การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/แป้ง/แป้งดัดแปร

นางสาวชาริณี วิโนทพรรษ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-17-4637-7
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF POLYPROPYLENE/STARCHES/MODIFIED STARCHES BLENDS

Miss Charinee Winotapun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4637-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/แป้ง/แป้งดัดแปร
โดย	นางสาวชาริณี วิโนทพรรษ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวชาริณี วิโนทพรรษ์ : การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/แป้ง/แป้งดัดแปร.
(PREPARATION OF POLYPROPYLENE/STARCHES/MODIFIED STARCHES BLENDS)
อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์, 151 หน้า. ISBN 917-17-4637-7.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิโพรพิลีน แป้งและแป้งดัดแปร ซึ่งแป้งดัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งและมาเลอิกแอนไฮดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรคือ 50 องศาเซลเซียส โดยการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นเวลา 30 นาที ในขณะที่การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิโพรพิลีน แป้งไม่ดัดแปร และแป้งดัดแปรมาผสมกัน แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งเป็น 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งดัดแปรเป็น 5 10 15 และ 20 phr จากการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ซึ่งได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง ