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติที่ลดลงในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมแป้ง

บุญศรี ศิลาพัชรนันท์ และ ธิดาพันธ์ ชื่อสัตยวงค์ [26] ศึกษาการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเมอร์หลัก และผสมแป้งมันสำปะหลัง โดยนำฟิล์มพอลิเอทิลีน 2 ชนิดมาหาความแตกต่างของฟิล์มทั้งสองคือ ฟิล์มที่ผสมและไม่ผสมสาร prooxidant ทดสอบการสลายตัวของฟิล์มเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยการนำฟิล์มไปตากแดดและฉายแสง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมี วัดค่าความต้านทานแรงดึง ค่าการยืดเมื่อขาด และน้ำหนักโมเลกุล ผลการวิจัยพบว่า ฟิล์มที่ผสมแป้งในปริมาณมากมีอัตราการสลายตัวสูง และมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยมากหลังจากฉายแสง ส่วนฟิล์มที่ผสมสาร prooxidant มีการสูญเสียสมบัติต่างๆ มากกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมสาร prooxidant

Pieter Gijsman and Jacq Sampers [27] ศึกษาอิทธิพลของออกซิเจน ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่อการย่อยสลายด้วยแสง UV ของพอลิเอทิลีน วัดการย่อยสลายโดยการคำนวณหาออกซิเจนด้วยการหา CO และ CO₂ โดยใช้ FT-IR และหาสมบัติเชิงกล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (40 – 50°C) ความดันออกซิเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้การตรวจจับของ IR ลดลงและพบปริมาณของออกซิเจนที่ถูกระตุ้นสูงขึ้นทำให้ไม่สามารถตรวจสอบทางเครื่องมือได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (29°C) จะมีอิทธิพลของความดันออกซิเจนน้อยมาก สามารถสรุปได้ว่าจะเกิดการเริ่มการย่อยสลายด้วยแสงเนื่องจากประจุมักมีการเคลื่อนที่ซับซ้อนขึ้น

M.K. Loutcheva และคณะ [28] ได้ศึกษาถึงการรีไซเคิลของ High Density Polyethylene แบบเนื้อเดียวจากภาชนะบรรจุของเหลวเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งแรงนี้ก็ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในการ reprocessing และสภาวะที่ใช้การย่อยสลายด้วยความร้อน เชิงกลนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างขบวนการทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ช่วงระยะเวลาและความเครียดที่ใช้ อาจกล่าวได้ว่าในขบวนการ reprocessing หากใช้เครื่องมือ

ช่วงระยะเวลาสั้นๆ ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติสัญญาณวิทยาของวัตถุดิบมีผลต่อการรีไซเคิลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เราสามารถสังเกตการย่อยสลายและสมบัติเชิงกลที่ลดลงได้โดยดูจากจำนวนของขั้นตอนในการรีไซเคิลที่ใช้เครื่องมือในช่วงระยะเวลานาน การเติม antioxidant agent ลงทำให้พอลิเมอร์ยังคงสมบัติอยู่ได้แม้ว่าจะผ่านการรีไซเคิลมาหลายครั้งแล้ว

Jurgen Lorcks [29] พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและพลาสติกผสมโดยเฉพาะพลาสติกที่มาจากแหล่งอุตสาหกรรมเกษตร คือสิ่งแปลกใหม่ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นเทคโนโลยีในอนาคต พลาสติกทางชีวภาพ (bioplastics) ที่มีแป้งผสมอยู่จะใช้การ polymerization ตามธรรมชาติ สามารถหาวัตถุดิบและขบวนการได้ง่าย จากการพัฒนาล่าสุดของ BIOTEC® ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับ Thermoplastics starch (TPS®) และของผสมของ TPS® กับ hydrophobic biodegradable polymers พบว่าขบวนการ reaction-compounding process technology ทำให้ได้อนุพันธ์ของ TPS® และ starchesters ในขบวนการ continuous extrusion การนำ TPS® ไปใช้ประโยชน์เป็นพลาสติกทางชีวภาพแบบเม็ด (BIOPLAST) คือใช้ใน film extrusion และ injection moulding พิล์ม BIOFLEX มีสมบัติเชิงกลอย่างเดียวกับ PE คือ ทึบ ไม่โปร่งใส สามารถพิมพ์ได้ สามารถฉีกได้ สามารถหดตัวได้ และสามารถทำให้มีสีได้ ไขมันสามารถซึมผ่านฟิล์ม BIOFLEX ได้และมีสมบัติในการกั้นออกซิเจนได้ดี ใช้เป็นฟอยล์แทนถุงขยะ ถุงช้อปปิ้ง ถุงหิ้ว ภาชนะบรรจุอาหาร ผ้าอ้อม ใช้ทางด้านการเกษตรซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพและสามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยได้

U. Funke และคณะ [30] ได้ศึกษาถึงแป้งหลายชนิดมาผสมกับพลาสติกไฮเซออร์จากธรรมชาติและเส้นใยที่มีขายทั่วไปโดยใช้เทคนิคการ extrusion และ injection moulding สภาวะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้งและ additived ที่ใช้ ลักษณะของพอลิเมอร์แป้งเช่น อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน และการกระจายตัวของมวลโมเลกุล โดยศึกษาทั้งตามธรรมชาติและที่ได้ทำการ extrude แล้ว ผลที่ได้แสดงว่าการ treat แป้งแบบ thermomechanical ทำให้เกิด depolymerization โดยเฉพาะส่วนที่เป็นอะไมโลเพกตินในขณะที่ยังคงแป้งอยู่ การปรับปรุงสมบัติต่างๆ สามารถทำได้โดยเติมเส้นใยเล็กน้อยลงในตัวอย่างแป้ง ผลคือทำให้ค่า tensile strength และการทนน้ำหนักเพิ่มขึ้น

วัฒนาพร พรสิริพงษ์ [31] ศึกษาพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมแป้งและสารช่วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งประกอบด้วยยางธรรมชาติและซิงค์สเตียเรต ศึกษาการย่อยสลายโดยการให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และการย่อยสลายโดยความร้อนด้วยการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ผสม ตรวจสอบการย่อยสลายโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงในดัชนีการไหลดัชนีการเกิดหมู่คาร์บอนิล สมบัติเชิงกล และลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ ผลการศึกษาพบว่า HDPE ผสมแป้งที่มีสารช่วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดการย่อยสลายโดยความร้อนได้

ในขณะที่ HDPE และ HDPE ผสมแป้งจะไม่มีกรย่อยสลายโดยความร้อนเกิดขึ้น ส่วนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยเอนไซม์พบว่า ปริมาณของแป้งที่ผสมในพลาสติกมีผลต่ออัตราการย่อยสลายจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งที่ผสมเพิ่มขึ้น

สมเจตน์ เขียงวานิช [32] ศึกษาการย่อยสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตและย่อยสลายตามธรรมชาติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใส่สารตัวเติมประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิดได้แก่ แป้งมันสำปะหลังและลิกโนเซลลูโลสจากชานอ้อย โดยมีกลีเซอรอลเป็นสารช่วยกระจายตัว ทำการทดลองโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเปรียบเทียบกับ การฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 เดือน ทำการศึกษา สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมที่สลายตัวด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการฝังกลบในดินที่มีความชื้นน้อย ความชื้นมากและเบส ผลการทดลอง พบว่า การย่อยสลายทางแสงของ HDPE เร็วกว่าการย่อยสลายโดยการฝังกลบ แสง UV ทำให้เกิดการสลายตัวของ HDPE เพราะเกิดออกซิเดชัน ส่วนการฝังกลบในดินสภาวะเบสจะทำให้แป้งและลิกโนเซลลูโลสเกิดการย่อยสลายได้ดีเป็นการเพิ่มจุลินทรีย์มากขึ้น

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารที่ใช้ในการทดลอง

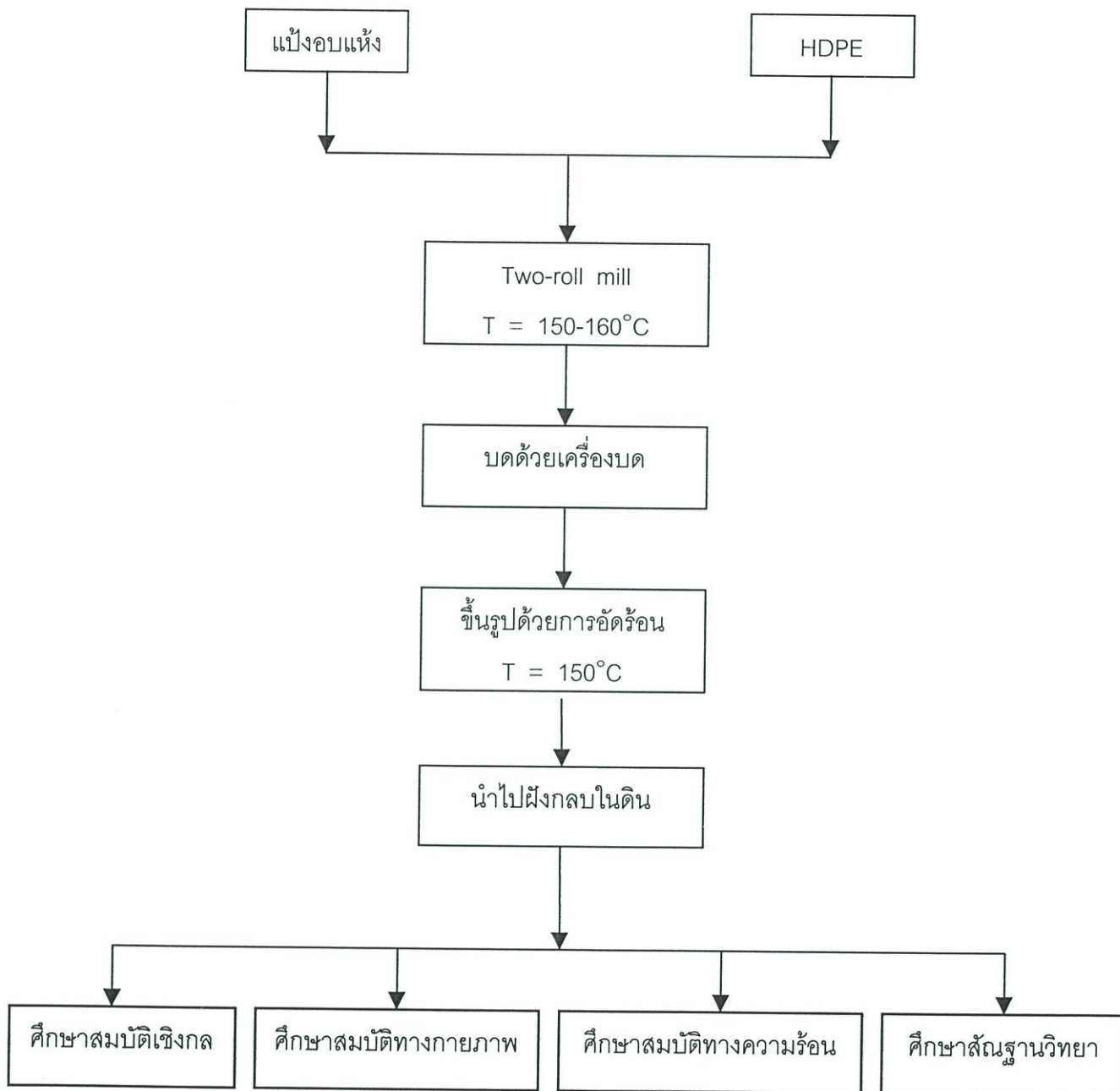
1. ขวดน้ำดื่มขุ่นที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
2. แป้งข้าวเจ้า : ตราดาวแดง ผลิตโดย บ.ไทยเบตเตอร์ฟู้ดส์ จำกัด
3. แป้งสาลี : ตราว่าว ผลิตโดย บ.ยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด
4. แป้งท้าวยายม่อม : ตราสุขเจริญ ผลิตโดย บ.สุขเจริญ จำกัด
5. เฟอรัสซัลเฟต [$\text{Fe}(\text{SO}_4)$]
6. ไดเอทริลีนไตรเอมีนเพนตะอะเซติก (DTPA)
7. ไตรเอทธานอลามีน (TEA)
8. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
9. น้ำยาบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 7 และ pH 4
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
11. ไฮโดรคลอริก (HCl)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 20 : Labtech Engineering Co.,Ltd.
2. เครื่องอัดความร้อน (Compression machine) รุ่น LP 20 : Labtech Engineering Co.,Ltd.
3. เครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น LR 30K : LLOYD Instrument.
4. เครื่อง Differential Scanning Colormeter (DSC) รุ่น Pyris Diamond DSC : Perkin Elmer.
5. เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น Pyris 1 TGA : Perkin Elmer.
6. เครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Radiation, FTIR) รุ่น Spectrum GX : Perkin Elmer.
7. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น SOLAAR M5 dual AA spectrometer : Thermo elemental (TJA solution, Unicam)

8. เครื่องเอกซเรย์ ดิฟเฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) รุ่น D8 Advance : Bruker
AXS GmbH
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
รุ่น 1455VP : LEO
10. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinding machine) : Bosco Engineering
11. เครื่องตัดชิ้นงานไฮดรอลิก : CREST 6052
12. เครื่องเขย่า (mechanical shaker)
13. เครื่องชั่ง
14. ตู้อบ
15. โถวัดความชื้น
16. เครื่องวัด pH
17. ขวดวัดปริมาตร
18. ขวดชมพู
19. ปีกเกอร์
20. ปีเปท
21. กระดาษกรอง เบอร์ 42

3.3 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมวัตถุดิบตั้งต้น

นำขวดน้ำดื่มขุ่นมาล้างให้สะอาด ตัดฉลากที่เป็นสีออก แล้วนำไปปดด้วยเครื่องปด

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมแป้ง

นำแป้งมาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมพอลิเมอร์

นำขวดน้ำดื่มที่ปดแล้วมาผสมกับแป้งในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 150-160°C แล้วนำพลาสติกที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปขึ้นรูปขึ้นงานตัวอย่างเป็นแบบฟิล์มบาง เพื่อใช้วิเคราะห์ FTIR และตัดชิ้นงานเป็นรูป Dumbbell เพื่อใช้ทดสอบความทนแรงดึง

การขึ้นรูปฟิล์มบาง ซึ่งเม็ดพลาสติกหนัก 25 กรัม ใช้แผ่นเหล็กประกบสองด้าน โดยไม่ใช้แม่แบบ ทำการอัดร้อนด้วยเครื่องอัดความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 3 นาที จากนั้นนำไปอัดเย็น 3 นาที นำออกจากแบบและตัดเป็นรูป Dumbbell

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสม (% ต่อน้ำหนัก)

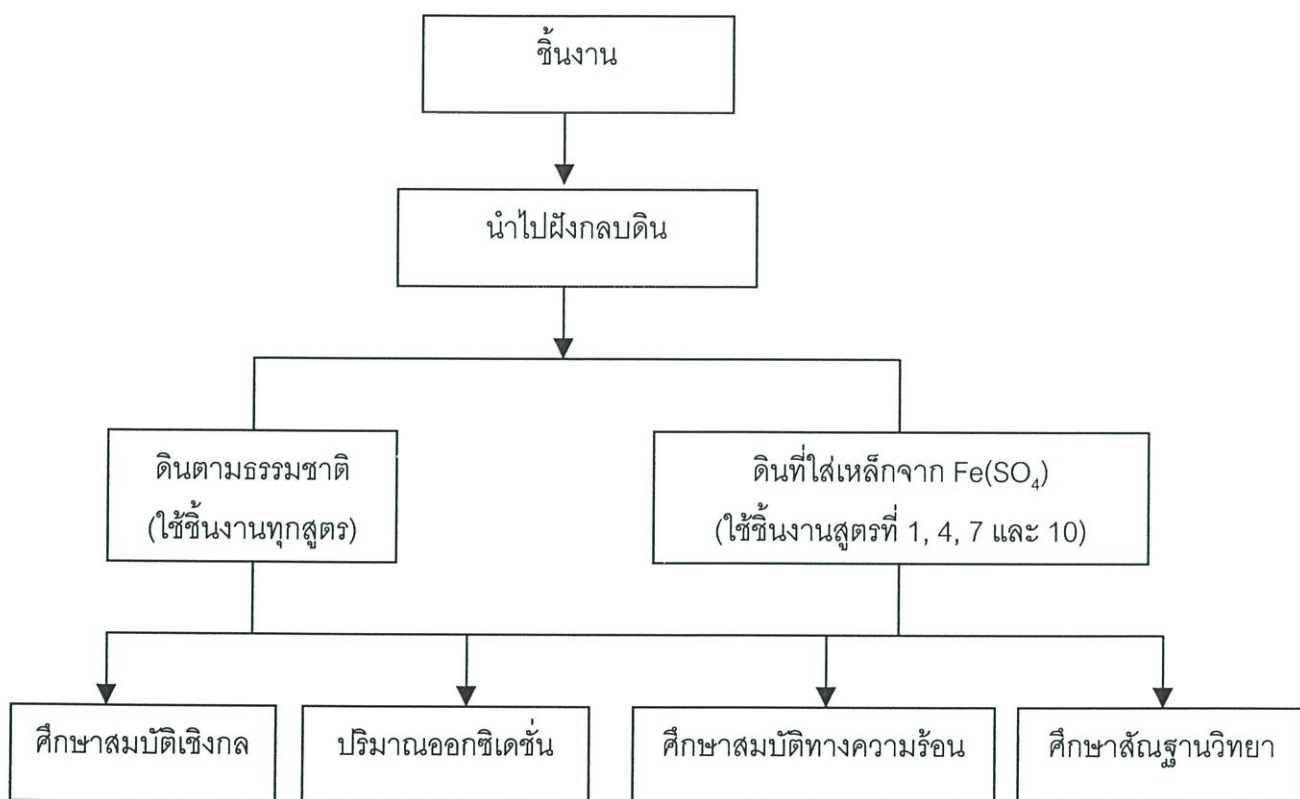
สูตรที่	HDPE (%)	แป้งข้าวเจ้า (%)	แป้งสาลี (%)	แป้งท้าวยายม่อม (%)
1	100	-	-	-
2	90	10	-	-
3	80	20	-	-
4	70	30	-	-
5	90	-	10	-
6	80	-	20	-
7	70	-	30	-
8	90	-	-	10
9	80	-	-	20
10	70	-	-	30

ขั้นตอนที่ 4 การเตรียมดิน

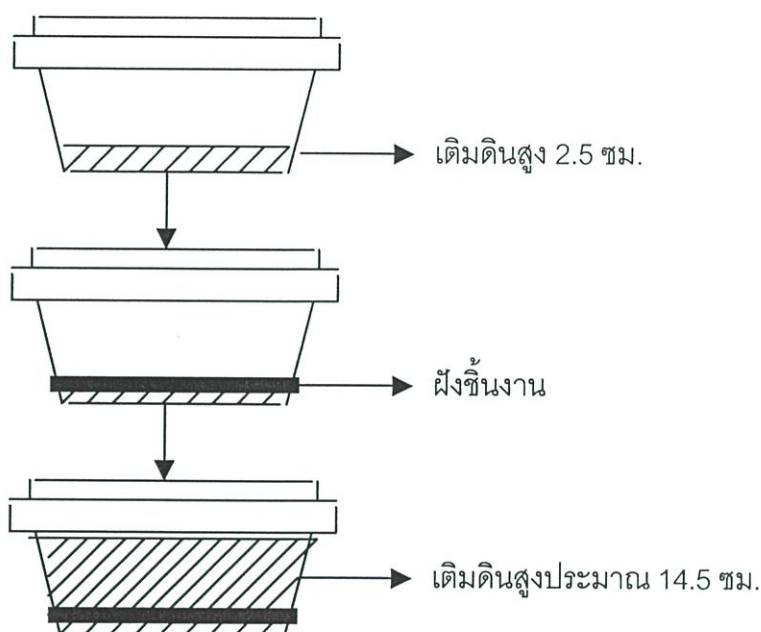
1. ดินที่ขุดได้จากข้าง อาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี
2. ดินที่ขุดได้จากข้อ 1 ปรับปรุงโดยการเติมเหล็ก (Fe^{2+}) จาก $Fe(SO_4)$ ซึ่งมีความเข้มข้น 3 % จำนวน 4 ลิตร คลุกกับดินอย่างทั่วถึง [33]

ขั้นตอนที่ 5 การฝังดิน

นำดินใส่ตะกร้าให้มีความสูง 2.5 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานที่เป็นฟิล์มรูป Dumbbell ใส่ในตะกร้า จากนั้นนำดินในสภาวะที่กำหนดมากลบให้ทั่ว มีความสูงจากชิ้นงานขึ้นไปประมาณ 14.5 เซนติเมตร ทำเช่นเดียวกันทุกสภาวะ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังขั้นตอนการฝังกลบดิน



รูปที่ 3.3 แสดงภาพการฝังกลบชั้นงานในดิน

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยา

นำชั้นงานที่เป็นฟิล์มตัดเป็นรูป Dumbbell เรียบร้อยแล้วทุกสูตรตามตารางที่ 3.1 ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณออกซิเดชัน และสัณฐานวิทยา ก่อนการฝังกลบ ทดสอบการเสียดสภาพในดินของชั้นงานทุกสูตร เมื่อระยะเวลาการฝังกลบผ่านไป 1, 2, 3 และ 4 เดือน เก็บชั้นงานไปล้างด้วยสบู่แล้วอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณออกซิเดชัน และสัณฐานวิทยา สำหรับสูตรผสมที่ 1, 4, 7 และ 10 ซึ่งฝังกลบในดินที่มีการเติม Fe^{2+} จาก $\text{Fe}(\text{SO}_4)$ นำมาตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ในระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 เดือนเช่นเดียวกับที่ฝังในดินธรรมชาติ

3.4 การทดสอบสมบัติพอลิเมอร์

3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล [34]

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) และใช้ชั้นงานทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้น สภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

Load cell	30	kN
Test Speed	50	mm/min
Gauge Length	2.5	cm

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

1. การศึกษาด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ซึ่งด้วยใส่สารตัวอย่าง ใส่ตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม โดยทราบปริมาณแน่นอน นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ใช้อัตราความร้อน 10°C ต่อนาทีและอัตราการให้ความเย็น 10°C ต่อ นาที เพื่อศึกษา อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และพื้นที่ใต้กราฟ คำนวณหา ร้อยละความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) และ Heat of melting (ΔH_m) ต่อน้ำหนักสารตัวอย่าง ดังนี้

$$\Delta H_m = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\text{Degree of crystallinity} = \frac{\Delta H_m * 100}{\Delta H_m (\text{HDPE})}$$

2. การศึกษาด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

โดยใส่ตัวอย่างที่ทราบปริมาณแน่นอน นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ใช้อัตราความร้อน 10°C ต่อ นาที เพื่อวิเคราะห์ความสามารถทนความร้อนของแป้ง และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งชนิดต่างๆ ก่อนทำการฝังกลบในดิน

3.4.3 การหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน

นำตัวอย่างที่ได้จากการฝังกลบที่เป็นแผ่นบางมาทำการตรวจวิเคราะห์โดยเครื่อง FTIR Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของหมู่คาร์บอนิลที่เลขคลื่น $1640-1780 \text{ cm}^{-1}$ และหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขที่คลื่น $3300-3400 \text{ cm}^{-1}$ ทั้งก่อนและหลังการฝังกลบและทำการคำนวณดัชนีคาร์บอนิล (ΔCI) จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{CI} &= [\log (100 / \%T) / d] \\ \text{เมื่อ } \%T &= \% \text{ transmittance} \\ d &= \text{ความหนาชิ้นงาน } (\mu\text{m}) \end{aligned}$$

3.4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

1. ใช้ SEM ดูลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ 1,4,7 และ 10 ก่อนและหลังการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ มาเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิว
2. ดูโครงผลึกของพอลิเมอร์ผสม ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมแป้งโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ มาทำการเปลี่ยนแปลงโครงผลึกฟิล์มพอลิเมอร์
3. การหาน้ำหนักที่หายไป โดยนำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ที่รู้น้ำหนักแน่นอนไปฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือน แล้วนำแผ่นฟิล์มออกมาทุกเดือน ล้างชิ้นงานด้วยสบู่ นำเข้าเครื่องเขย่า เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเขย่าเศษดินที่ติดกับชิ้นงานออก จากนั้นเอาชิ้นงานเข้าเครื่อง Ultrasonic Bath 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อทำการหาน้ำหนักที่หายไป โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนทำการฝัง

3.5 การวิเคราะห์หาค่า pH ของดินด้วย Glass Electrode [35]

- วิธีการวัดโดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ 1 : 1

ซึ่งตัวอย่างดิน 20 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันหลายๆ ครั้ง โดยใช้แท่งแก้วคน แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ในขณะที่วางทิ้งไว้ให้คนดินเป็นครั้งคราว จากนั้นนำสารละลายดินไปวัดหาค่า pH โดยใช้เครื่องวัด pH ก่อนวัด pH ต้องปรับ pH meter ด้วยน้ำยาบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 7 และ pH 4 แล้วจึงดำเนินการวัด pH ของตัวอย่างต่อไป

3.6 การหาปริมาณเหล็กในดิน (Fe^{2+}) [35]

นำตัวอย่างดินที่ผสม $Fe(SO_4)$ และไม่ได้ผสม ก่อนและหลังการฝังกลบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม มาทำการหาปริมาณเหล็ก (Fe^{2+}) โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

- สารเคมี

น้ำยาสกัด Diethylenetriaminepenta-acetic acid (DTPA) : ประกอบด้วย 0.005 M DTPA, 0.01 M calcium chloride ($CaCl_2$), 0.1 M triethanolamine (TEA) มี pH เท่ากับ 7.3 เตรียมได้โดยละลาย DTPA 1.967 กรัม TEA (reagent grade) 14.92 กรัม และ $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 1.47 กรัม ในน้ำกลั่น (deionized water) 1 ลิตร โดยปรับ pH ให้เท่ากับ 7.3 เสียก่อน

- วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดิน จำนวน 10 กรัม ใส่ลงในขวดชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำยาสกัด DTPA จำนวน 20 มิลลิลิตร ปิดขวดชมพู่ให้สนิทด้วยพาราฟิล์ม
3. เขย่าด้วยเครื่องเขย่า (120 รอบ/นาที) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปอ่านค่า Fe ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ตาม wavelength ที่กำหนดสำหรับแต่ละธาตุ โดยอ่านค่ามาตรฐานเปรียบเทียบไปด้วย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

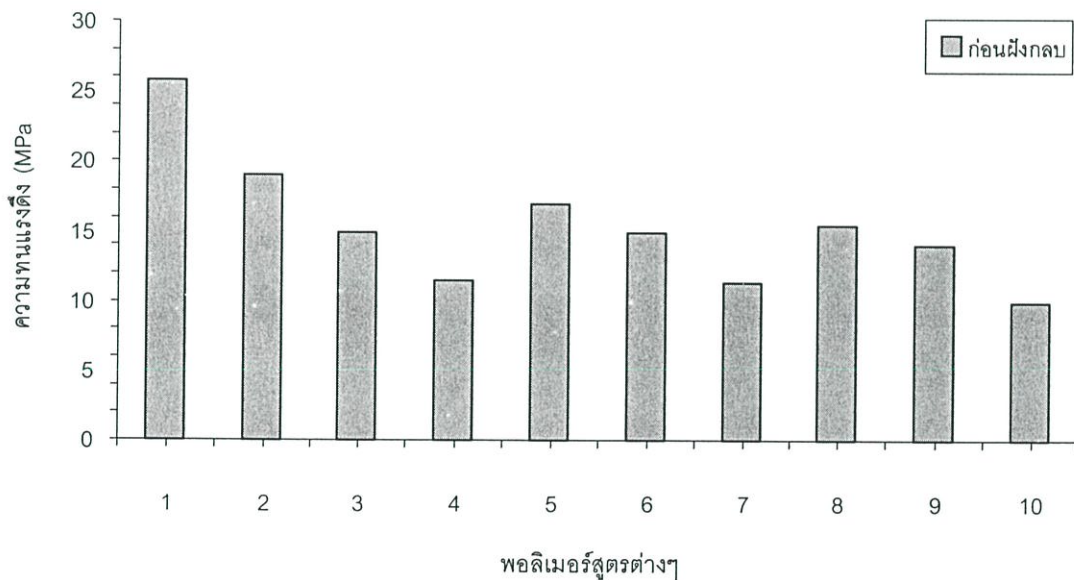
จากการทดลองเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้จาก HDPE ผสมกับแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม โดยสมบัติที่ทดสอบได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณการเกิดออกซิเดชัน สมบัติทางสัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน พร้อมทั้งปริมาณเหล็กในดิน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

4.1.1 การศึกษาค่าความทนแรงดึง

ก่อนการฝังกลบ

นำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการฝังกลบมาทดสอบหา สมบัติความทนแรงดึง ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ

(1) HDPE

(2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10%

(3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20%

(4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%

(5) HDPE + แป้งสาลี 10%

(6) HDPE + แป้งสาลี 20%

(7) HDPE + แป้งสาลี 30%

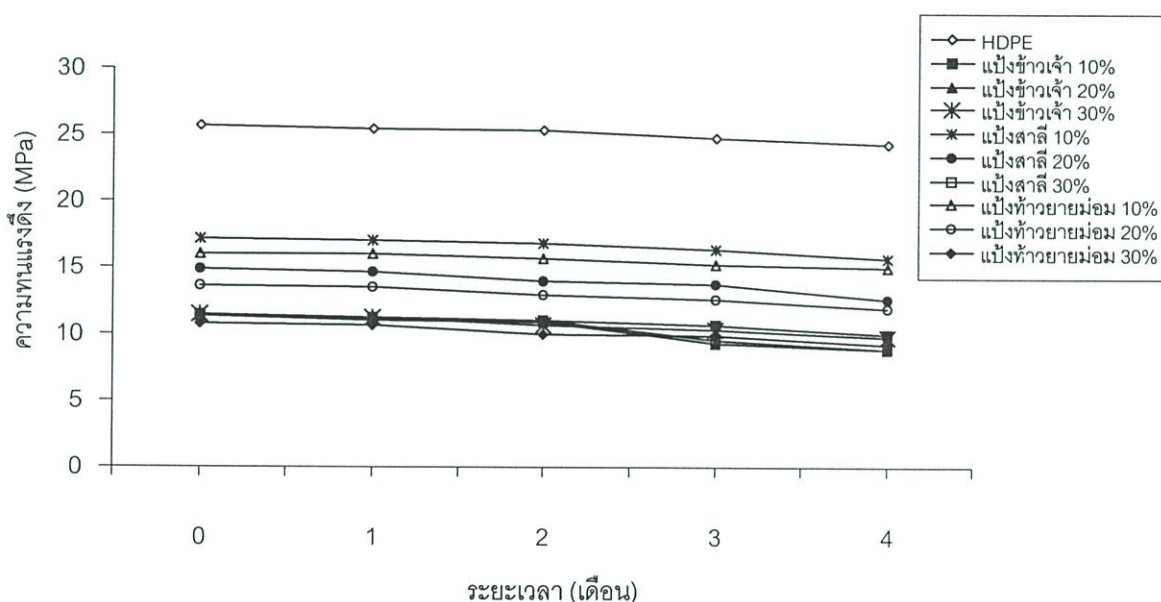
(8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10%

(9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20%

(10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%

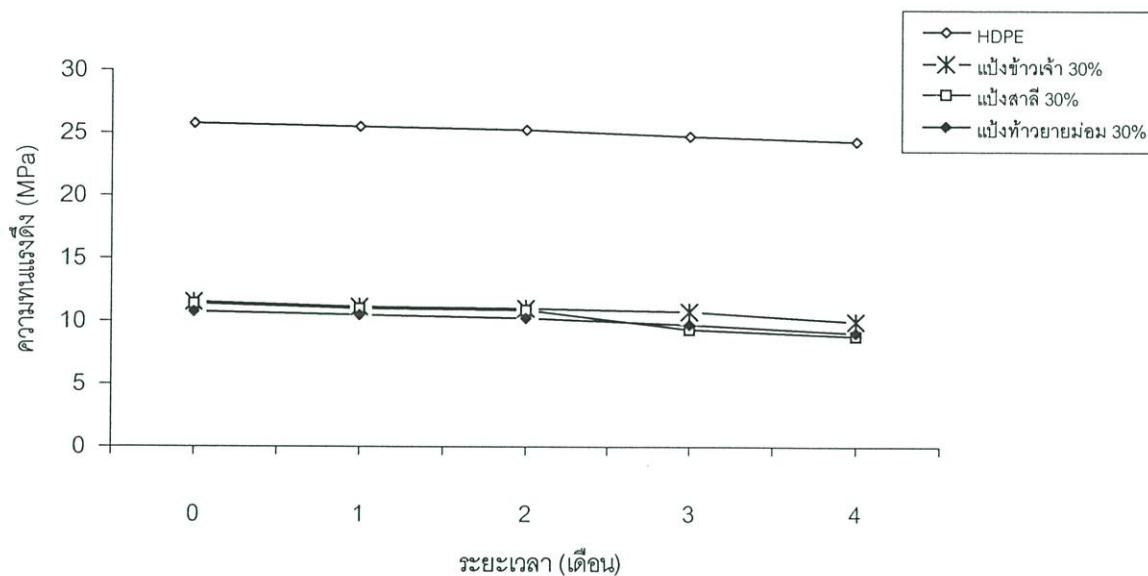
จากกราฟแสดงค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ พบว่า HDPE ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ มีค่าความทนแรงดึงลดลงในทุกสูตร เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแป้งในชนิดเดียวกันที่ผสมกับ HDPE พบว่า เมื่อแป้งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ค่าความทนแรงดึง มีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งแต่ละชนิด พบว่า HDPE ที่มีการเติมแป้งทำวยายม่อม มีค่าความทนแรงดึงน้อยกว่า HDPE ที่มีการเติมแป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องจากโมเลกุลของแป้งที่มีขนาดใหญ่ไปขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เมื่อออกแรงดึงจึงขาดได้เร็วกว่า

หลังการฝังกลบ



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ

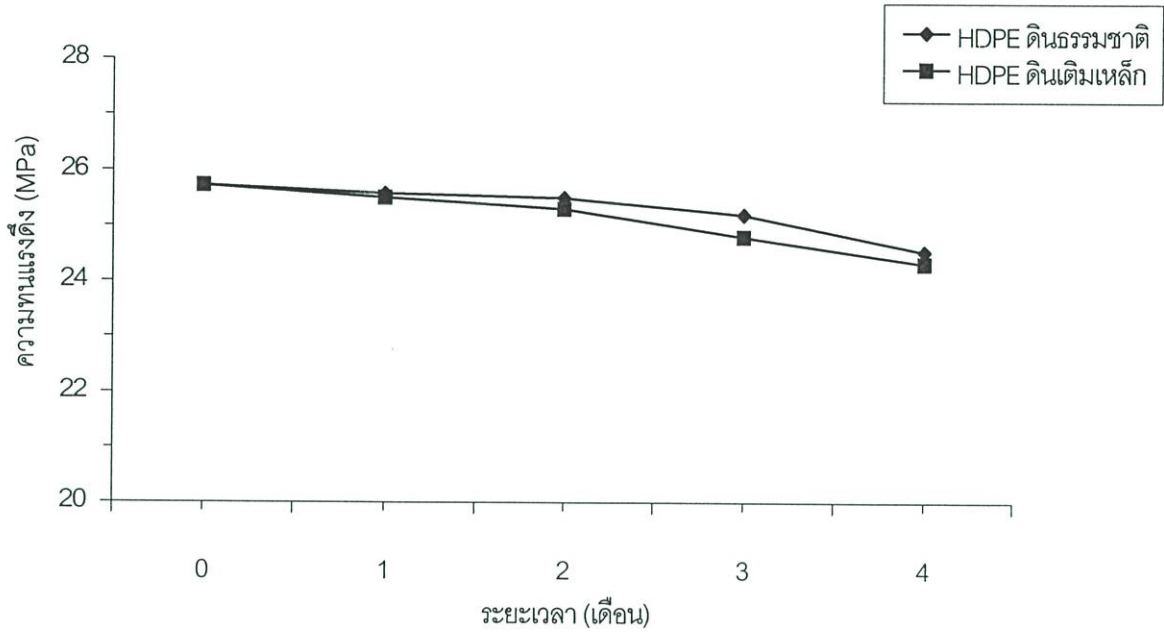
จากกราฟ แสดงค่าความทนแรงดึงของตัวอย่าง HDPE สูตรต่างๆ เมื่อฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า ทั้ง HDPE และตัวอย่าง HDPE ที่ผสมแป้งชนิดต่างๆ มีค่าความทนแรงดึงลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาการฝังกลบนานขึ้น



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เดิมเหล็ก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงระหว่าง HDPE กับตัวอย่างที่ผสมแป้งข้าวเจ้า แป้งสาาลี และแป้งท้าวยายม่อม 30% เมื่อฝังกลบในดินที่เดิมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือน ให้ผลดังแสดงในกราฟ พบว่า ที่ปริมาณแป้ง 30% แป้งทุกชนิดให้ผลต่อค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกัน และแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับในดินธรรมชาติ

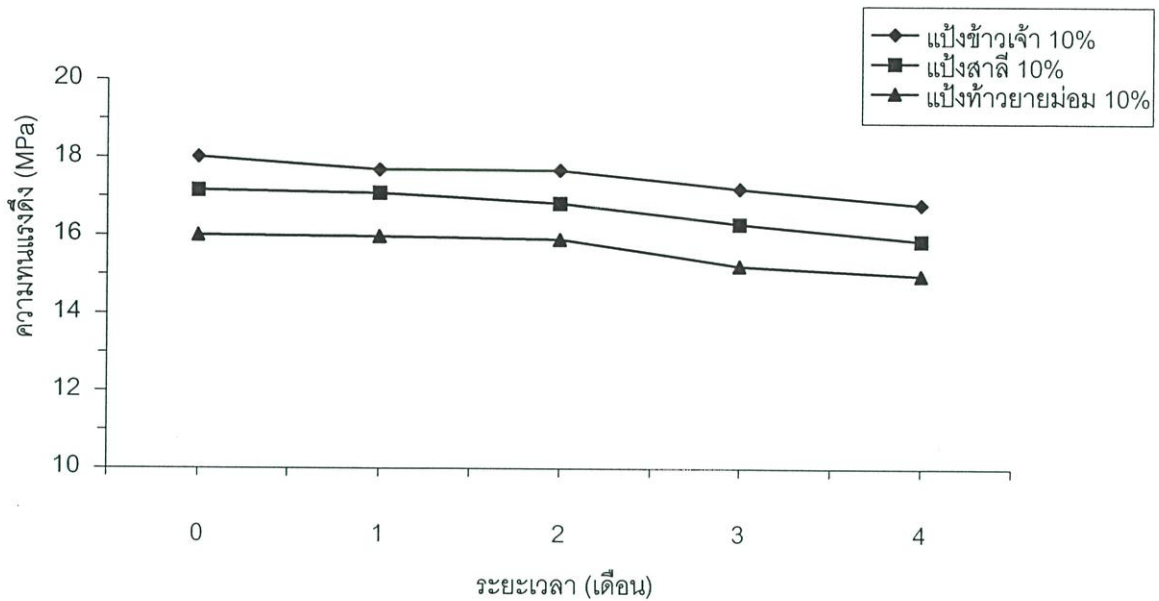
เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ HDPE หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติและดินที่เติมเหล็ก



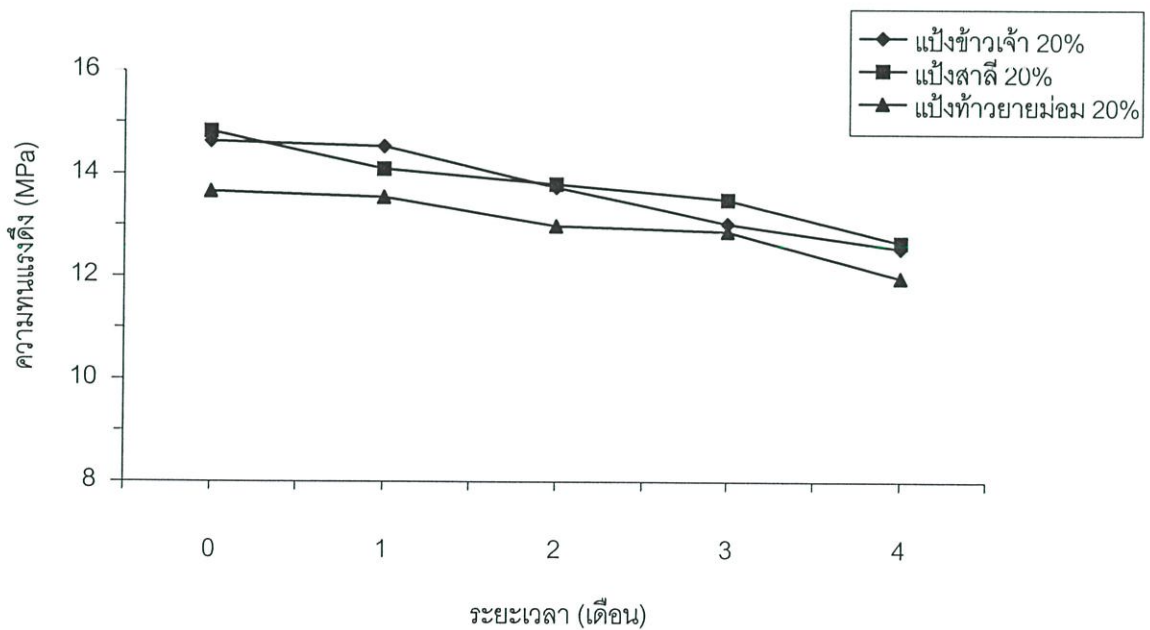
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความทนแรงดึงของ HDPE ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ

จากกราฟ แสดงค่าความทนแรงดึงของ HDPE ที่ไม่มีการเติมแบงลงไปที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า HDPE มีความทนแรงดึงลดลง โดยเฉพาะในดินที่มีการเติมเหล็ก HDPE มีความทนแรงดึงลดลงมากกว่าในดินธรรมชาติเล็กน้อย และจะเห็นชัดเจน เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มมากขึ้น

เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งชนิดต่างๆ ในปริมาณ 10% และ 20% หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ

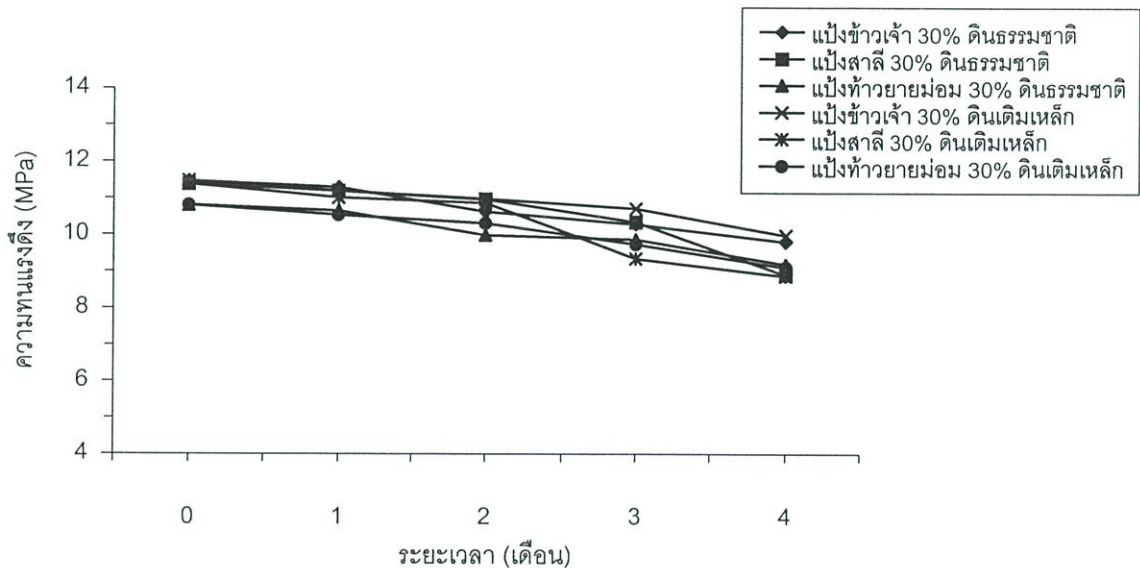


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีเติมแป้งชนิดต่างๆ 10% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ 20% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ

เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งชนิดต่างๆ ในปริมาณ 30% หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ และดินที่เติมเหล็ก



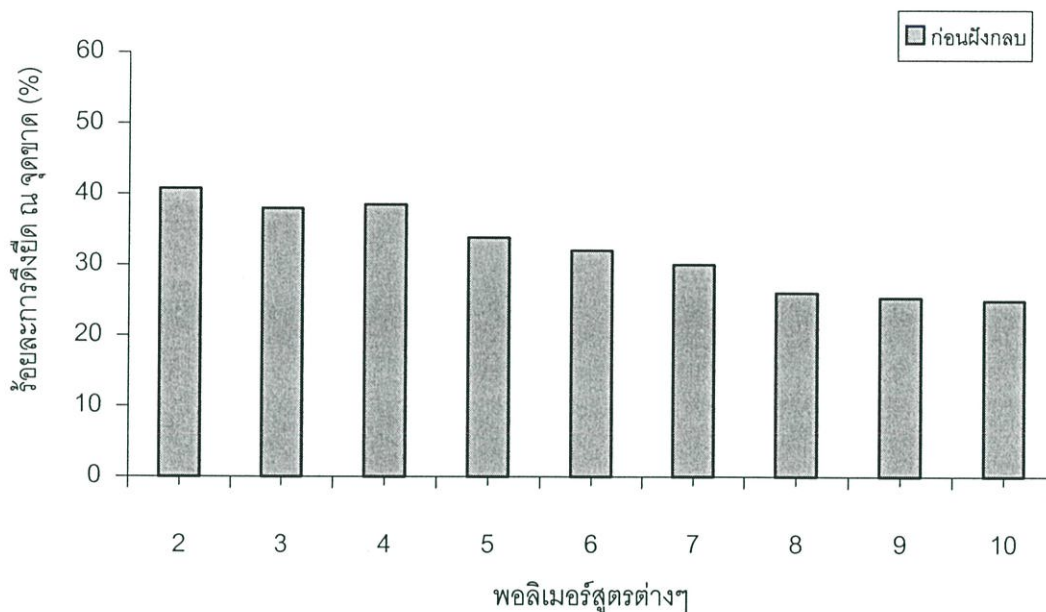
รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ 30% ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 – 4.7 แสดงค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งทุกสูตร ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่าความทนแรงดึงลดลง เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในดินที่มีการเติมเหล็ก พอลิเมอร์จะมีความทนแรงดึงลดลงมากกว่าในดินธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดเดียวกัน พบว่า พอลิเมอร์มีค่าความทนแรงดึงลดลง เมื่อแป้งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชนิดของแป้งจะมีผลต่อความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ด้วยเช่นกัน กล่าวคือ แป้งสาลี 30% จะมีความทนแรงดึงลดลงมากกว่าแป้งข้าวเจ้า 30% และแป้งท้าวยายม่อม 30% ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อฝังกลบได้ 3 และ 4 เดือน

4.1.2 การศึกษาค่าร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาด

ก่อนการฝังกลบ

นำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการฝังกลบมาทดลองหา สมบัติร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาด ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

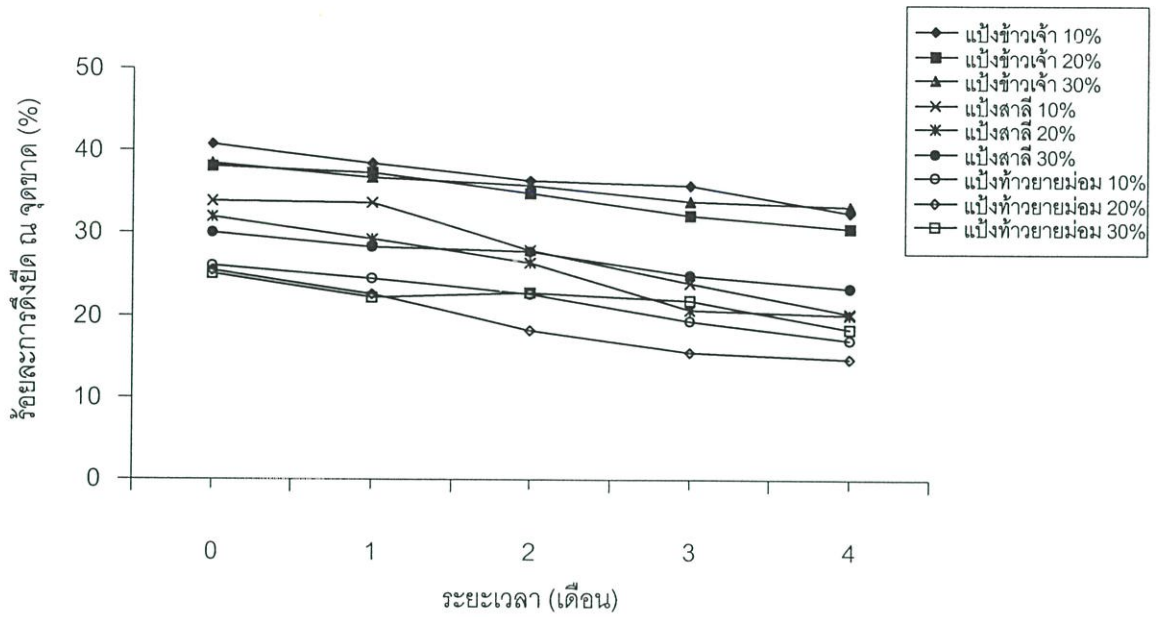


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ

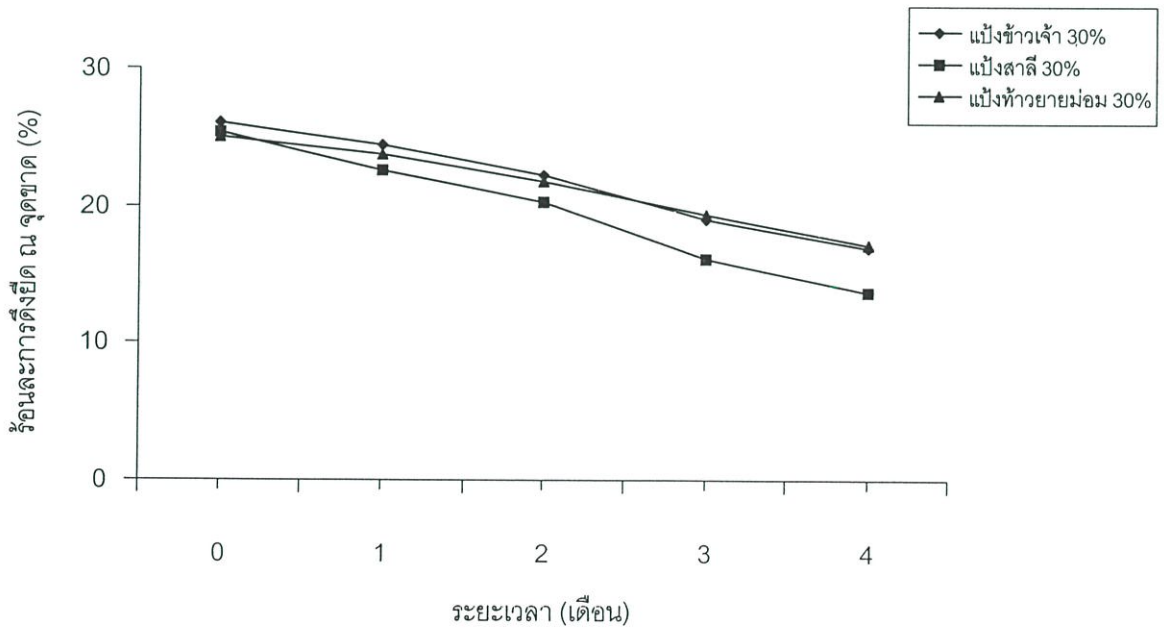
- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| (2) HDPE + แฉ่งข้าวเจ้า 10% | (7) HDPE + แฉ่งสาลี 30% |
| (3) HDPE + แฉ่งข้าวเจ้า 20% | (8) HDPE + แฉ่งท้าวยายม่อม 10% |
| (4) HDPE + แฉ่งข้าวเจ้า 30% | (9) HDPE + แฉ่งท้าวยายม่อม 20% |
| (5) HDPE + แฉ่งสาลี 10% | (10) HDPE + แฉ่งท้าวยายม่อม 30% |
| (6) HDPE + แฉ่งสาลี 20% | |

จากกราฟแสดงค่าร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ พบว่า HDPE ที่มีการเติมแฉ่งชนิดต่างๆ มีค่าร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดลดลงกว่า HDPE ที่ไม่มีการเติมแฉ่ง เมื่อพิจารณา HDPE ที่มีการเติมแฉ่ง พบว่า เมื่อแฉ่งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ค่าร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาด มีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแฉ่ง 3 ชนิด พบว่า HDPE ที่มีการเติมแฉ่งท้าวยายม่อม มีค่าร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาดลดลงมากกว่า HDPE ที่มีการเติมแฉ่งสาลีและ แฉ่งข้าวเจ้า ตามลำดับ

หลังการฝังกลบ

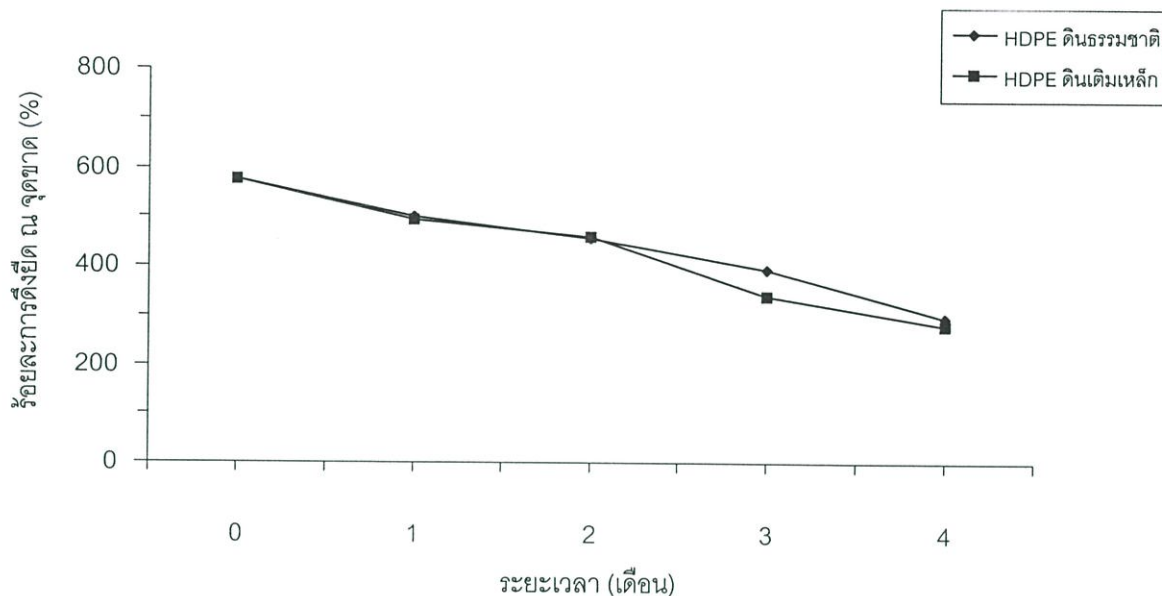


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอริ์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอริ์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

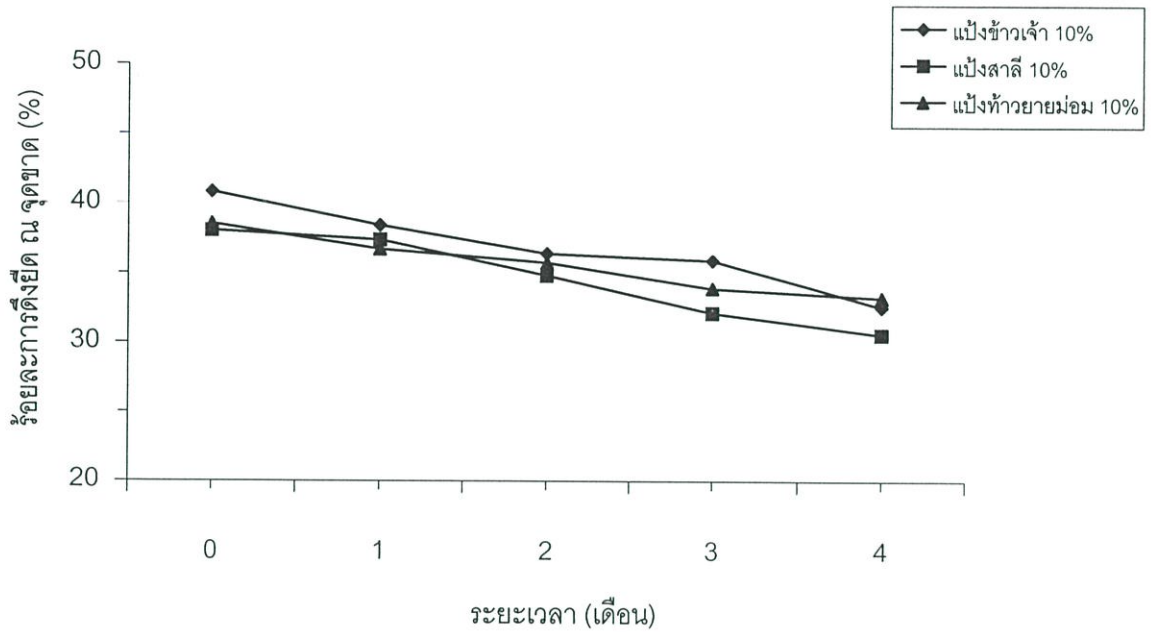
เปรียบเทียบค่าร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ HDPE หลังการฝังกลบ
ในดินธรรมชาติและดินที่เติมเหล็ก



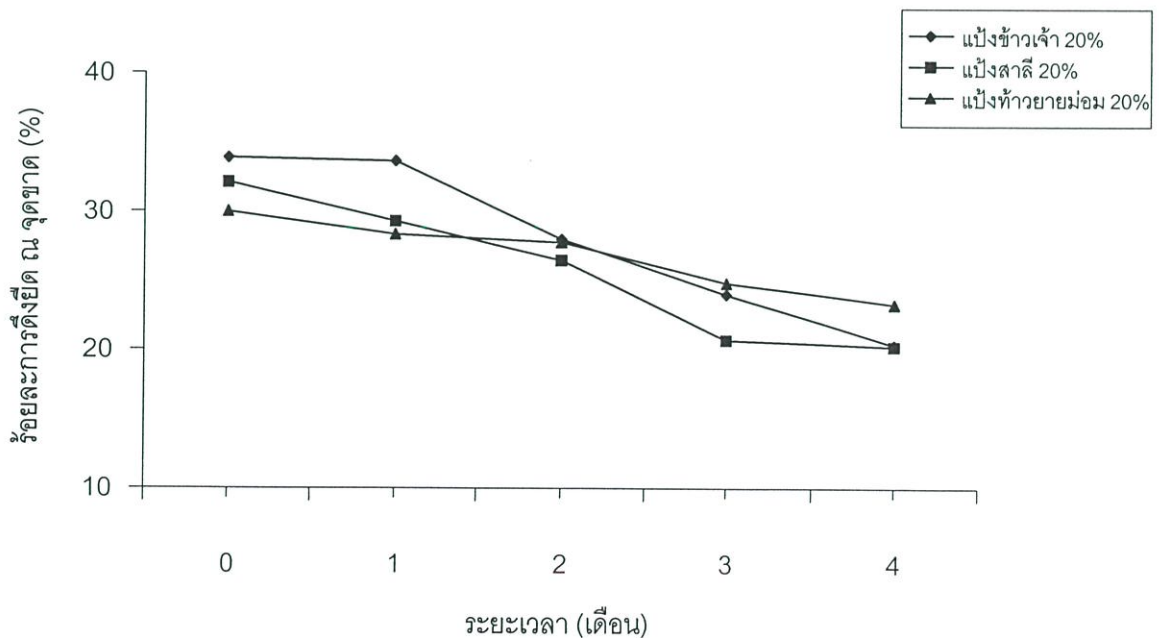
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดของ HDPE ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ

จากกราฟแสดงค่าร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ HDPE ที่ไม่มีการเติมแบ็งลงไป
ไปที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า HDPE มีค่าร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดลดลง โดยเฉพาะใน
ดินที่มีการเติมเหล็ก HDPE จะมีค่าร้อยละการดั่งยึด ณ จุดขาดลดลงมากกว่าในดินธรรมชาติเล็กน้อย
และจะเห็นชัดเจน เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มมากขึ้น

เปรียบเทียบค่าร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งชนิดต่างๆ
ในปริมาณ 10% และ 20 % หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ

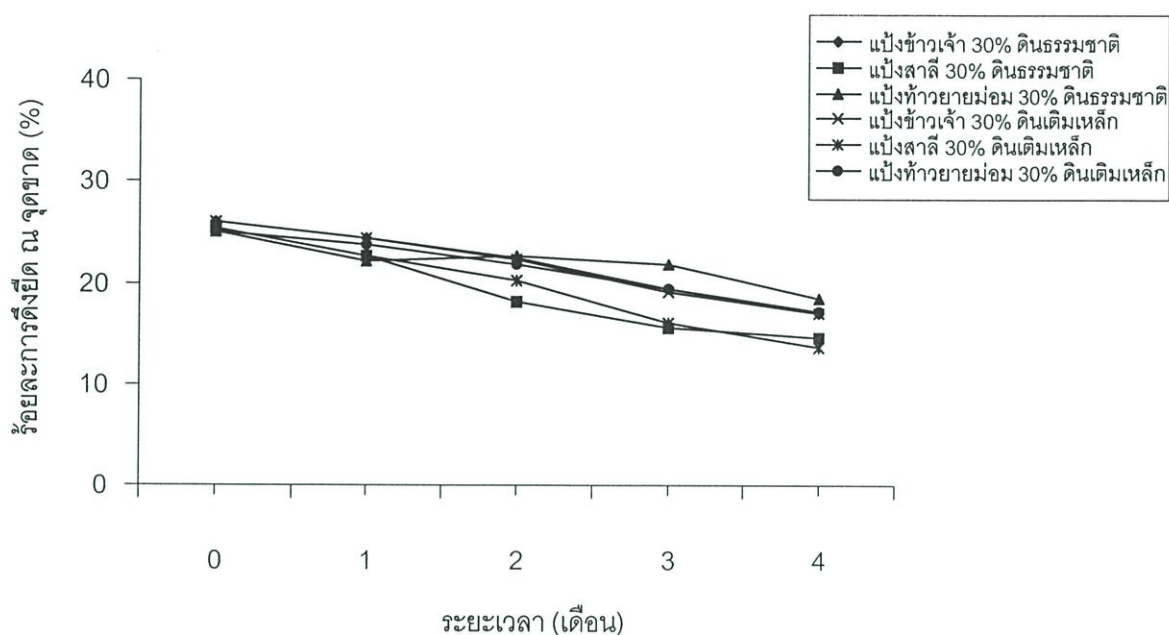


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 10%
ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 20%
ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ

เปรียบเทียบค่าร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่ผสมแบ่งชนิดต่างๆ ในปริมาณ 30% หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ และดินที่เติมเหล็ก



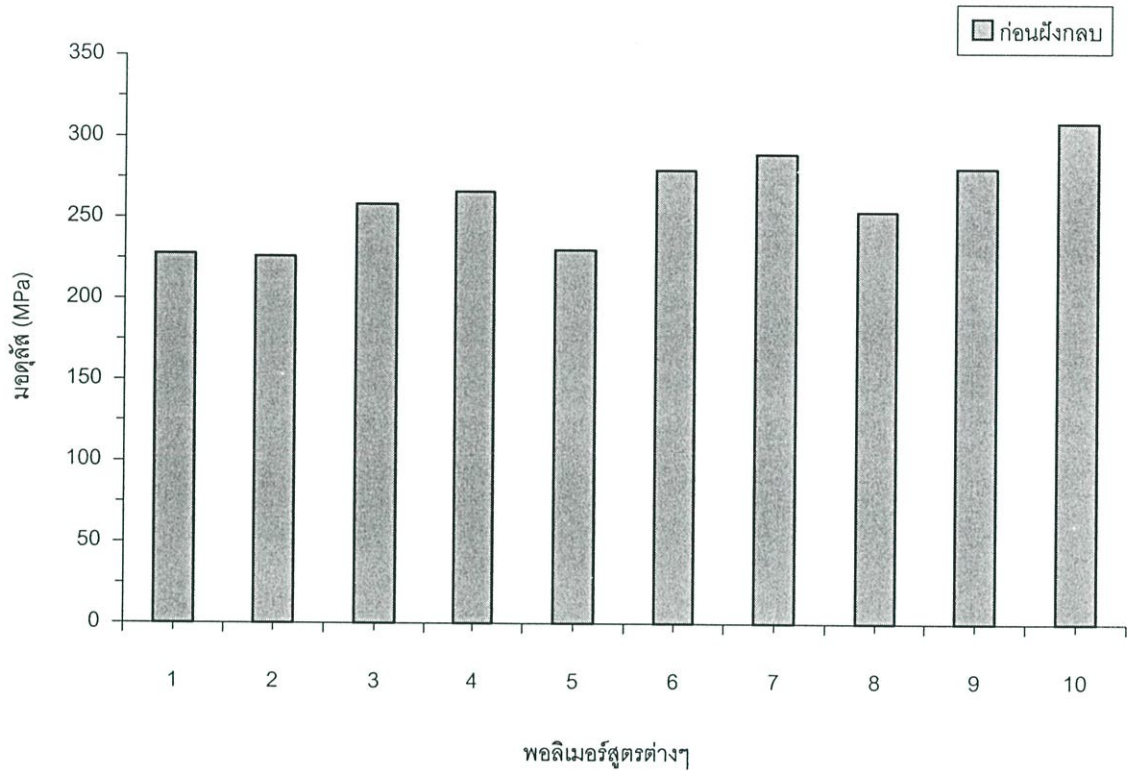
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่เติมแบ่งชนิดต่างๆ 30% ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 – 4.14 แสดงค่าร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแบ่ง ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่าร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมที่ฝังในดินที่มีการเติมเหล็กจะมีค่าร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดลดลงมากกว่า พอลิเมอร์ผสมที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแบ่งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ พบว่า พอลิเมอร์จะมีค่าร้อยละการตั้งยี่ด ณ จุดขาดลดลง เมื่อมีปริมาณของแบ่งเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาชนิดของแบ่ง พบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแบ่งสาลีจะมีค่าร้อยละการตั้งยี่ดลดลงมากกว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแบ่งข้าวเจ้าและแบ่งท้าวยายม่อม ตามลำดับ

4.1.3 การศึกษาค่ามอดุลัส

ก่อนการฝังกลบ

นำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการฝังกลบมาทดลองหา สมบัติมอดุลัส ได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

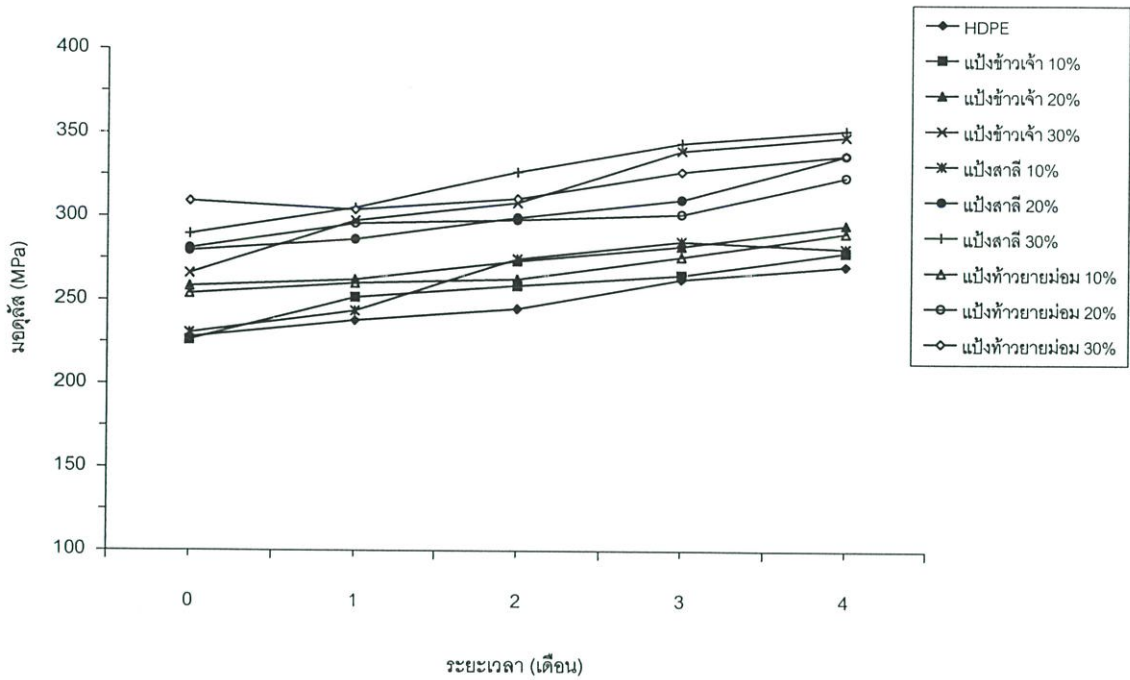


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ

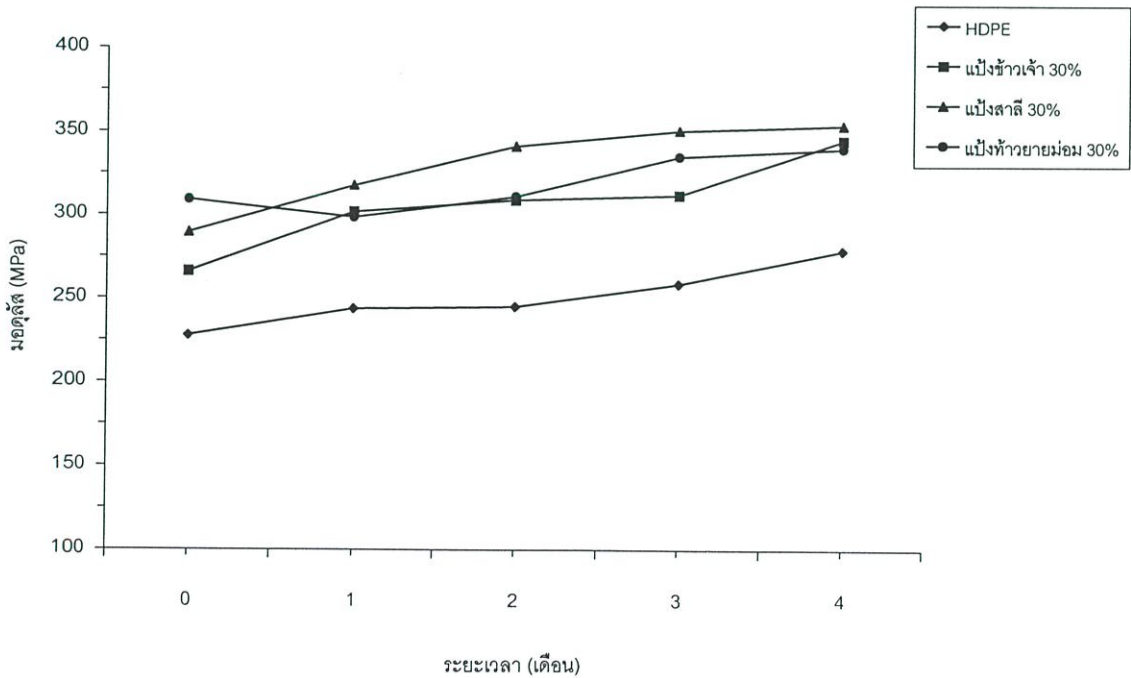
- | | |
|----------------------------|---------------------------------|
| (1) HDPE | (6) HDPE + แปะงาสลึ 20% |
| (2) HDPE + แปะงข้าวเจ้ 10% | (7) HDPE + แปะงาสลึ 30% |
| (3) HDPE + แปะงข้าวเจ้ 20% | (8) HDPE + แปะงท้าวยายม้อม 10% |
| (4) HDPE + แปะงข้าวเจ้ 30% | (9) HDPE + แปะงท้าวยายม้อม 20% |
| (5) HDPE + แปะงาสลึ 10% | (10) HDPE + แปะงท้าวยายม้อม 30% |

จากกราฟแสดงค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ พบว่า HDPE ที่มีการเติมแปะงชนิดต่างๆ มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่า HDPE ที่ไม่มีการเติมแปะง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแปะงในชนิดเดียวกันที่ผสมกับ HDPE พบว่า เมื่อแปะงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแปะงแต่ละชนิด พบว่า HDPE ที่มีการเติมแปะงท้าวยายม้อม มีค่ามอดุลัสมากกว่า HDPE ที่มีการเติมแปะงาสลึและแปะงข้าวเจ้ ตามลำดับ

หลังการฝังกลบ

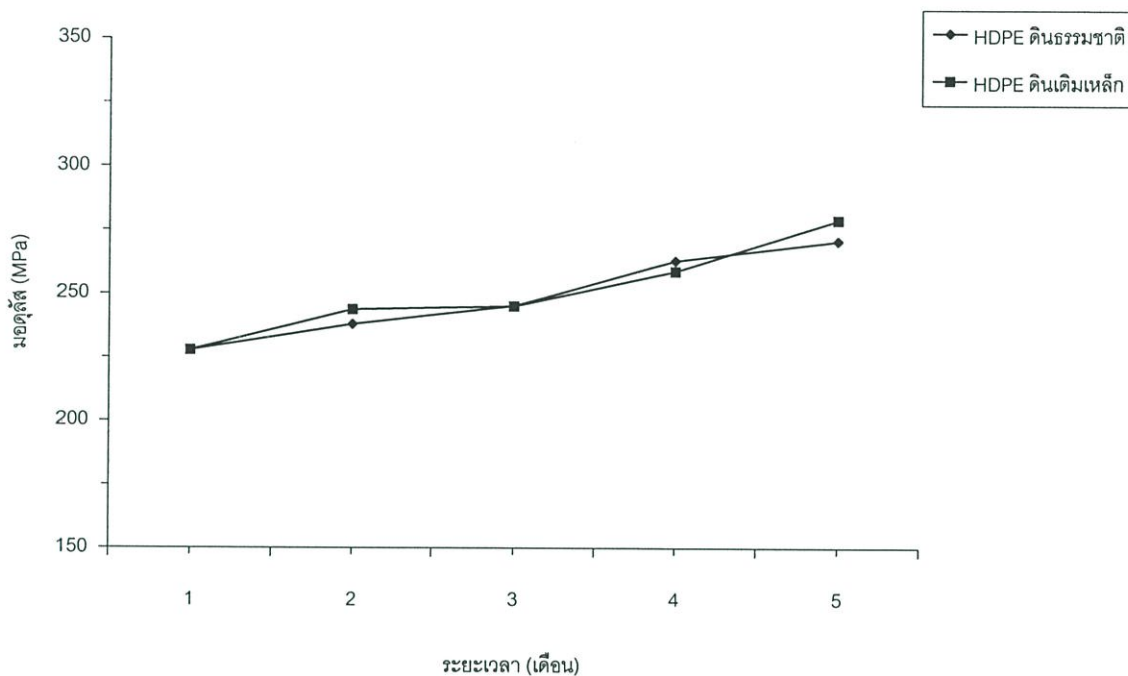


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

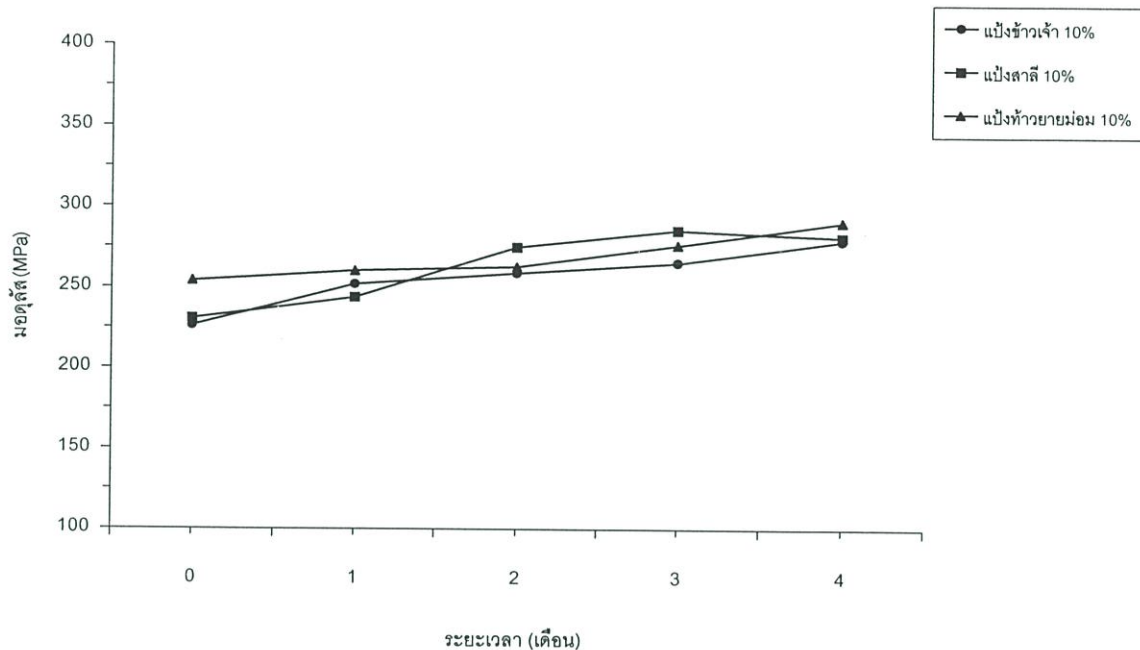
เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ HDPE หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติและดินที่เติมเหล็ก



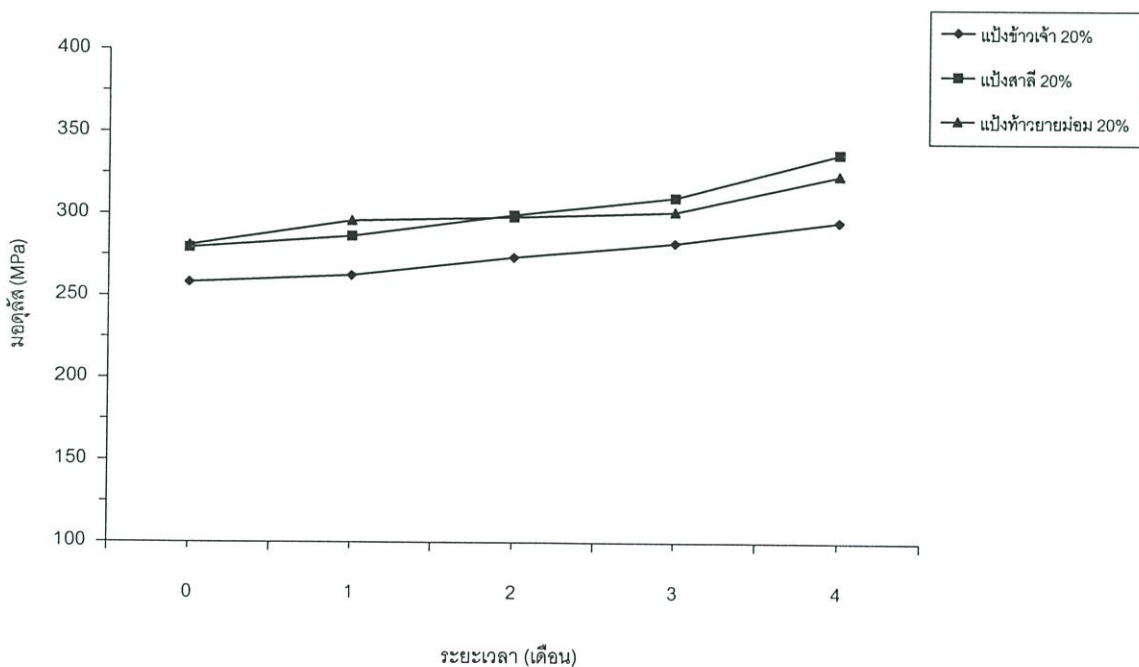
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟมอดุลัสของ HDPE ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ

จากกราฟแสดงค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ HDPE ที่ไม่มีการเติมแป้งลงไปฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า HDPE มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในดินที่มีการเติมเหล็ก HDPE จะมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าในดินธรรมชาติเล็กน้อย และจะเห็นชัดเจน เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มมากขึ้น

เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งชนิดต่างๆ ในปริมาณ 10% และ 20 % หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ

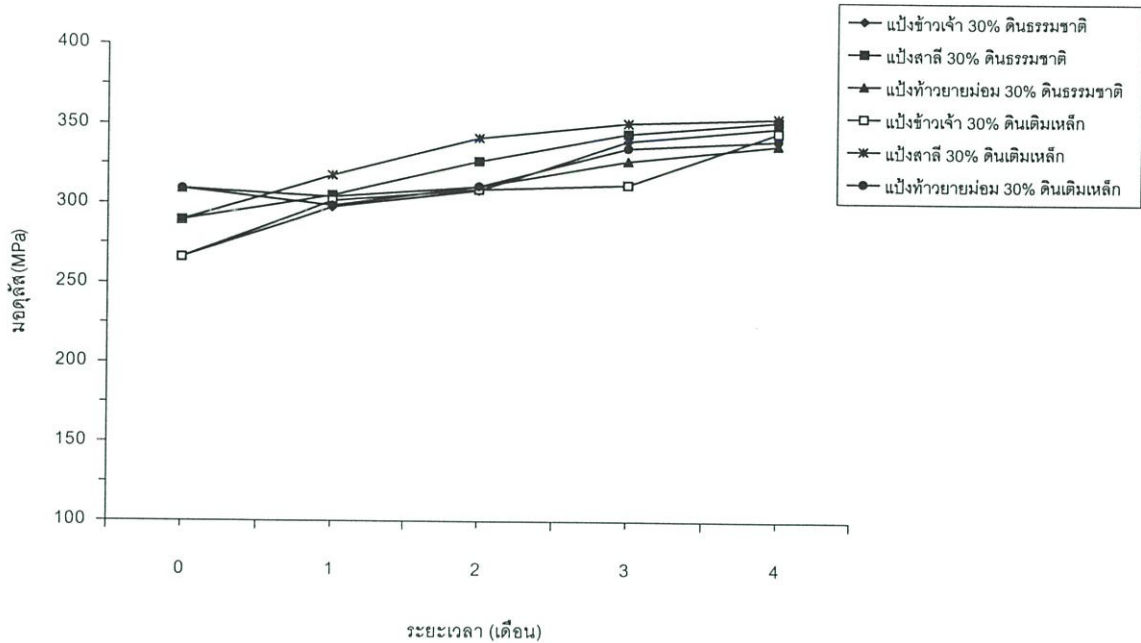


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟมอดุลัสของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 10% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟมอดุลัสของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 20% ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ

เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งชนิดต่างๆ ในปริมาณ 30% หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ และดินที่เติมเหล็ก



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟมอดุลัสของพอลิเมอร์ที่เติมแป้งชนิดต่างๆ 30% ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ

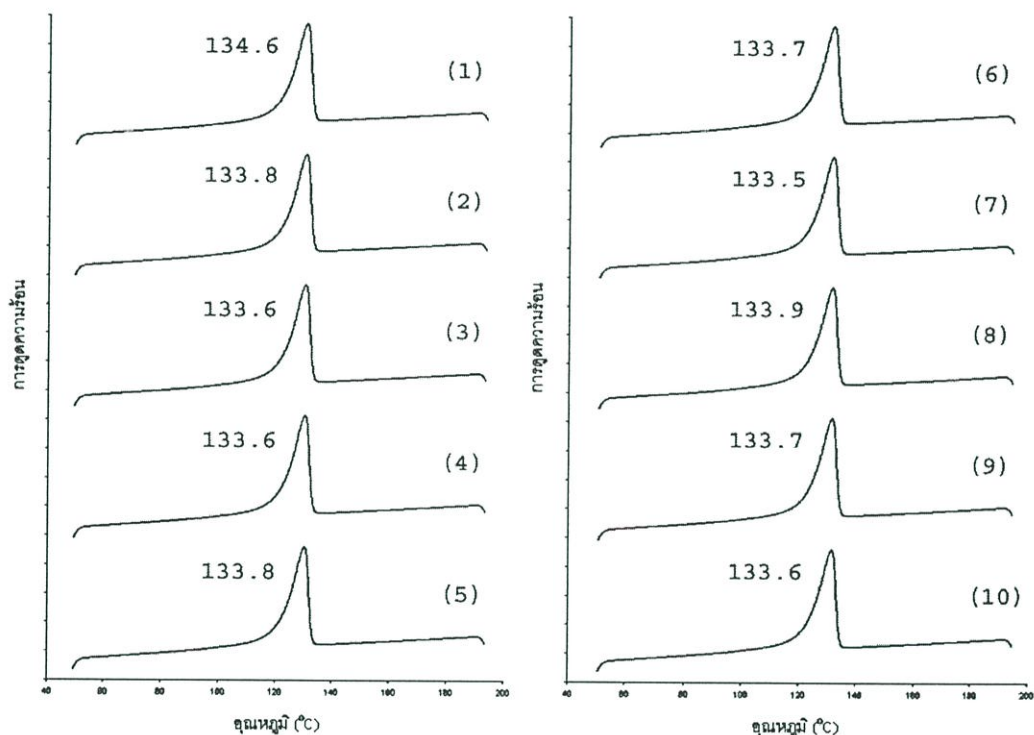
จากรูปที่ 4.19 – 4.21 แสดงค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแป้ง ที่ฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสมที่ฝังในดินที่มีการเติมเหล็กจะมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแป้งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ พบว่า พอลิเมอร์จะมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เมื่อแป้งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาชนิดของแป้ง พบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลีจะมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการตัดขาดส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น

4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

4.2.1 การศึกษาด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

1 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝังกลบ

ทดลองสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ทุกสูตรที่เตรียมได้ก่อนนำไปฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.22 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ก่อนการฝังกลบที่ได้จาก DSC

(1) HDPE

(2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10%

(3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20%

(4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%

(5) HDPE + แป้งสาลี 10%

(6) HDPE + แป้งสาลี 20%

(7) HDPE + แป้งสาลี 30%

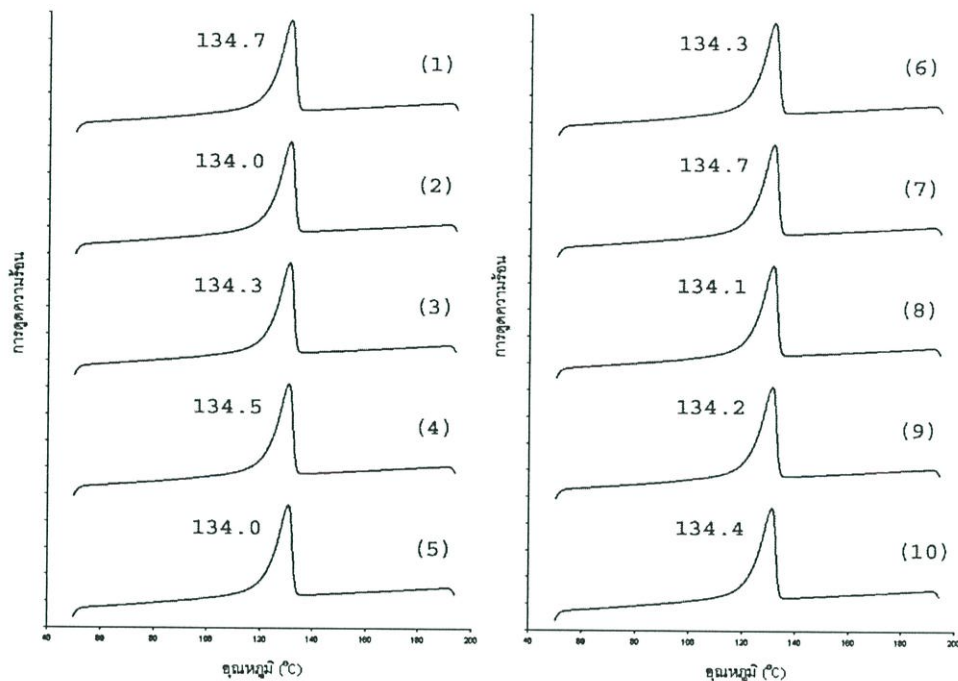
(8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10%

(9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20%

(10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%

หลังการฝังกลบ

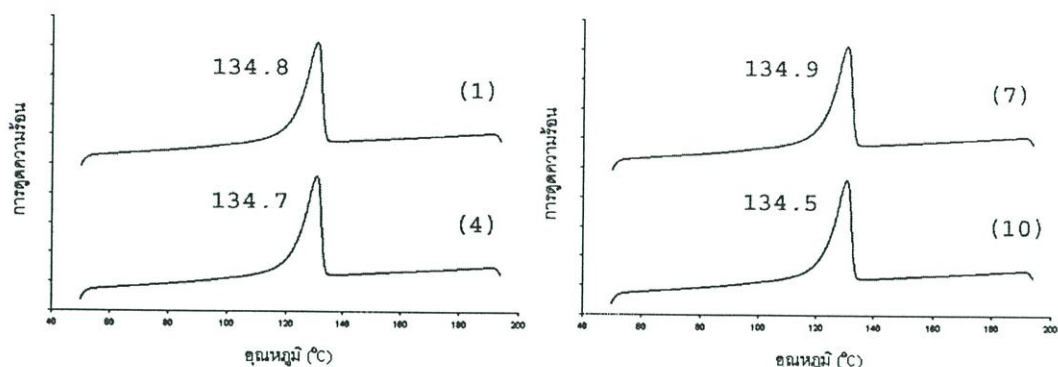
ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ เป็นเวลา 4 เดือนได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.23 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นเวลา 4 เดือนที่ได้จาก DSC

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| (1) HDPE | (6) HDPE + แป้งสาลี 20% |
| (2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10% | (7) HDPE + แป้งสาลี 30% |
| (3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20% | (8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10% |
| (4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30% | (9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20% |
| (5) HDPE + แป้งสาลี 10% | (10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30% |

ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กเป็นเวลา 4 เดือนได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.24 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กเป็นเวลา 4 เดือน ที่ได้จาก DSC

(1) HDPE

(7) HDPE + แบริ่งสาาลี 30%

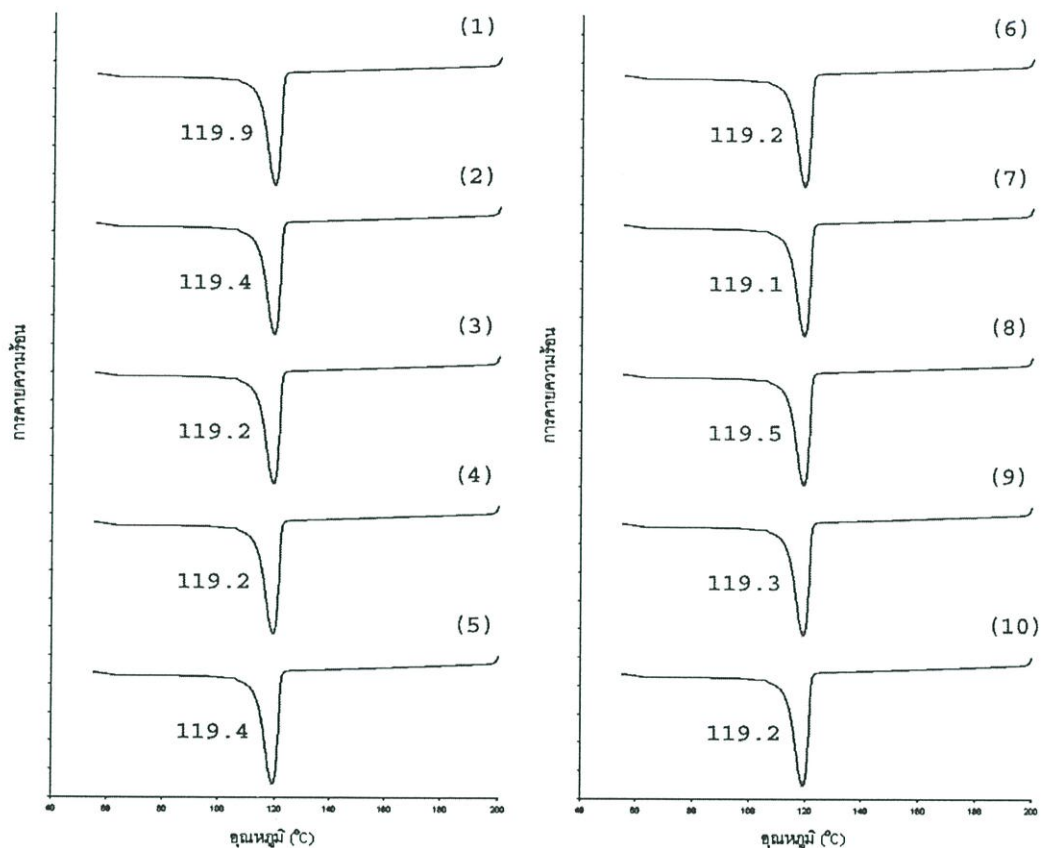
(4) HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%

(10) HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 30%

จากรูปที่ 4.22 – 4.24 แสดงสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า พอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรทั้งก่อนและหลังการฝังกลบมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกน้อยมากและอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างตัวอย่างก็ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติกับดินที่มีการเติมเหล็ก พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณและชนิดของแบริ่ง พบว่า ปริมาณและชนิดของแบริ่ง ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึกทั้งก่อนและหลังการฝังกลบ ดังจะเห็นได้จากกราฟอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกแต่ละเส้นไม่แตกต่างกัน

2 อุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการฝั่งกลบ

ทดลองสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ทุกสูตรที่เตรียมได้ก่อนนำไปฝั่งกลบในสภาวะดินต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

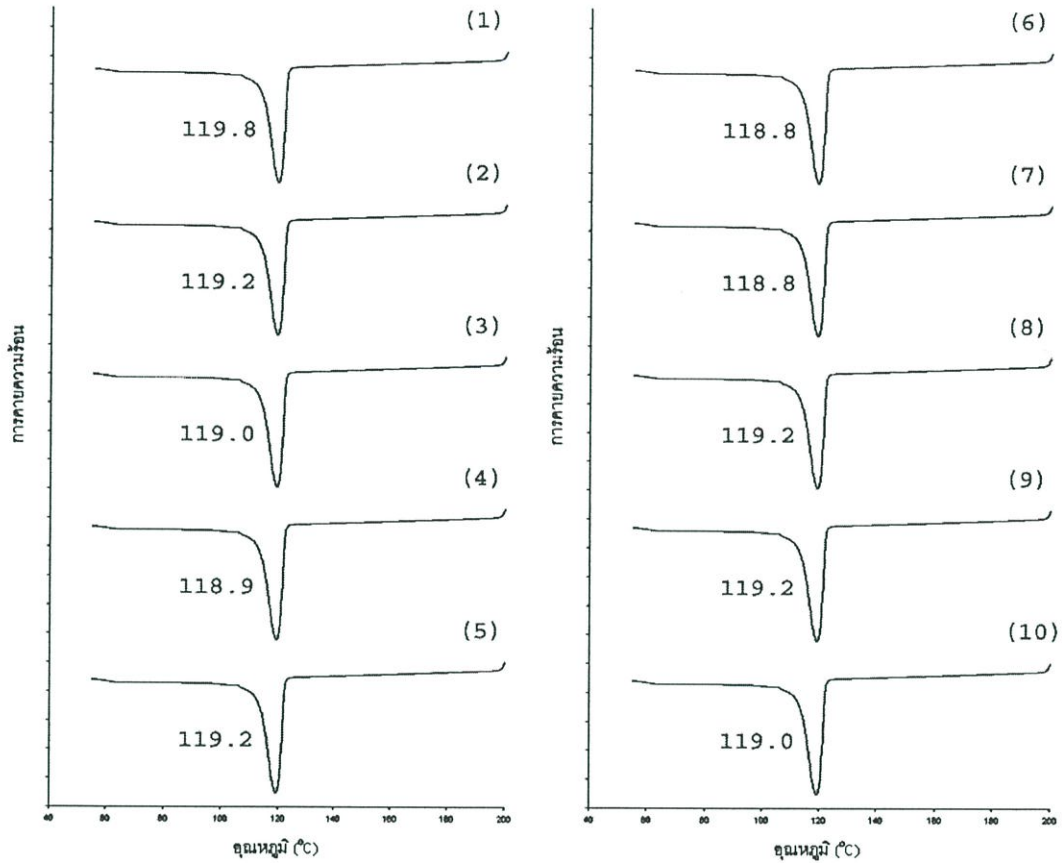


รูปที่ 4.25 แสดงอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนการทดลอง ที่ได้จาก DSC

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| (1) HDPE | (6) HDPE + แป้งสาลี 20% |
| (2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10% | (7) HDPE + แป้งสาลี 30% |
| (3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20% | (8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10% |
| (4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30% | (9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20% |
| (5) HDPE + แป้งสาลี 10% | (10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30% |

หลังการฝังกลบ

ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ เป็นเวลา 4 เดือนได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นเวลา 4 เดือนที่ได้จาก DSC

(1) HDPE

(2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10%

(3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20%

(4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%

(5) HDPE + แป้งสาลี 10%

(6) HDPE + แป้งสาลี 20%

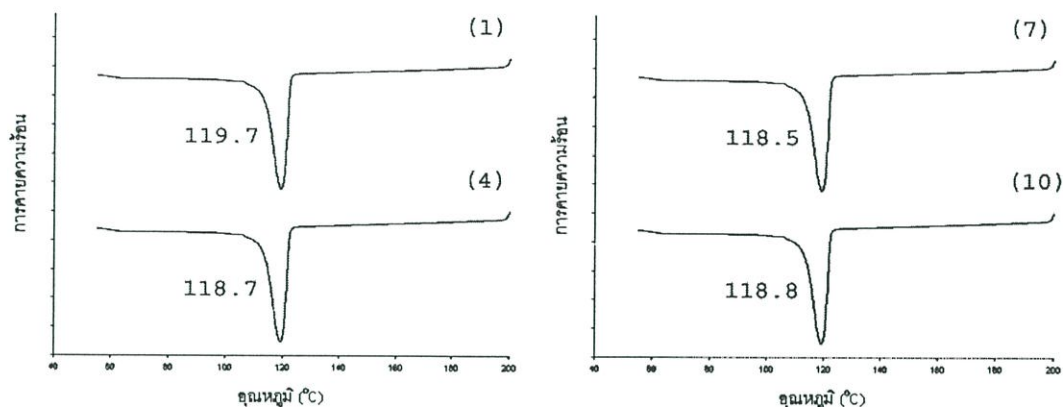
(7) HDPE + แป้งสาลี 30%

(8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10%

(9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20%

(10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%

ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กเป็นเวลา 4 เดือนได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.27 แสดงอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังการฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กเป็นเวลา 4 เดือน ที่ได้จาก DSC

(1) HDPE

(7) HDPE + แป้งสาลี 30%

(4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%

(10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%

จากรูปที่ 4.25 – 4.27 แสดงสมบัติทางความร้อนโดย DSC ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า พอลิเมอร์ผสมสูตรทุกสูตรมีอุณหภูมิการตกผลึกเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก และอุณหภูมิการตกผลึกระหว่างตัวอย่างก็ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจาก HDPE และแป้งชนิดต่างๆ รวมตัวกันได้ไม่ตึงนัก โครงสร้างของแป้งจึงไม่ไปขัดขวางการตกผลึกของ HDPE ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการตกผลึกแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ดังจะเห็นได้จากกราฟอุณหภูมิการตกผลึกแต่ละเส้นไม่แตกต่างจากกัน และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติกับดินที่เติมเหล็ก พบว่ามีอุณหภูมิการตกผลึกไม่แตกต่างกัน

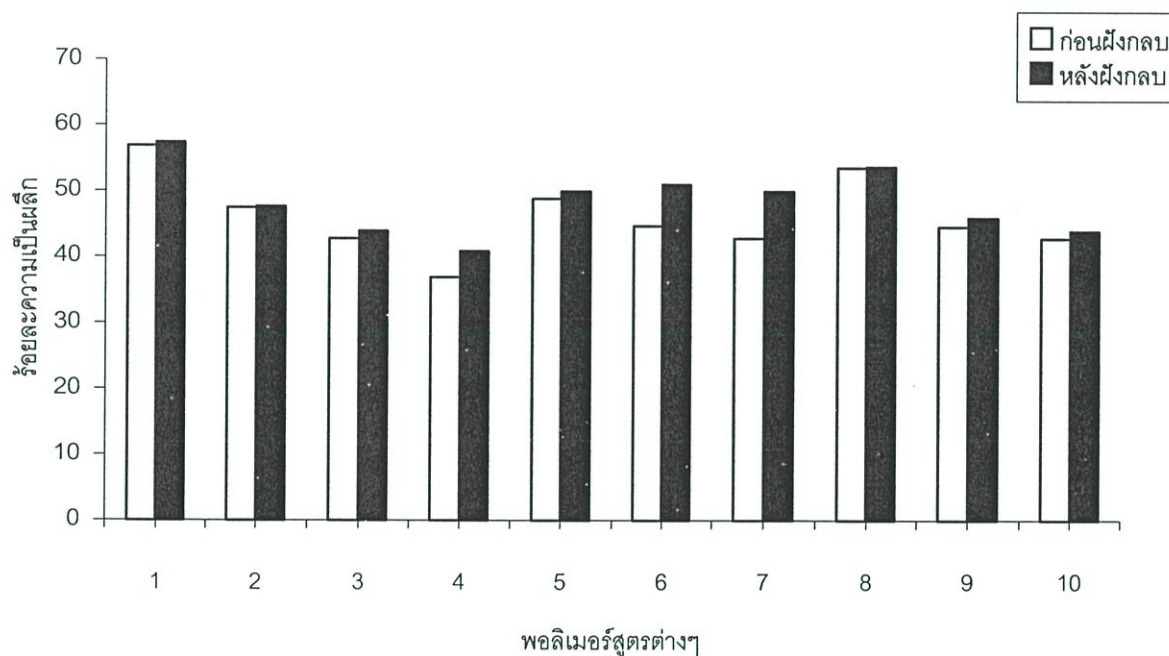
3 ความเป็นผลึก

ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงหลังฝังกลบในดินเป็นเวลา 4 เดือน หาได้จากเครื่อง DSC โดยคำนวณจากสูตร

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

$$\text{ค่าความเป็นผลึกของ HDPE 100\%} = 293.1 \text{ J/g [36]}$$

ผลการทดลองจาก DSC สามารถหาค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนและหลังการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆเป็นระยะเวลา 4 เดือน ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(1) HDPE

(2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10%

(3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20%

(4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%

(5) HDPE + แป้งสาาลี 10%

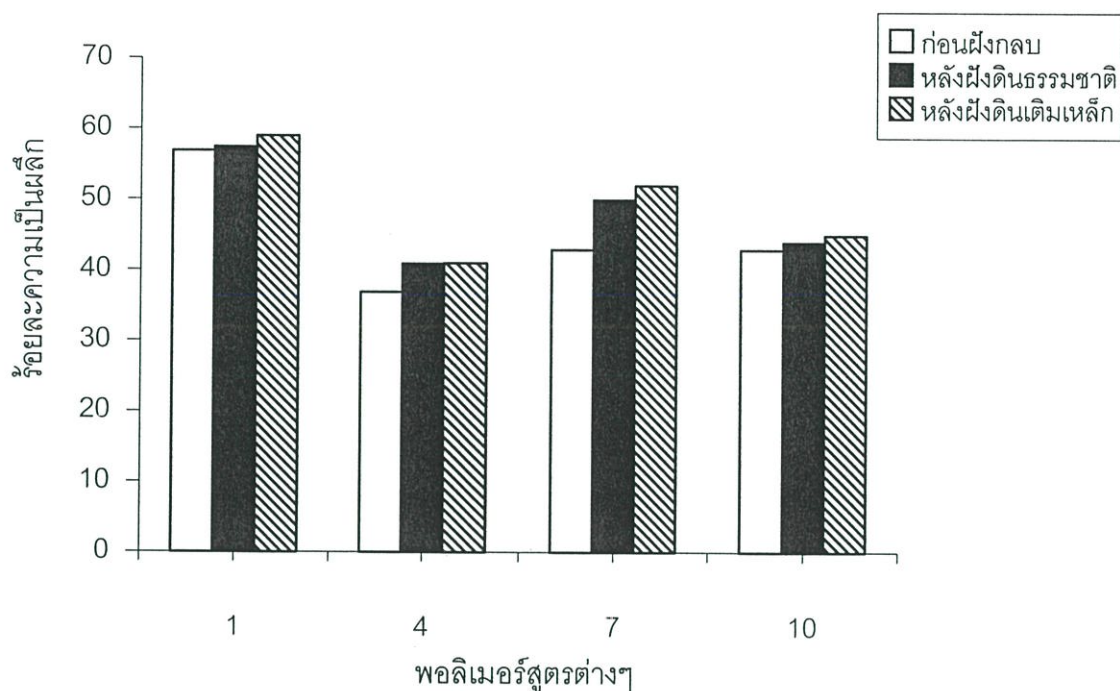
(6) HDPE + แป้งสาาลี 20%

(7) HDPE + แป้งสาาลี 30%

(8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10%

(9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20%

(10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินที่เตมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(1) HDPE

(7) HDPE+ แฉ่งสาลี 30%

(4) HDPE+ แฉ่งข้าวเจ้า 30%

(10) HDPE+ แฉ่งท้าวยายม่อม 30%

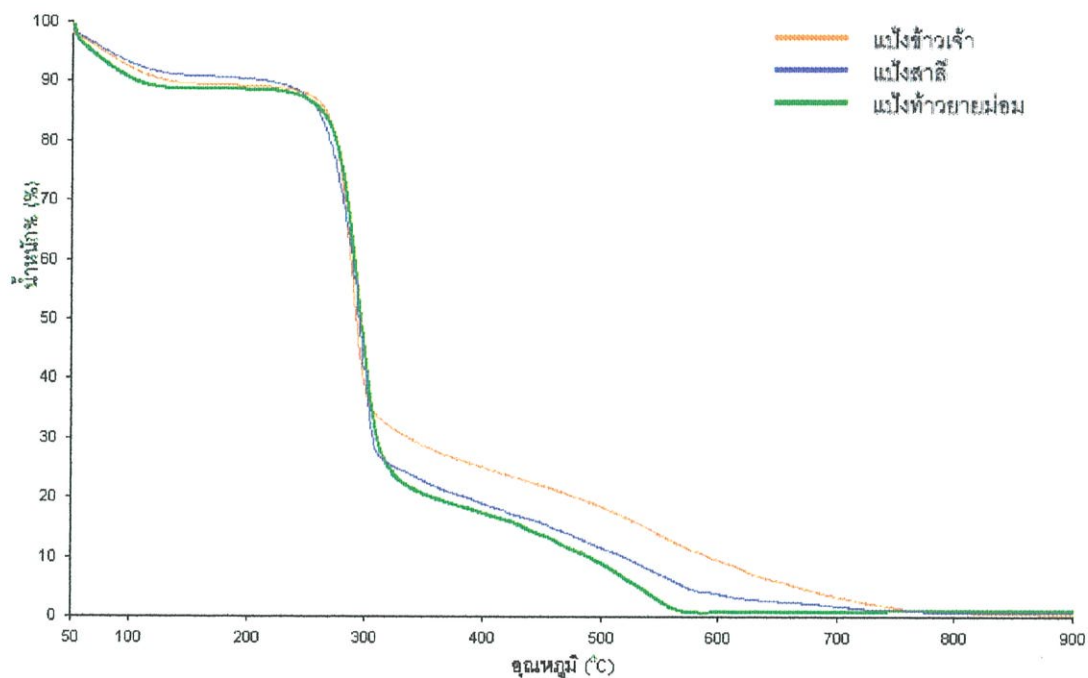
จากผลการทดลอง รูปที่ 4.28 แสดงกราฟเปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบในดินธรรมชาติ พบว่า ก่อนการฝังกลบ HDPE จะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกมากกว่า HDPE ที่มีการเติมแฉ่งชนิดต่างๆ ลงไป หลังการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่าร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมแฉ่งทุกสูตร จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์ก่อนการฝังกลบ เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ที่ผสมแฉ่งชนิดเดียวกันก่อนการฝังกลบ พบว่า การลดลงของร้อยละความเป็นผลึกแปรผันโดยตรงกับปริมาณแฉ่งที่เพิ่มขึ้น หมายความว่า แฉ่งรบกวนการเกิดเป็นผลึกของ HDPE และเพิ่มส่วนที่เป็นอสัณฐานระหว่างชั้น lamellae ของผลึก [37]

จากรูปที่ 4.29 เมื่อพิจารณา ร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ที่ผสมแฉ่งก่อนการฝังกลบ พบว่า ร้อยละความเป็นผลึกเรียงลำดับดังนี้ แฉ่งท้าวยายม่อม > แฉ่งสาลี > แฉ่งข้าวเจ้า แต่หลังการฝังกลบร้อยละความเป็นผลึกเปลี่ยนแปลงเรียงลำดับดังนี้ แฉ่งสาลี > แฉ่งข้าวเจ้า > แฉ่งท้าวยายม่อม ถ้าการเพิ่มขึ้นของผลึกหลังการฝังกลบเกิดจากบริเวณอสัณฐานของพอลิเมอร์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แปะงสาลีเมื่อผสมลงในพอลิเมอร์ทำให้เกิดบริเวณอัสฐานมากกว่า แปะงข้าวเจ้า และแปงท้าวยายม่อม ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป สิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ จุลินทรีย์ ฯ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเสื่อมสภาพในดิน ส่วนของพอลิเมอร์อัสฐานเหล่านี้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ อันเนื่องมาจากพอลิเมอร์มีการคายความเค้นและความเครียด [37] โดยพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กจะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกมากกว่าพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ และพอลิเมอร์ที่มีการเติมแปงมากขึ้นจะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีการเติมแปงสาลีลงไปจะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกมากกว่าพอลิเมอร์ที่เติมแปงข้าวเจ้าและแปงท้าวยายม่อม ตามลำดับ

4.2.2 การศึกษาด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

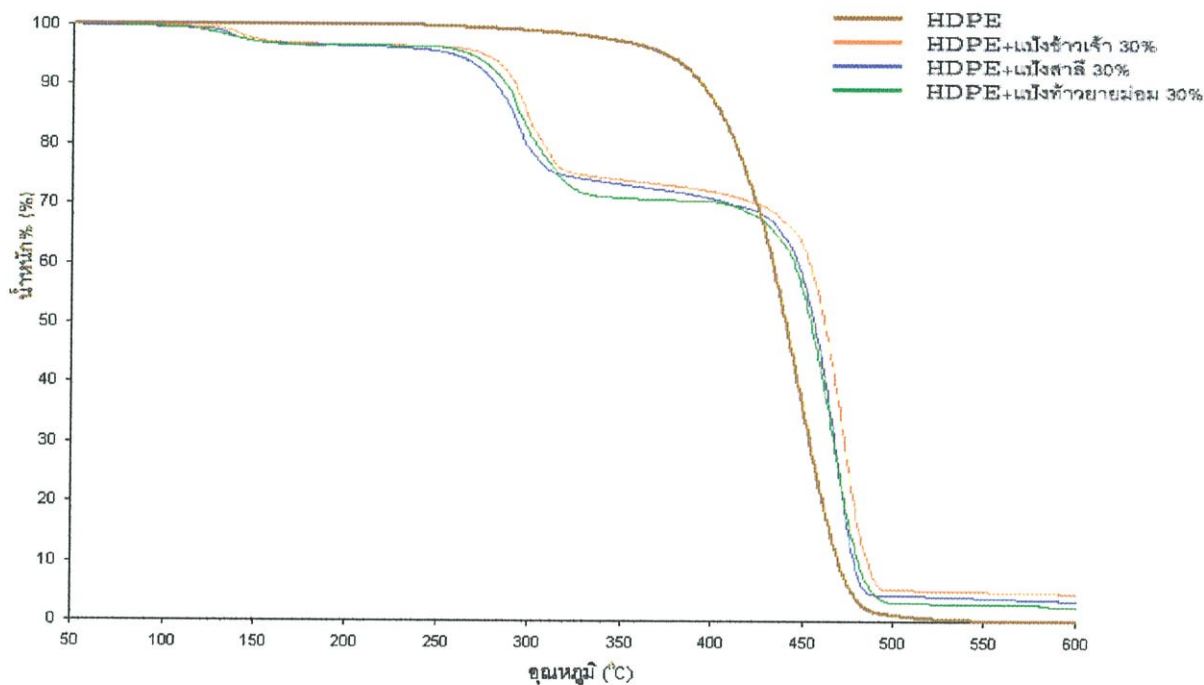
ทดลองสมบัติทางความร้อนของแป้งชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้ก่อนนำไปเติมในพอลิเมอร์ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถทนความร้อนของแป้งชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟสมบัติทางความร้อนของแป้งชนิดต่างๆที่ได้จาก TGA

จากรูปที่ 4.30 แสดงกราฟสมบัติทางความร้อนของแป้งชนิดต่างๆที่ได้จาก TGA พบว่า แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม สามารถทนความร้อนได้ใกล้เคียงกัน โดยแป้งท้าวยายม่อม จะสลายตัวได้เร็วกว่า แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ

ทดลองสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่เตรียมได้ก่อนนำไปฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถทนความร้อนของพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ กับพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่เตรียมได้ก่อนนำไปฝังกลบ ที่ได้จาก TGA

จากรูปที่ 4.31 แสดงกราฟสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่ได้จาก TGA พบว่า HDPE ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ ลงไป จะทนความร้อนได้สูงขึ้นไปกว่า HDPE ที่ไม่มีการเติมแป้งลงไป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งชนิดต่างๆ ที่เติมลงไป ใน HDPE จะเห็นว่า HDPE ที่มีการเติมแป้งข้าวเจ้าลงไปจะทนความร้อนได้สูงกว่า HDPE ที่มีการเติมแป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อมตามลำดับ

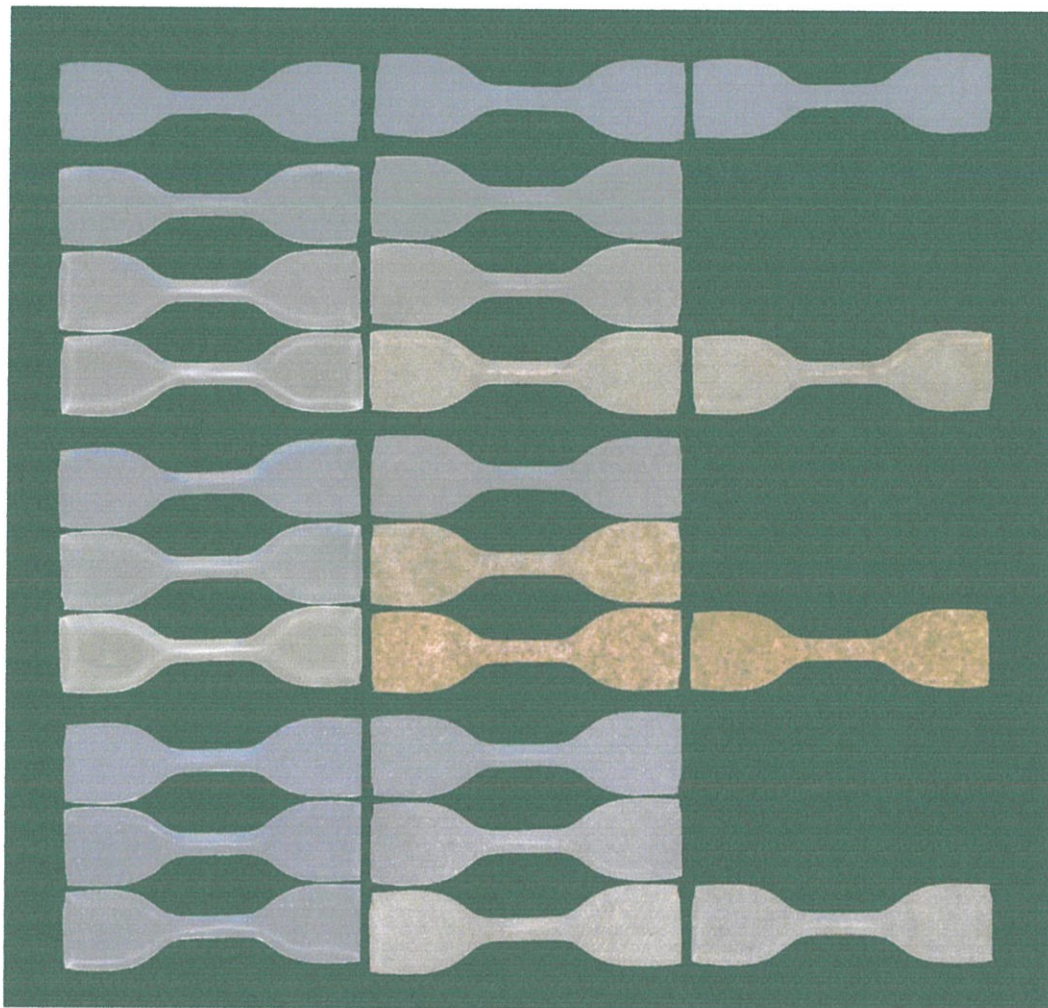
4.3 การหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน

เมื่อนำพอลิเมอร์ HDPE ผสมกับแป้งตามสูตรต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR แล้วนำผลของสูตรต่างๆมาเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาช่วง $1500 - 2000 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคบริเวณที่เกิดหมู่คาร์บอนิล

เนื่องจากชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆลงไปชิ้นงานจะมีความหนาจนไม่สามารถวิเคราะห์ด้วย FTIR ได้ ประกอบกับชิ้นงานจะมีความชื้นมาก เมื่อเวลาในการฝึกลบมากขึ้น ชิ้นงานก็จะมี ความชื้นมากขึ้นจนไม่สามารถวิเคราะห์ด้วย FTIR ได้

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ นายสมเจตน์ เชียงวานิช พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังลงไป หลังการฝึกลบแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่า ไม่สามารถตรวจพบหมู่คาร์บอนิลได้ เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายแป้ง

เปรียบเทียบชิ้นงานของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติ กับดินที่มีการเติมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือน



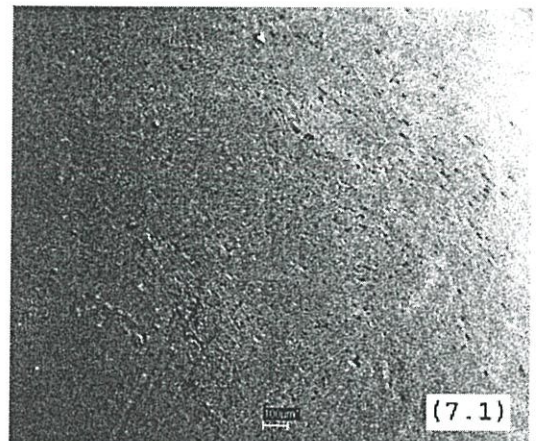
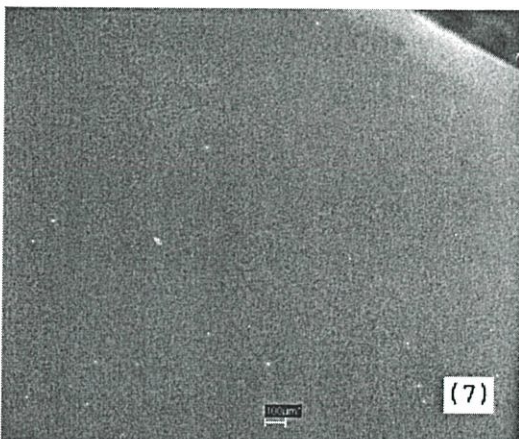
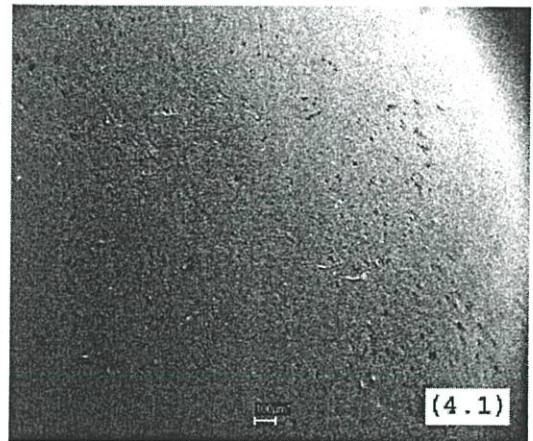
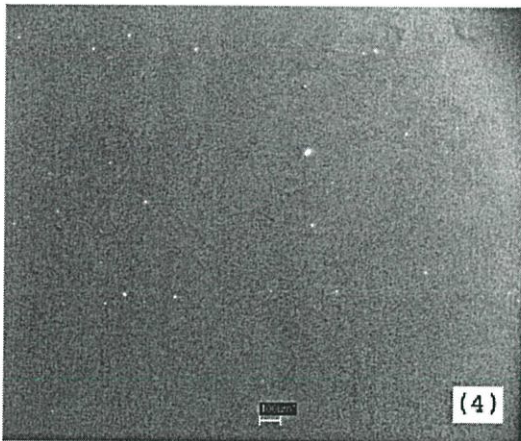
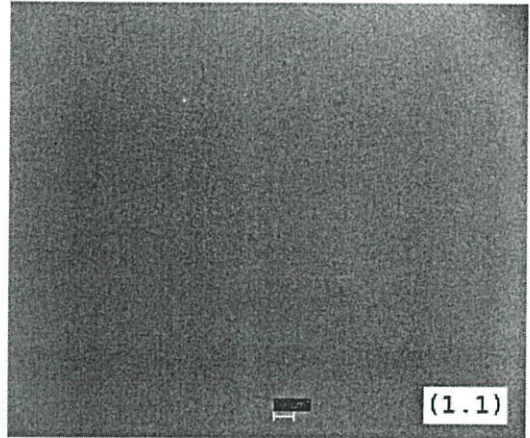
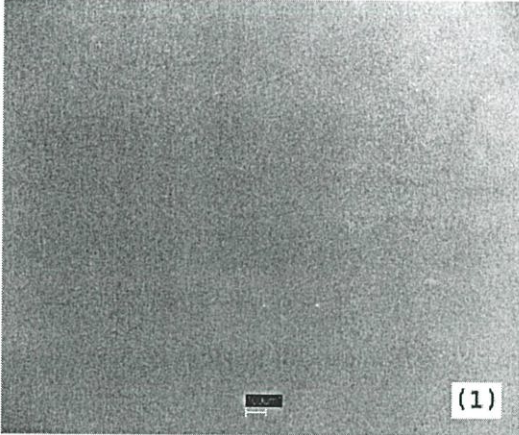
รูปที่ 4.32 แสดงภาพชิ้นงานของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบ

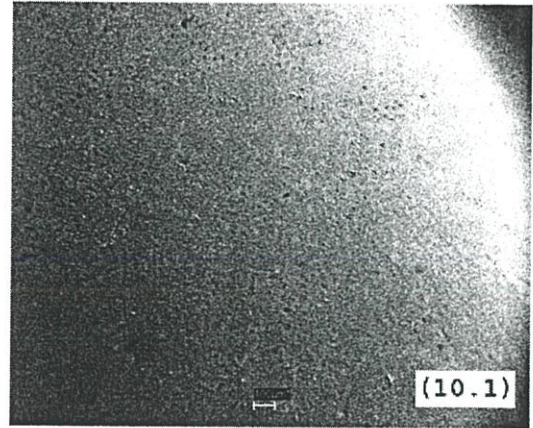
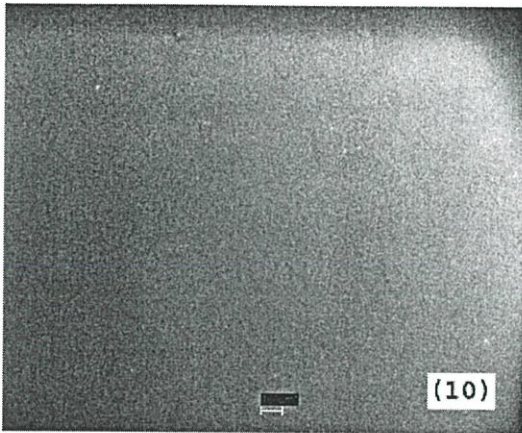
ก่อนฝัง	หลังฝังดินธรรมชาติ	หลังฝังดินที่เติมเหล็ก
HDPE	HDPE	HDPE
HDPE+แป้งข้าวเจ้า 10%	HDPE+แป้งข้าวเจ้า 10%	
HDPE+แป้งข้าวเจ้า 20%	HDPE+แป้งข้าวเจ้า 20%	
HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30%	HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30%	HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30%
HDPE+แป้งสาลี 10%	HDPE+แป้งสาลี 10%	
HDPE+แป้งสาลี 20%	HDPE+แป้งสาลี 20%	
HDPE+แป้งสาลี 30%	HDPE+แป้งสาลี 30%	HDPE+แป้งสาลี 30%
HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 10%	HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 10%	
HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 20%	HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 20%	
HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30%	HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30%	HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30%

4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.4.1 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือน วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ได้ผลการทดลองดังนี้





รูปที่ 4.33 แสดงภาพจาก SEM เปรียบเทียบพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(1) HDPE ก่อนฝังกลบ

(1.1) HDPE หลังฝังกลบ

(4) HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30% ก่อนฝังกลบ

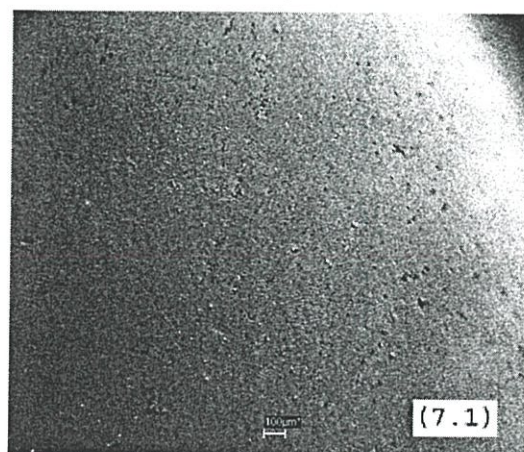
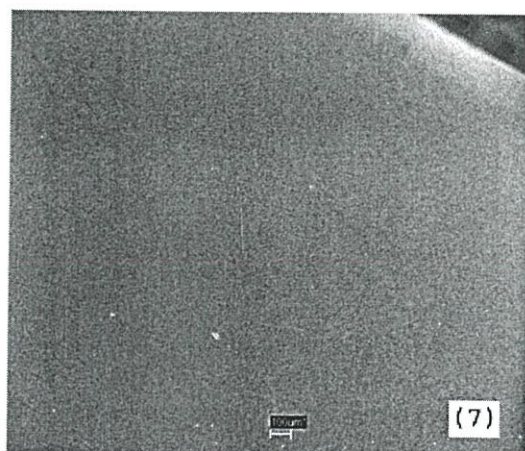
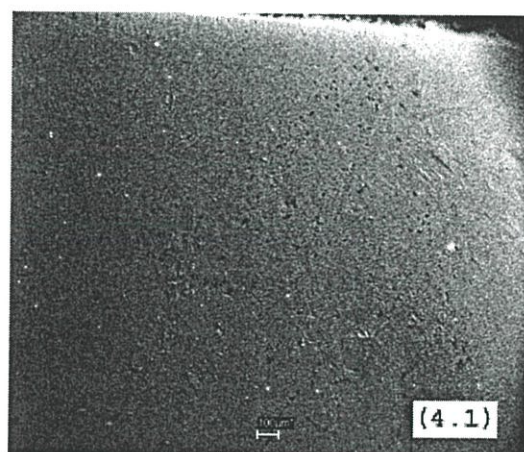
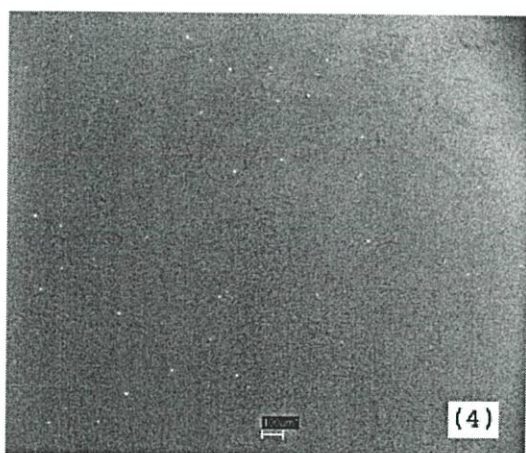
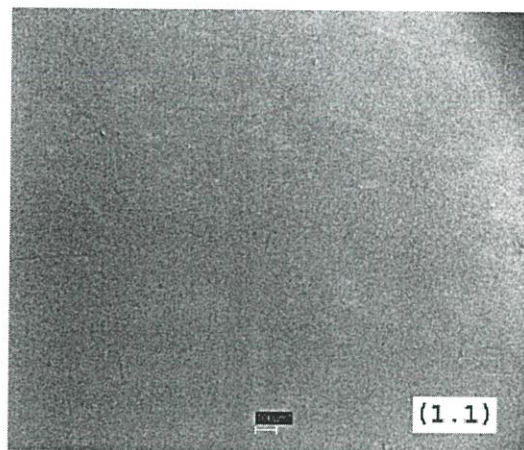
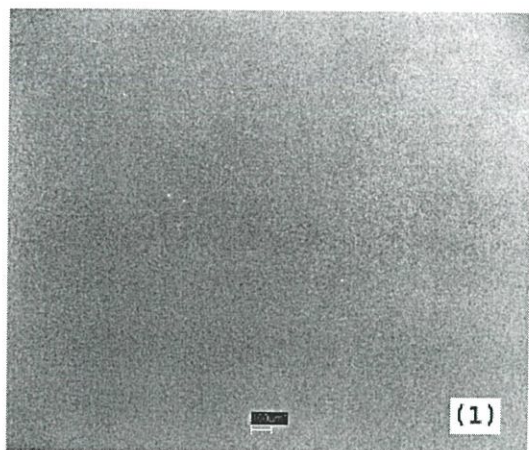
(4.1) HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30% หลังฝังกลบ

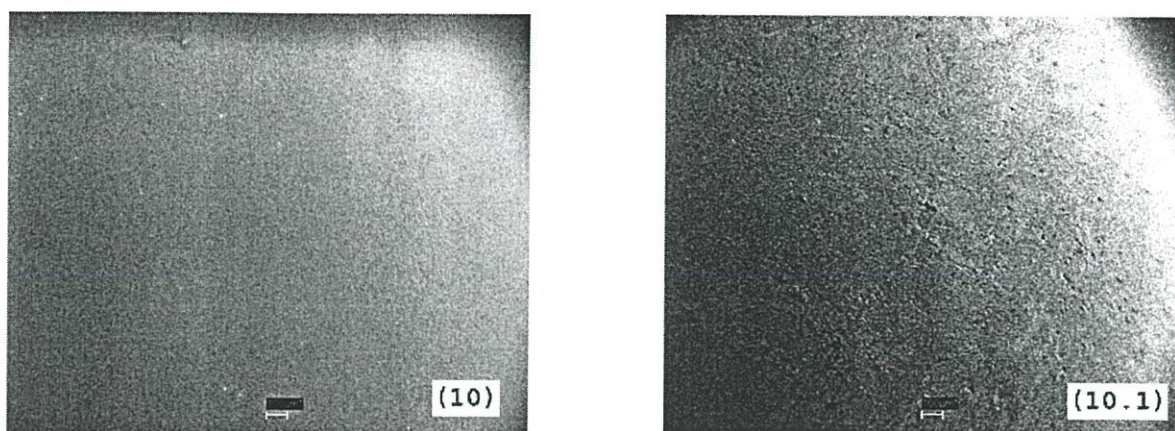
(7) HDPE+แป้งสาลี 30% ก่อนฝังกลบ

(7.1) HDPE+แป้งสาลี 30% หลังฝังกลบ

(10) HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30% ก่อนฝังกลบ (10.1) HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30% หลังฝังกลบ

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นระยะเวลา 4 เดือน วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ได้ผลการทดลองดังนี้





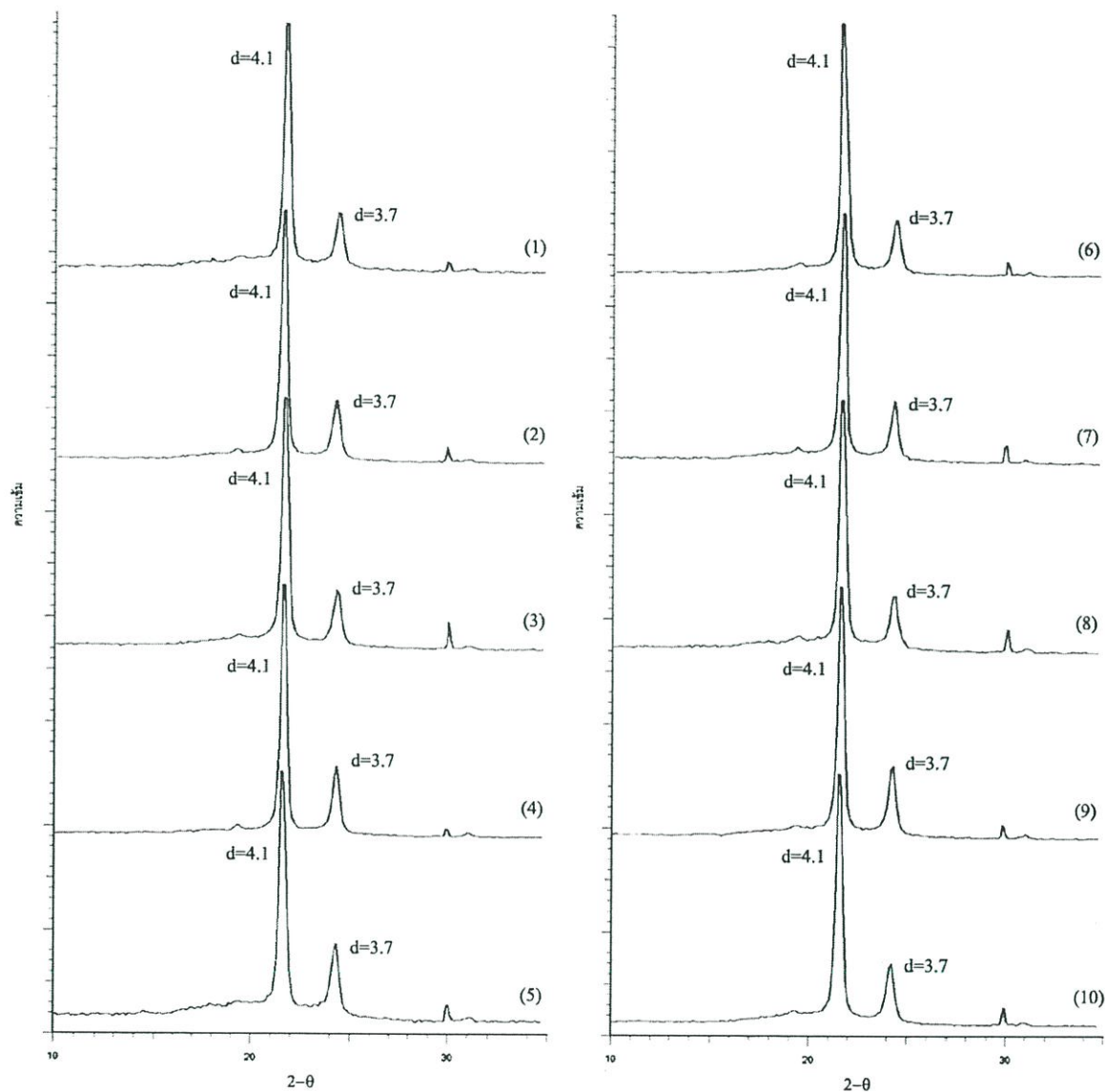
รูปที่ 4.34 แสดงภาพจาก SEM เปรียบเทียบพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในดินที่เติม Fe^{2+} เป็นระยะเวลา 4 เดือน

- | | |
|--|--|
| (1) HDPE ก่อนฝังกลบ | (1.1) HDPE หลังฝังกลบ |
| (4) HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30% ก่อนฝังกลบ | (4.1) HDPE+แป้งข้าวเจ้า 30% หลังฝังกลบ |
| (7) HDPE+แป้งสาลี 30% ก่อนฝังกลบ | (7.1) HDPE+แป้งสาลี 30% หลังฝังกลบ |
| (10) HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30% ก่อนฝังกลบ | (10.1) HDPE+แป้งท้าวยายม่อม 30% หลังฝังกลบ |

จากรูปที่ 4.33 – 4.34 แสดงภาพพื้นผิวของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบในดินชนิดต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือนพบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรที่มีการเติมแป้งจะมีรูพรุนเกิดขึ้นกระจายไปทั่วบนพื้นผิว ยกเว้น HDPE ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นบนพื้นผิว เมื่อพิจารณาแป้งชนิดต่างๆ ที่เติมลงไปพอลิเมอร์พบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลีลงไปเมื่อผ่านการฝังกลบพอลิเมอร์จะเกิดรูพรุนมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อมตามลำดับ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กทุกสูตรจะมีรูพรุนเกิดขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ

4.4.2 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์มพอลิเมอร์

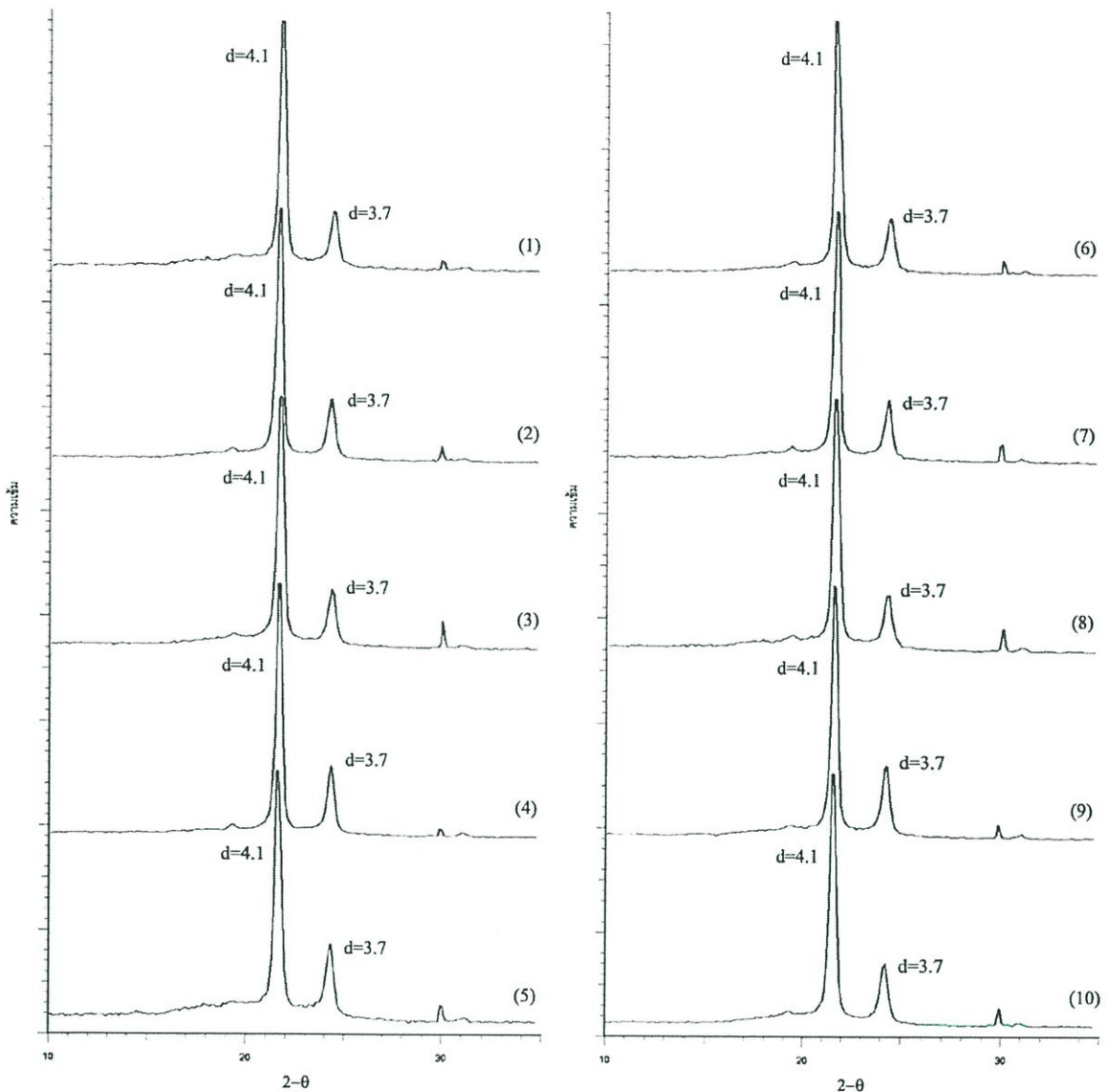
การตรวจสอบโดยใช้ X-Ray-Diffraction (XRD) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนทำการฝังกลบในดิน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนทำการฝังกลบในดิน

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| (1) HDPE | (6) HDPE + แป้งสาลี 20% |
| (2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10% | (7) HDPE + แป้งสาลี 30% |
| (3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20% | (8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10% |
| (4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30% | (9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20% |
| (5) HDPE + แป้งสาลี 10% | (10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30% |

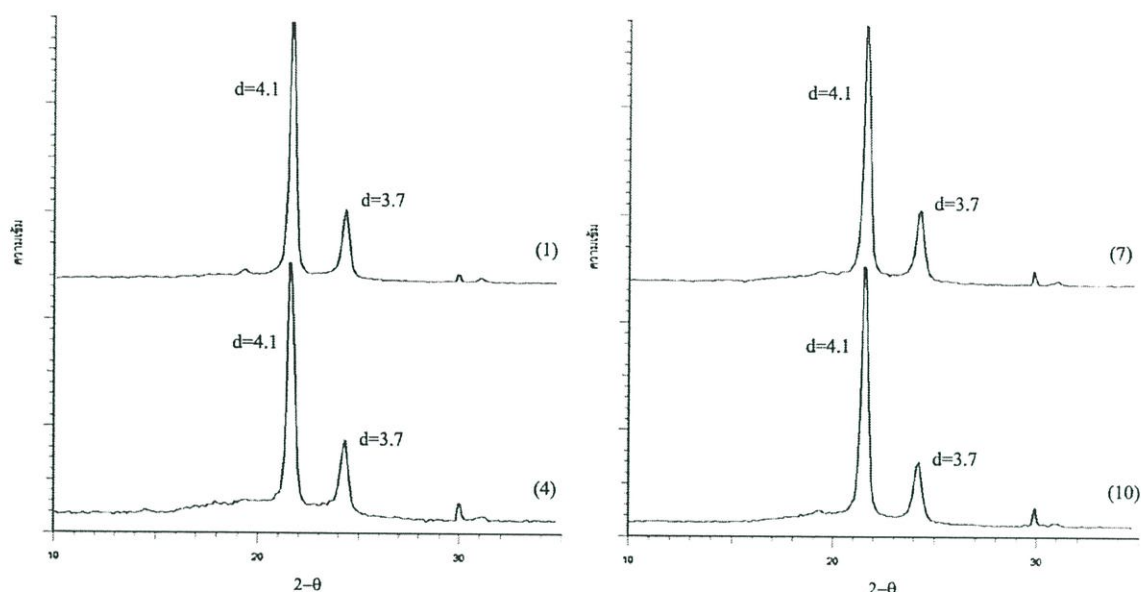
การตรวจสอบโดยใช้ XRD เพื่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกพอลิเมอร์ผสม
สูตรต่างๆหลังทำการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังทำการฝังกลบ
ในดินธรรมชาติเป็นระยะเวลา 4 เดือน

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| (1) HDPE | (6) HDPE + แป้งสาลี 20% |
| (2) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10% | (7) HDPE + แป้งสาลี 30% |
| (3) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20% | (8) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10% |
| (4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30% | (9) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20% |
| (5) HDPE + แป้งสาลี 10% | (10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30% |

การตรวจสอบโดยใช้ XRD เพื่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังทำการฝังกลบในดินที่เดิมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังทำการฝังกลบ
ในดินที่เดิมเหล็กเป็นระยะเวลา 4 เดือน

(1) HDPE

(7) HDPE + แป้งสาลี 30%

(4) HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%

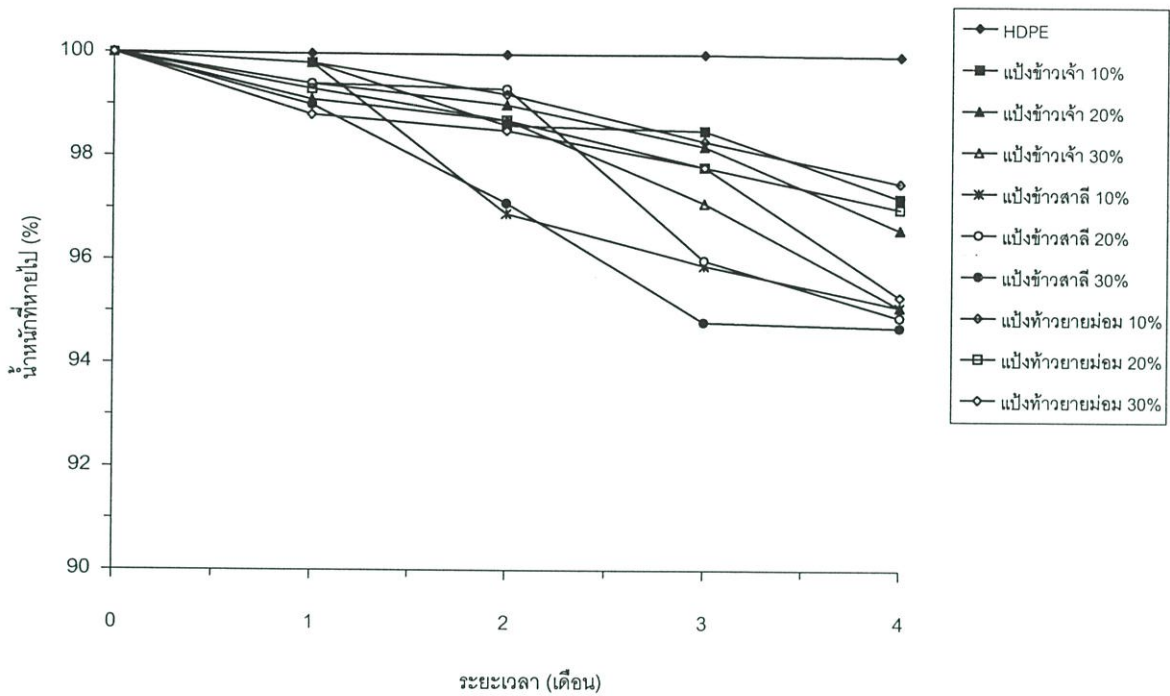
(10) HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.35 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนทำการฝังกลบในดิน พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีพีค 2-Theta อยู่ที่ 21.5 - 21.6 องศา มีค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีค 2-Theta อยู่ที่ 23.8 - 23.9 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน [38]

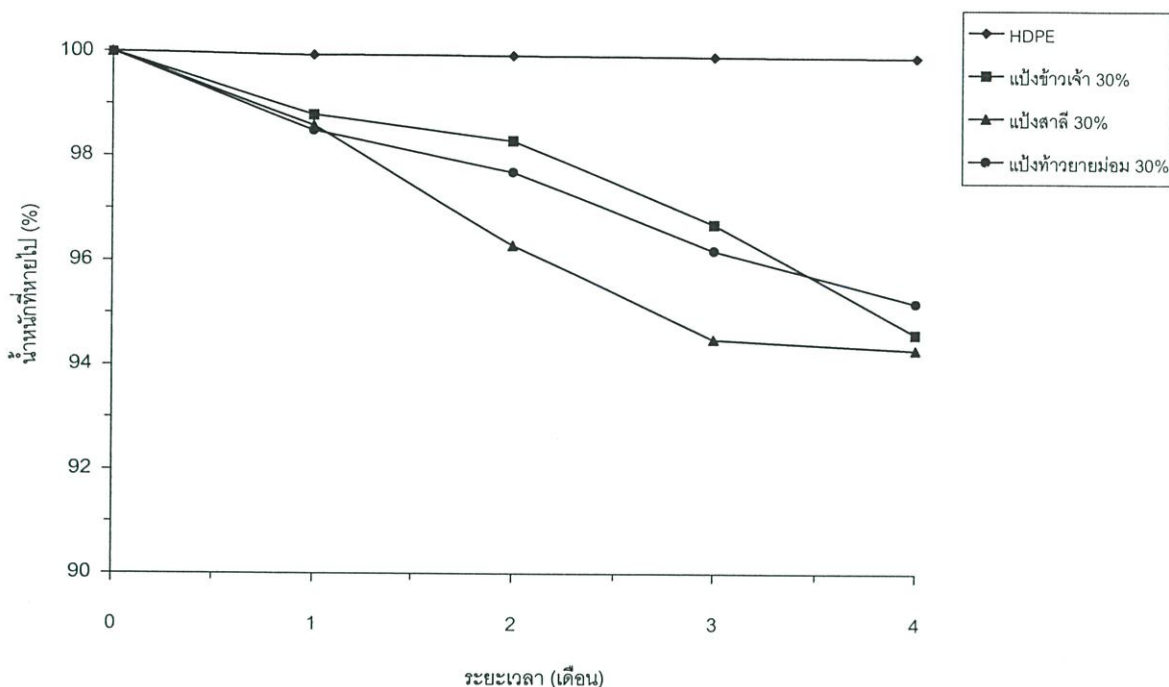
จากผลการทดลอง รูปที่ 4.36 - 4.37 แสดงกราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังทำการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีพีค 2-Theta อยู่ที่ 21.5 - 21.7 องศา มีค่า d อยู่ที่ 4.1 Å และพีค 2-Theta อยู่ที่ 23.7 - 23.9 องศา มีค่า d อยู่ที่ 3.7 Å ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนและหลังทำการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ เป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่าค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าแป้งไม่ได้เข้าไปอยู่ในโครงสร้างแต่เข้าไปอยู่บริเวณที่เป็นอณูพื้นฐานของพอลิเมอร์แทน พีคจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4.4.3 การหาน้ำหนักที่หายไป

โดยนำชิ้นงานที่รู้น้ำหนักแน่นอนไปฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 เดือน แล้วนำชิ้นงานออกมาทุกเดือน เพื่อทำการหาน้ำหนักที่หายไป โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนทำการฝังกลบ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.38 แสดงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ

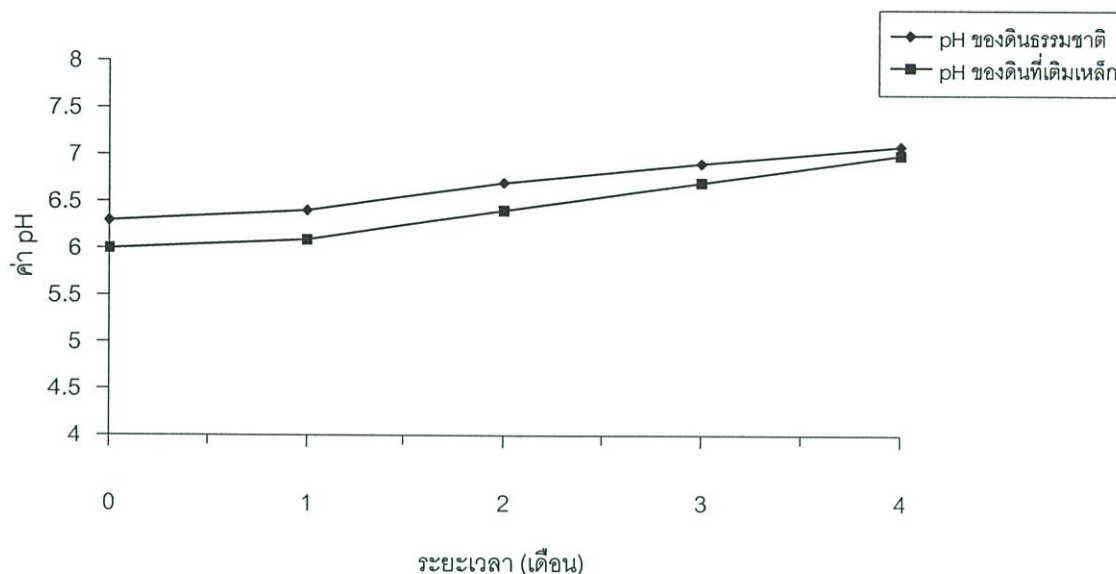


รูปที่ 4.39 แสดงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

จากรูปที่ 4.38 – 4.39 แสดงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรหลังการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรมีน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดย HDPE ที่มีการเติมแป้งสาลีจะมีน้ำหนักที่หายไปมากที่สุด และ HDPE ที่ไม่ได้มีการเติมแป้งลงไปจะมีน้ำหนักที่หายไปน้อยที่สุด ส่วน HDPE ที่มีการเติมแป้งชนิดเดียวกันลงไปพบว่า เมื่อ HDPE มีปริมาณของแป้งมากขึ้น ก็จะมีน้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติกับดินที่มีการเติมเหล็กลงไป พบว่า พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่มีการเติมเหล็กจะมีน้ำหนักที่หายไปมากกว่าในดินธรรมชาติเล็กน้อย

4.5 การวิเคราะห์หาค่า pH ของดินด้วย Glass Electrode

ทำการหาค่า pH ของดินในสภาวะต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบทุกเดือน โดยใช้เครื่องวัด pH ได้ผลการทดลองดังนี้



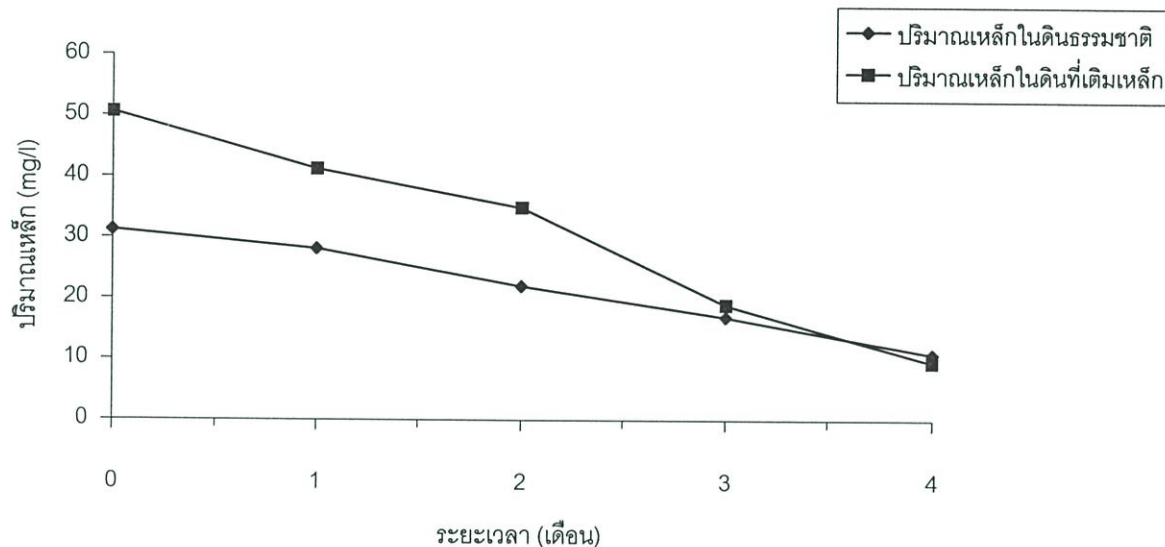
รูปที่ 4.40 แสดงค่า pH ของดินในสภาวะต่างๆก่อนและหลังการฝังกลบ

จากรูปแสดงค่า pH ของดินที่ใช้ในการฝังกลบพอลิเมอร์ พบว่า ดินที่ใช้ในการทดลอง มีความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย โดยดินธรรมชาติจะมีค่า pH เริ่มต้นอยู่ที่ 6.3 ส่วนดินที่มีการเติมเหล็ก จะมีค่า pH อยู่ที่ 6.0 ซึ่งต่ำกว่าเล็กน้อย หลังการฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า pH ของดิน จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ดินธรรมชาติจะมีค่า pH อยู่ที่ 7.1 ส่วนดินที่มีการเติมเหล็กจะมีค่า pH อยู่ที่ 7.0 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Fe^{+2} ทำปฏิกิริยากับ OH^- ซึ่งมาจากน้ำที่มีอยู่ในดิน [39] ดังสมการ



4.6 การหาปริมาณเหล็กในดิน (Fe^{2+})

ทำการหาปริมาณเหล็กในดินชนิดต่างๆ ก่อนและหลังการฝังกลบทุกเดือน โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.41 แสดงปริมาณเหล็กในดินชนิดต่างๆก่อนและหลังการฝังกลบ

จากรูปแสดงปริมาณเหล็กในดินที่ใช้ในการฝังกลบพอลิเมอร์ พบว่า ก่อนการฝังกลบ ในดินธรรมชาติจะมีปริมาณเหล็กอยู่ที่ 31.24 mg/l ส่วนดินที่มีการเติมเหล็ก จะมีปริมาณเหล็กอยู่ที่ 50.61 mg/l ซึ่งมีปริมาณของเหล็กมากกว่าในดินธรรมชาติ ภายหลังจากการฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่าปริมาณของเหล็กจะมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือในดินธรรมชาติจะมีปริมาณเหล็กอยู่ที่ 10.88 mg/l ส่วนดินที่มีการเติมเหล็กจะมีปริมาณเหล็กอยู่ที่ 9.55 mg/l ซึ่งต่ำกว่าในดินธรรมชาติเล็กน้อย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการย่อยสลายของ semicrystalline polymer โดยใช้ขูดน้ำต้ม HDPE ที่ใช้แล้วทิ้งเป็นพลาสติกตั้งต้นในการทดลอง นำขูด HDPE ดังกล่าวมาผสมกับแป้ง 3 ชนิดได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม จากนั้นศึกษาสมบัติต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงหลังฝังกลบในดินเป็นเวลา 4 เดือนได้ผลการทดลองสรุปดังนี้

การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ HDPE ผสมแป้งสามารถตรวจสอบได้จากการวัดสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป การทดลอง พบว่า ปัจจัยสำคัญของการเสื่อมสภาพจะอยู่ที่ชนิดของแป้ง และปริมาณของแป้งที่ใช้ผสมเข้าไปในพอลิเมอร์ ซึ่งการทดสอบทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเมอร์ พบว่า ชิ้นงานพอลิเมอร์ที่มีปริมาณของแป้งมากขึ้นจะเกิดการย่อยสลายได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งน้อย และพอลิเมอร์ที่มีการเติม แป้งสาลี 30% ลงไปจะเกิดการย่อยสลายได้ดีที่สุด

การทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า แป้งจะทำให้พอลิเมอร์ HDPE ผสมแข็งเปราะขึ้น โดยพิจารณาจาก ค่าความทนแรงดึง กับค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง และค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแป้งมีปริมาณเพิ่มขึ้น และเนื่องจากเม็ดแป้งที่เติมลงไปมีมวลโมเลกุลใหญ่ และมีรูปร่างทรงกลมจะไปขัดขวางการยึดของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อออกแรงดึงยืดพอลิเมอร์ ทำให้ HDPE เคลื่อนตัวได้ยาก โซ่โมเลกุลขาดง่าย ถ้ายังมีปริมาณแป้งมากก็ยิ่งไปขัดขวางการยึดมาก

การวัดสมบัติการออกซิเดชัน พบว่าชิ้นงานของพอลิเมอร์มีความหนาและขุนทำให้การวิเคราะห์ด้วย FTIR ไม่พบหมู่คาร์บอนิล สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค DSC พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิในการตกผลึกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าปริมาณและชนิดของแป้งไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิการตกผลึก นอกจากนี้ พบว่า พอลิเมอร์ HDPE ที่มีการเติมแป้งจะทนความร้อนได้สูงกว่า HDPE ที่ไม่มีการเติมแป้ง

การทดสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ HDPE ผสมแป้งพบว่า กราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังทำการฝังกลบในสภาวะดินต่างๆ มีค่า 2-Theta และ d มีค่าไม่แตกต่างกันแสดงว่าแป้งไม่ได้เข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกแต่เข้าไปอยู่บริเวณที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์แทน พิกจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง

การตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาหลังฝังกลบ 4 เดือนพบว่า บนพื้นผิวของชิ้นงานพอลิเมอร์ HDPE ทุกสูตรที่มีการเติมแป้ง จะเกิดรูพรุนกระจายไปทั่วบนพื้นผิวในเวลา 4 เดือน

ซึ่งเกิดการย่อยสลายของแป้งด้วยจุลินทรีย์ในดิน โดยชิ้นงานที่ฝังในดินที่มีการเติมเหล็กจะมีพูนเกิดขึ้นมากกว่าในดินธรรมชาติเล็กน้อย และชิ้นงานที่ผสมแป้งสาลีจะมีพูนมากกว่าชิ้นงานที่ผสมแป้งชนิดอื่นๆ

ประโยชน์ของการวิจัยนี้ พบว่า อายุการใช้งาน (การย่อยสลายของพอลิเมอร์ HDPE) อาจถูกกำหนดโดย ชนิดและปริมาณของแป้งที่ผสมลงในพอลิเมอร์

แป้งที่มีอะไมโลสมากกว่า 18 และ DP อะไมโลสต่ำ เช่น แป้งสาลี จะทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพได้เร็วกว่าแป้งท้าวยายม่อม ที่มีอะไมโลสน้อยกว่า 18 และมี DP อะไมโลสสูง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการย่อยสลายโดยใช้ระยะเวลาในการฝังกลบมากกว่า 4 เดือน เพื่อจะได้เห็นข้อมูลชัดเจนขึ้น
2. ควรทำตัวอย่างเป็นฟิล์มให้บางขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายในดินจะเกิดที่บริเวณผิว
3. ควรทำการทดลองในการย่อยสลายโดยวิธีอื่นๆ เช่น การฝังดิน การย่อยสลายทางชีวภาพ หรือโดยแสงอาทิตย์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน
4. ควรทำการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เพื่อศึกษาการย่อยสลาย
5. ควรทำการฝัง HDPE ในดินโดยเฉพาะ แยกจาก HDPE ที่มีการเติมแป้ง เพื่อจะได้ศึกษาว่าแป้งมีผลทำให้ค่า pH และปริมาณของเหล็กในดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร
6. ควรทำการฝังพอลิเมอร์ในดินชนิดต่างๆ ให้มากขึ้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน
7. ควรวัดความหนืดของพอลิเมอร์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุล

เอกสารอ้างอิง

1. กล้าณรงค์ ศิริรอด, ดร. 2544. แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง: การผลิตและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ. มูลนิธิอานินะโมะโตะ. กรุงเทพฯ : 1-8.
2. R.G.F. Vissers. 1996. *Comparison of starches from different botanical sources*. In advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology. Jan. 22-26 & Feb. 19-23, AIT Center, Bangkok.
3. J.P.M. Sander. 1996. *Starch manufacturing in the world*. In advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology. Jan. 22-26 & Feb. 19-23, AIT Center, Bangkok.
4. G.M.A. Beynum and J.A. Roels. 1985. *Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker, Ind., New York. 326.
5. T.J. Schoch. 1965. *Starch in bakery products*. Baker's Digest 39(2): 48-57.
6. S. Hizukuri. 1988. *Recent advances in molecular structure of starch*. J. Jpn. Soc. Starch Sci. 31 : 185.
7. R.L. Whistler and J.R. Deniel. 1984. *Molecular structure of starch*. pp. 153-178. In R.L. Whistler, J.N. Bemiller, and E.F. Paschall (Eds.) *Starch : Chemistry and Technology*. 2nd Ed. Academic Press, Inc., Florida.
8. J.M.V. Blanshard. 1987. *Starch granule structure and function : A physicochemical approach*. In T. Gailliard (Ed.). *Starch : Properties and Potential*. John Wiley and Sons., New York.
9. กล้าณรงค์ ศิริรอด, ดร. 2542. *เทคโนโลยีของแป้ง*. บ.เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด. กรุงเทพฯ : 87-100.
10. R.W. Kerr. 1950. *Chemistry and Industry of Starch*. 2nd ed. Academic Press Inc., New York. 719 p.
11. J.W. Knight. 1969. *The Starch Industry*. Pergamon Press, Oxford. 189 p.
12. S.A. Watson. 1984. *Corn and sorghum starches : Production*. pp. 417-468. In R.L. Whistler, J.N. BeMiller, and E.F. Paschall (Eds.). *Starch : Chemistry and Technology*. 2nd ed. Academic Press Inc., Florida.

13. อรอนงค์ นัยวิกุล. 2538. *เคมีทางธัญญาหาร*. เอกสารคำสอนวิชา เคมีทางธัญญาหาร (วทอ. 511). ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 148 หน้า.
14. A. Eliasson and M. Gudmundsson. 1996. *Starch : Physicochemical and functional aspects*. pp. 431-503. In A. Eliasson. *Carbohydrate in Food*. Marcel Dekker, Inc., New York. 561 p.
15. K. Piyachomkwan, S. Chotineeranart, R. Chollakup, K. Sriroth, and C.G. Oates. 1999. *Physico-chemical properties of starch from arrowroot (Maranta arundinacea) : Their comparison and interaction to cassava starch*. *Starch/Starke*. Submitted.
16. J.J.M. Swinkels. 1985. *Composition and properties of commercial native starches*. *Starch/Starke*. 37 : 1-5.
17. C.C. Maningat and P.A. Seib. 1992. *Starch : Occurrence, isolation, and properties of starch granules*. In AACC Short Course-"Starch : Structure, Properties, and Food Uses." December 3-4, 1992. Chicago.
18. H.W. Leach. 1965. Gelatinization of starch. In R.L. Whistler, E.F. Paschall, J.N. BeMiller, and H.J. Roberts (Eds.). *Starch ; Chemistry and Technology Vol I*. Academic Press, New York. pp. 289-307.
19. R.W.K. Emerson. 1995. *Chemistry and Industry of starch*: 3-17.
20. ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, ดร. 2537. *เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน*. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ : 308-312.
21. เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์, รศ. 2540. *Polymer Science I*. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโรงพิมพ์. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ : 117-119.
22. ปรีชา พหลเทพ, รศ. 2530. *โพลีเมอร์*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. พิมพ์ครั้งที่ 3 . กรุงเทพฯ : 310-320.
23. นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล, ผศ.ดร. 2537. *ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : 16-21.
24. H.B. Greizertein, A.J. Syracuse, and P.J. Kostyniak. 1993. Degradation of starch modified polyethylene bags in a compost field study. *Polymer Degradation and Stability* 39. 251-259.

25. ธนิตา ปะบุญเรือง. 2538. การสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. บุญศรี ศิลาพัชรนันท์ และธิดาพันธ์ ชี้อัสตยาวงศ์. 2538. การย่อยสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมแป้งมันสำปะหลัง. โครงการวิจัย ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
27. P. Gijssman and J. Sampers. 1997. The influence of oxygen pressure and temperature on the UV-degradation chemistry of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability* 58. 55-59.
28. M.K. Ioultcheva, M. Jilov, and F.P.L. Mantia. 1997. Recycling of high density polyethylene containers. *Polymer Degradation and Stability* 57. 77-81.
29. Jurgen Lorcks. 1998. Properties and applications of compostable starch-based plastic material. *Polymer Degradation and Stability* 59. 245-249.
30. U.Funke, W. Bergthaller, and M.G. Lindhauer. 1998. Processing and characterization of biodegradable products based on starch. *Polymer Degradation and Stability* 59. 293-296.
31. วัฒนาพร พรศิริพงษ์. 2541. *Degradation of starch-based high density polyethylene blends containing a prooxidation additive*. Thesis for Degree of Master of Science. The Petroleum and Petrochemical College. Chulalongkorn University.
32. สมเจตน์ เขียงวานิช. 2545. พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกับพอลิแซ็กคาไรด์. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
33. C. Llop and A. Perez. 1992. *Die Makromol Chem. Macromol. Symp.* (W. Heitz, Ed.) 57-115
34. ASTM D638. 1993. *Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)*. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
35. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. 2544. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ : 3-75.
36. J. Brandrup. 1999. *Polymer Handbook*. John Wiley & Son Inc. New York.

37. G.H. Michler. 1992. Correlation between molecular weight, morphology and micromechanical deformation process of polyethylenes. *Colloid Polym Sci.* 270 : 627-638
38. P. Matzinos, D. Bikiaris, S. Kokkou, and C. Panayiotou. 2001. Processing and Characterization of LDPE/Starch Products. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 79, 2548-2557.
39. ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2515. *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
40. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม *มอก.* 638-2529 : 4.
41. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม *มอก.* 375-2524 : 4-6.
42. D.L. Kaplan. 1993. *Fundamentals of biodegradable polymers*. pp. 1-42. In C. Ching, D. Kaplan, and E. Thomas (eds.). *Biodegradable Polymers and Packaging*. Technomic Publishing Co., Ltd. Lancaster, PA.
43. *วารสารพัฒนาที่ดิน*. 2520. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การขายและการซื้อแห่งประเทศไทย. ปีที่ 14 ฉบับที่ 145 มิถุนายน. กรุงเทพฯ : 28-31.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

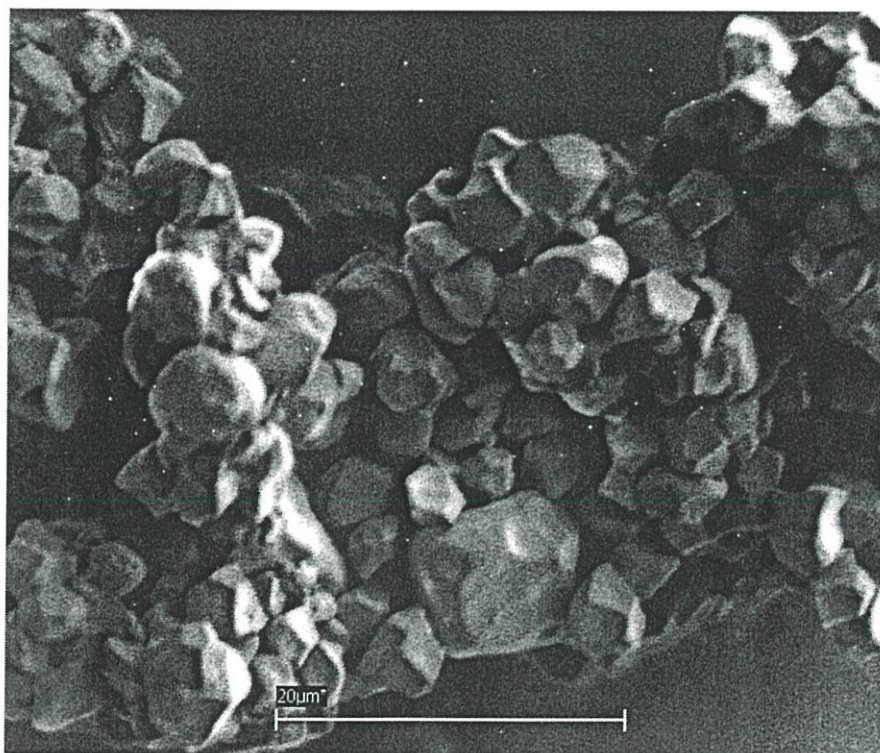
ก.1 คุณสมบัติของแป้งชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

แป้งข้าวเจ้า : ตราดาวแดง ผลิตโดย บ.ไทยเบตเตอร์ฟู้ดส์ จำกัด

คุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในการทดลองนี้

ความชื้น	13% max
pH	5 – 7
เถ้า	0.4% max
โปรตีน (N x 6.25)	5% min

วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 5000 เท่า ได้ผลการทดลองดังนี้



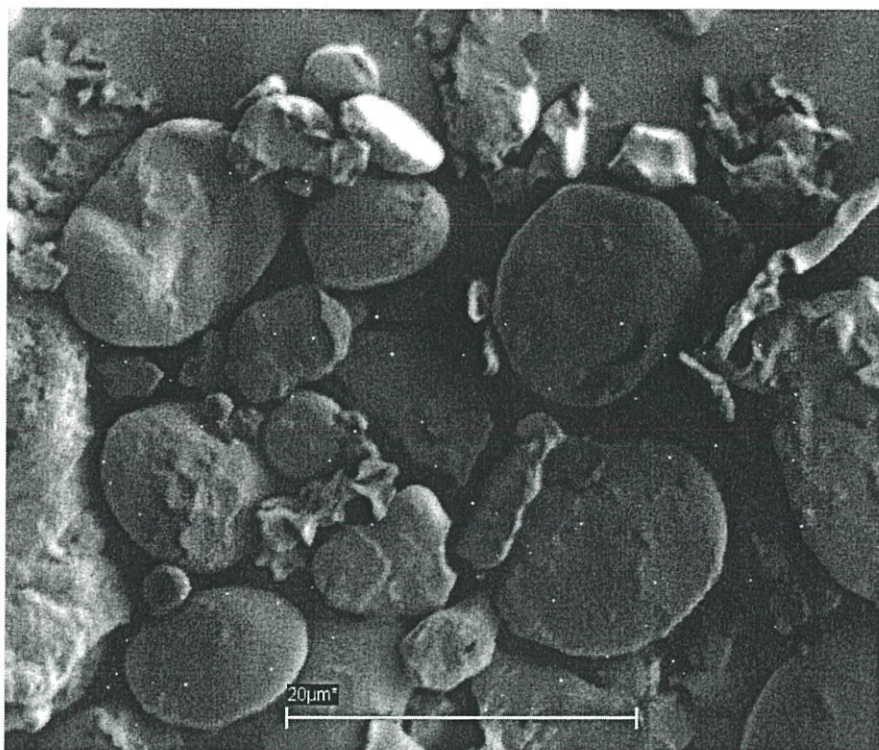
รูปที่ก.1 แสดงรูปร่างของเม็ดแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในการทดลอง

แป้งสาลีเอนกประสงค์ : ตราว่าว ผลิตโดย บ.ยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด

คุณสมบัติของแป้งสาลีที่ใช้ในการทดลองนี้

ความชื้น	12.7 – 13.5%
pH	5.5 – 5.8
โปรตีน	10.5 – 11.0%

วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 5000 เท่า ได้ผลการทดลองดังนี้



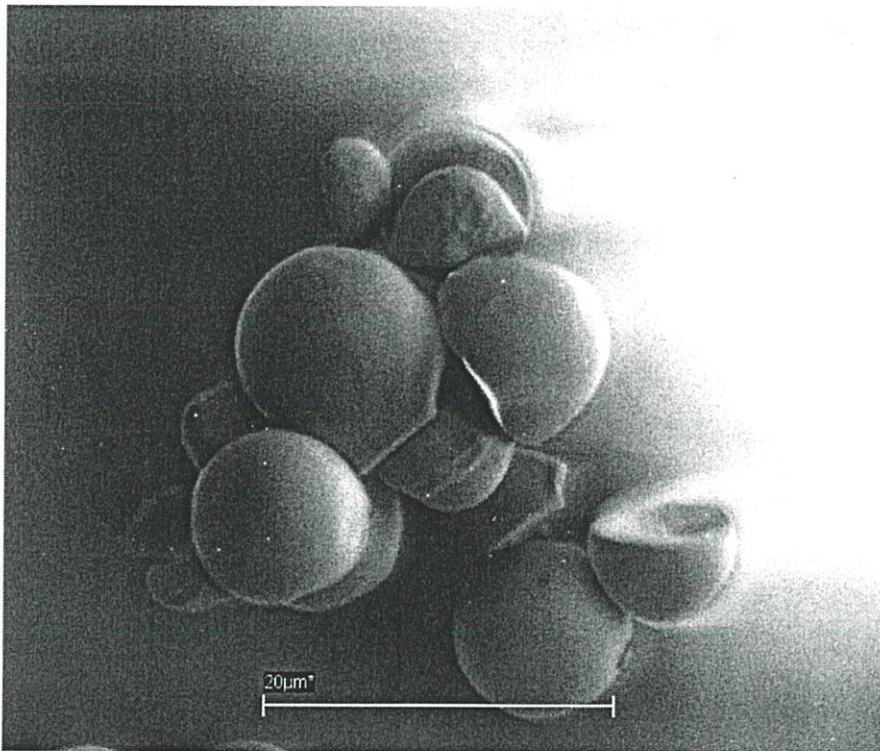
รูปที่ก.2 แสดงรูปร่างของเม็ดแป้งสาลีที่ใช้ในการทดลอง

แป้งท้าวยายม่อม : ตราสุขเจริญ ผลิตโดย บ.สุขเจริญ จำกัด

คุณสมบัติของแป้งท้าวยายม่อม [15, 18]

ขนาดของเม็ดแป้ง	13-70 ไมครอน
การละลาย	28%
กำลังการพองตัว	54
ความชื้น	12.6%
pH	6.2

วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 5000 เท่า ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ก.3 แสดงรูปร่างของเม็ดแป้งท้าวยายม่อมที่ใช้ในการทดลอง

ก.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแป้งข้าวเจ้าและแป้งสาลี

ตารางที่ ก.1 แสดงคุณลักษณะอื่นๆที่ต้องการของแป้งข้าวเจ้า [40]

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	13.0
2	แป้ง ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่น้อยกว่า	85.0
3	ความเป็นกรด - ด่าง	5.0 ถึง 7.0
4	เถ้า ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่เกิน	0.50
5	เถ้าที่ไม่ละลายในกรด ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่เกิน	0.030
6	อะมิโลส ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ไม่น้อยกว่า	15.0

ตารางที่ ก.2 แสดงคุณลักษณะอื่นๆที่ต้องการของแป้งสาลีชนิดเอนกประสงค์ [41]

ลำดับที่	คุณลักษณะที่ต้องการ	คะแนนเต็ม	คุณสมบัติที่ตรวจ	คะแนนที่ได้
1	การขึ้นฟู (baking quality) คิดเป็นปริมาตรจำเพาะ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม			
	1.1 เมื่อใช้ทดสอบทำขนมปัง	35	ไม่น้อยกว่า 4.5 4.3 ถึง 4.4 4.0 ถึง 4.2 น้อยกว่า 4.0	35 30 25 0
	1.2 เมื่อใช้ทดสอบทำเค้ก	35	ไม่น้อยกว่า 2.7 และไม่มีโพรงอากาศ 2.2 ถึง 2.6 และ/หรือมีโพรงอากาศไม่เกิน 6 โพรง 2.2 ถึง 2.6 และ/หรือมีโพรง อากาศเกินกว่า 6 โพรง น้อยกว่า 2.2	35 30 25 0

ลำดับ ที่	คุณลักษณะที่ต้องการ	คะแนน เต็ม	คุณสมบัติที่ตรวจ	คะแนน ที่ได้
2	โปรตีน ร้อยละ (สำหรับแป้งที่มีความชื้น ร้อยละ 14)	10	ไม่น้อยกว่า 11.0 10.0 ถึง 10.9 9.0 ถึง 9.9 น้อยกว่า 9.0	10 6 3 0
3	การดูดซึมน้ำ (farinograph water absorption) ร้อยละ	5	ไม่น้อยกว่า 60.0 59.1 ถึง 59.9 57.0 ถึง 59.0 น้อยกว่า 57.0	5 3 2 0
4	เวลาที่ใช้ในการผสม (peak mix time) นาที	5	ไม่น้อยกว่า 5 ไม่น้อยกว่า 4 ไม่น้อยกว่า 3.5 น้อยกว่า 3.5	5 3 2 0
5	ปฏิกิริยาของเอนไซม์ไดแอส เตส (diastatic activity) B.U.	5	550 ถึง 650 มากกว่า 650 แต่ ไม่เกิน 700 หรือน้อยกว่า 550 แต่ไม่น้อยกว่า 500 น้อยกว่า 500 หรือ มากกว่า 700	5 3 0
6	เถ้า ร้อยละ (สำหรับแป้งที่มีความชื้น ร้อยละ 14)	5	ไม่เกิน 0.44 0.45 ถึง 0.46 0.47 ถึง 0.52 มากกว่า 0.52	5 3 2 0

ก.3 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง [9]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกติน) นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง แป้งออกเป็น

1. Particulate material คือส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง

2. Surface material คือส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง สามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาสต์

3. Internal components คือส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสเฟต ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

(1) ไขมัน

โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1% ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความเหนียวของแป้ง ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งจะต้องกำจัดไขมันออกจากแป้งโดยสกัดด้วยตัวทำละลายหรือย่อยสลายโดยใช้น้ำย่อย

ไขมันภายในแป้งมีทั้งที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งประกอบด้วย Triglyceride, free fatty acid, glucolipids, phospholipids และไขมันที่อยู่กระจายทั่วไปภายในเม็ดแป้ง โดยเชื่อมพันธะกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวมๆ แป้งจากพืชหัวและจากถั่วไม่มีไขมันภายในเม็ดแป้ง สำหรับแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มีไขมันภายในเม็ดแป้งซึ่งสมบัติและปริมาณของไขมันแตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดมีไขมัน 0.6 ถึง 0.8% ประกอบด้วย free fatty acid 62% และ lysophospholipids 38% สำหรับแป้งสาลีมีไขมัน 0.8 ถึง 1.2% น้ำหนักแห้ง ประกอบด้วย monoacyl/lysophospholipids 86 ถึง 94% กรดไขมันที่สำคัญของ lysophospholipid คือกรดไขมันอิ่มตัวคาร์บอน 16 อะตอม (palmitic acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวคาร์บอน 18 อะตอม (linoleic acid) monoacyl lipid เหล่านี้สามารถจับตัวเชิงซ้อนกับอะมิโลสได้ ในขณะที่ diacyl และ triacyl lipid ไม่สามารถจับตัวเช่นนี้ได้ ความสัมพันธ์ของปริมาณอะมิโลสกับปริมาณไขมันในข้าวโพดชนิดต่างๆ พบว่า ข้าวโพด ข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิโลสต่ำ จะมีไขมันต่ำ สำหรับข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีไขมันสูงกว่าปกติเช่นกัน

ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้ง โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง เมื่อเกิดฟิล์มและแป้งเปียก (paste) ไขมันจะรวมตัวกับอะมิโลสเกิดเป็น inert complex ทำให้ฟิล์มและแป้งเปียกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่สำหรับไขมันที่รวมตัวเชิงซ้อนกับอะมิโลสจะไม่ก่อให้เกิดกลิ่น เนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี มีกลิ่นแรงกว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบของไขมันสูง

(2) ไนโตรเจน (โปรตีน)

ภายในแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1% โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลาติไนซ์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิด maillard reaction ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไป (โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเช่นนี้เกิดขึ้นกับแป้งธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง)

(3) เถ้า

แป้งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โฟสเฟต เขี้ยว แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ ปริมาณเถ้าในแป้งมันฝรั่งจะสัมพันธ์กับหมู่ฟอสฟอรัสในแป้ง สำหรับเถ้าในแป้งจากธัญพืชจะสัมพันธ์กับปริมาณฟอสโฟลิปิด

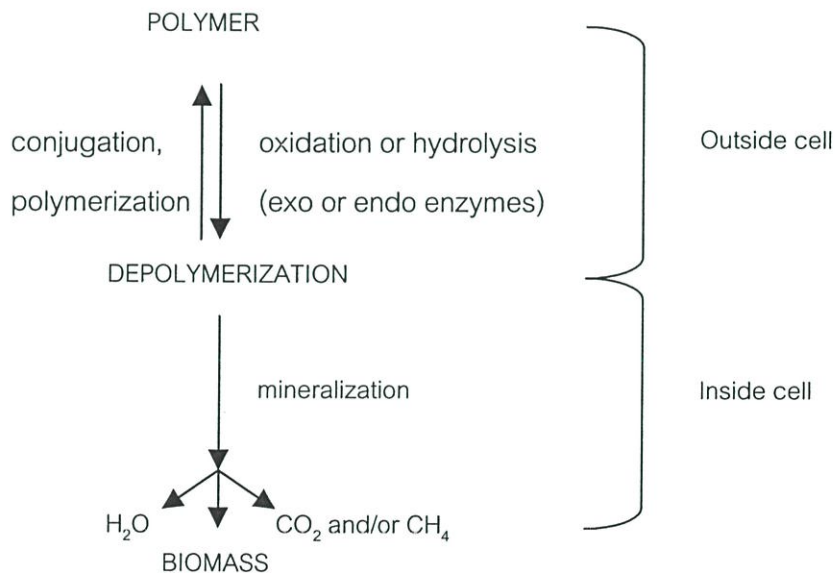
(4) ฟอสฟอรัส

แป้งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า 0.1% โดยแป้งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสในรูป phospholipid ประมาณ 0.02 ถึง 0.06% และสำหรับแป้งจากธัญพืชหัวและราก เช่น แป้งจากมันฝรั่งมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสประมาณ 0.3 ถึง 0.4% ฟอสฟอรัสภายในแป้งอยู่ในรูปฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ C₃ และ C₆ ของหน่วยกลูโคส แป้งมันฝรั่งมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสจึงทำให้มีประจุพื้นผิวเป็นลบ แรงผลักระหว่างประจุลบจะทำให้แป้งมันฝรั่งมีคุณสมบัติพองตัวง่าย และมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ [9]

การย่อยสลายเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายทำให้สายโมเลกุลแตกออก เรียกว่าขั้น depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและคุณสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบ endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP ก๊าซต่างๆ (เช่น CO_2 , CH_4 , N_2) น้ำ เกลือต่างๆ และไบโอแมส ปฏิกริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์ และสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น อุณหภูมิ ฯลฯ



รูปที่ข.1 แสดงภาพขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลาย [42]

ภาคผนวก ค

การเกิดของดิน [43]

ดิน เกิดจากการสลายตัวของหินชนิดต่างๆ ออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย โดยขบวนการหรือวิธีการทางเคมีและกายภาพ กล่าวคือ เมื่อก้อนหินนั้นไหลออกมาพบกับอากาศ (ซึ่งความจริงในธรรมชาติ นั้น อาจจะได้ไม่ได้ไหลออกมาเอง แต่ออกมาให้เราเห็นเนื่องจากการพังทลายของดินชั้นบนไปก่อน โดยน้ำ มนุษย์ทำการถากถางไปก็ได้ หรือจะโดยที่มีการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกเช่นภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินไหวก็ได้) และถูกกับแก๊สออกซิเจน น้ำ กรด อันเกิดจากการเผาไหม้เช่นกรดคาร์บอนิก กรดกำมะถัน หรือต่าง แล้วธาตุในหินเหล่านั้น จะทำปฏิกิริยากับสิ่งดังกล่าวนี้ทำให้หินก้อนใหญ่ๆ แตกหรือสลายตัวกระจายออกเป็นก้อนเล็กก้อนน้อยขนาดต่างๆ กับบางอย่าง ก็ยังมองเห็นซากเดิมอยู่ บางอย่างก็เปลี่ยนแปลงจากเดิมไปเช่น ตามภูเขาบางแห่งจะพบหินที่กำลังสลายตัว เมื่อเอามือจับแล้วบีบหินเหล่านั้นจะแตกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดดิน

ในขั้นต่อไปนั้น เศษหินชิ้นเล็กชิ้นน้อยเหล่านี้จะถูกน้ำ ลม และอุณหภูมิที่แตกต่างกันของกลางวันและกลางคืน หรือตามฤดูกาล ทำให้เศษหินแตกออกเป็นอนุภาค หรือชิ้นเล็กลงไปอีก ซึ่งขนาดของแต่ละอนุภาคนั้นขึ้นกับชนิดของหินที่สลายตัว กล่าวคือหินบางอย่างสลายตัวให้ดินเหนียวหรือมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 2 ไมครอน (1 ไมครอนเท่ากับเศษหนึ่งส่วนพันมิลลิเมตร) มากกว่าขนาดอื่น เราเรียกมันให้ดินเหนียว หินบางชนิดสลายตัวให้ดินร่วนปนทราย คือมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 2 ไมครอนบ้างขนาด 2-50 ไมครอนบ้าง และขนาด 50 ไมครอนถึง 2 มิลลิเมตร ในปริมาณที่พอๆ กัน และหินบางชนิดสลายตัวให้อนุภาคขนาด 50 ไมครอนขึ้นไปมากกว่าขนาดอื่น ดินพวกนี้มักหยาบหรือที่เราเรียกว่าดินทรายนั่นเอง อนุภาคเหล่านี้จะถูกลม หรือน้ำพัดพาไปทับถมปะปนคลุกเคล้ากับอินทรีย์วัตถุอันเกิดจากซากพืชสัตว์ รวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเล็กก้อนน้อย เม็ดดินก้อนเล็กก้อนน้อยรวมตัวเชื่อมต่อกันเป็นแผ่นใหญ่ ดังที่เราเห็นหรืออยู่อาศัยกันทุกวันนี้

การเกาะหรือรวมตัวเชื่อมต่อกันจนเป็นก้อนเป็นผืนดินแผ่นใหญ่ของอนุภาคที่เกิดจากการสลายตัวของหิน ซึ่งต่อไปเราจะเรียกว่า อนุภาคของดินนั้น มันจะเกาะกันเป็นก้อนที่มีรูปร่างต่างๆ กัน เมื่อเราหักหรือทุบให้มันแตกจากก้อนใหญ่ และถ้ามองไปที่ก้อนดินจะพบว่า การเรียงตัวหรือจัดวางตัวของอนุภาคของดินที่เกิดจากหินแต่ละชนิดจะไม่คล้ายเหมือนกัน ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินแตกต่างกัน คือมีมากบ้าง น้อยบ้าง บางชนิดช่องว่างเหล่านั้นต่อกัน เป็นรูขนาดและแบบต่างๆ กันออกไป ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่ตามขอบรอบๆ อนุภาคของดิน ความชื้น อุณหภูมิ และขนาดของอนุภาคของดิน

ภาคผนวก ง

ง.1 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ก่อนการฝังกลบ

ตารางที่ ง.1 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการฝังกลบ

ชนิดของพอลิเมอร์	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	ค่ามอดุลัส (Mpa)
HDPE	25.73	576.10	227.82
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 10%	18.02	40.84	226.29
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 20%	14.64	38.05	258.48
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%	11.48	38.56	266.16
HDPE + แบริ่งสาธิต 10%	17.17	33.84	230.57
HDPE + แบริ่งสาธิต 20%	14.83	32.06	279.67
HDPE + แบริ่งสาธิต 30%	11.39	30.03	289.67
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 10%	16.02	26.08	254.02
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 20%	13.66	25.39	281.08
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 30%	10.81	25.01	309.28

หลังการฝังกลบ 1 เดือน

ตารางที่ ง.2 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังการฝังกลบ 1 เดือน

ชนิดของพอลิเมอร์	ค่าความทนแรงดึง (MPa)		ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด		ค่ามอดุลัส (Mpa)	
	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺
HDPE	25.58	25.51	501.53	495.50	238.03	243.85
HDPE + แป้งข้าวเจ้า 10%	17.70		38.42		252.02	
HDPE + แป้งข้าวเจ้า 20%	14.54		33.66		262.6	
HDPE + แป้งข้าวเจ้า 30%	11.30	11.21	24.47	24.49	297.72	301.87
HDPE + แป้งสาลี 10%	17.10		37.38		243.91	
HDPE + แป้งสาลี 20%	14.12		29.34		286.53	
HDPE + แป้งสาลี 30%	11.19	11.02	22.61	22.61	305.37	317.84
HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 10%	15.98		36.72		260.28	
HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 20%	13.55		28.31		296.02	
HDPE + แป้งท้าวยายม่อม 30%	10.66	10.54	22.22	23.78	304.07	298.70

N = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ Fe²⁺ = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

หลังการฝังกลบ 2 เดือน

ตารางที่ ง.3 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังการฝังกลบ 2 เดือน

ชนิดของพอลิเมอร์	ค่าความทนแรงดึง (MPa)		ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด		ค่ามอดุลัส (Mpa)	
	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺
HDPE	25.50	25.31	457.6	460.90	245.25	245.13
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 10%	17.69		36.42		258.98	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 20%	13.74		27.96		273.72	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%	10.63	10.98	22.51	22.29	308.45	309.06
HDPE + แบริ่งสาเลี 10%	16.84		34.84		275.09	
HDPE + แบริ่งสาเลี 20%	13.80		26.50		299.67	
HDPE + แบริ่งสาเลี 30%	10.97	10.87	18.16	20.28	326.78	341.45
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 10%	15.91		35.73		262.88	
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 20%	12.99		27.82		298.3	
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 30%	9.99	10.31	22.72	21.78	310.9	311.17

N = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ Fe²⁺ = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

หลังการฝังกลบ 3 เดือน

ตารางที่ ง.4 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังการฝังกลบ 3 เดือน

ชนิดของพอลิเมอร์	ค่าความทนแรงดึง (MPa)		ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด		ค่ามอดุลัส (Mpa)	
	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺
HDPE	25.25	24.81	394.20	340.23	263.03	258.85
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 10%	17.22		35.89		265.36	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 20%	13.03		24.00		282.67	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%	10.29	10.72	19.44	19.08	339.63	312.17
HDPE + แบริ่งสาเลี 10%	16.31		32.14		285.63	
HDPE + แบริ่งสาเลี 20%	13.50		20.67		310.4	
HDPE + แบริ่งสาเลี 30%	10.35	9.35	15.54	16.13	344.2	350.9
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 10%	15.23		33.90		276.3	
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 20%	12.88		24.85		301.64	
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 30%	9.87	9.74	21.78	19.4	326.95	335.08

N = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ Fe²⁺ = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

หลังการฝังกลบ 4 เดือน

ตารางที่ ง.5 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังการฝังกลบ 4 เดือน

ชนิดของพอลิเมอร์	ค่าความทนแรงดึง (MPa)		ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด		ค่ามอดุลัส (Mpa)	
	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺
HDPE	24.54	24.33	295.2	280.5	270.82	279.02
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 10%	16.81		32.57		279.13	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 20%	12.56		20.34		295.6	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%	9.81	9.99	17.08	16.96	348.15	345.15
HDPE + แบริ่งสาลี 10%	15.89		30.59		281.38	
HDPE + แบริ่งสาลี 20%	12.67		20.22		337.07	
HDPE + แบริ่งสาลี 30%	8.91	8.88	14.68	13.72	352.2	354.20
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 10%	14.99		33.25		290.73	
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 20%	11.98		23.31		324.02	
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 30%	9.20	9.11	18.44	17.21	337.28	340.28

N = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ Fe²⁺ = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

ง.2 ข้อมูลสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ก่อนการฝังกลบ

ตารางที่ ง.6 แสดงข้อมูลสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการฝังกลบ

ชนิดของพอลิเมอร์	T_m (C°)	T_c (C°)	ΔH_m
HDPE	134.6	119.9	166.77
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 10%	133.8	119.4	139.22
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 20%	133.6	119.2	125.45
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%	133.6	119.2	108.15
HDPE + แบริ่งสาลี 10%	133.8	119.4	143.33
HDPE + แบริ่งสาลี 20%	133.7	119.2	131.02
HDPE + แบริ่งสาลี 30%	133.5	119.1	125.74
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 10%	133.9	119.5	157.10
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 20%	133.7	119.3	130.72
HDPE + แบริ่งทำวยายม่อม 30%	133.6	119.2	125.74

หลังการฝังกลบ 4 เดือน

ตารางที่ ง.7 แสดงข้อมูลสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังการฝังกลบ 4 เดือน

ชนิดของพอลิเมอร์	T_m (C°)		T_c (C°)		ΔH_m	
	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺	N	Fe ²⁺
HDPE	134.7	134.8	119.8	116.7	168.24	172.93
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 10%	134.0		119.2		139.81	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 20%	134.3		119.0		128.96	
HDPE + แบริ่งข้าวเจ้า 30%	134.5	134.7	118.9	118.7	119.88	120.17
HDPE + แบริ่งสาลี 10%	134.0		119.2		146.55	
HDPE + แบริ่งสาลี 20%	134.3		118.8		149.48	
HDPE + แบริ่งสาลี 30%	134.7	134.9	118.8	118.5	146.55	152.41
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 10%	134.1		119.2		157.39	
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 20%	134.2		119.2		296.02	
HDPE + แบริ่งท้าวยายม่อม 30%	134.4	134.5	119.0	118.8	304.07	131.89

N = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินธรรมชาติ Fe²⁺ = พอลิเมอร์ที่ฝังกลบในดินที่เติมเหล็ก

ประวัติผู้เขียน

นาย วรวิทย์ โพนนิกร เป็นบุตรคนที่ 2 ของ พันเอก เอนก โพนนิกร กับนาง ศรีสมหมาย โพนนิกร เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม จาก โรงเรียนโยธินบูรณะ ปีการศึกษา 2533 – 2538 ระดับปริญญาตรี (วท.บ.เคมี) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันราชภัฏสวนดุสิต ปีการศึกษา 2539 – 2542 ปัจจุบัน ระดับปริญญาโท (วท.ม.เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2543 – 2545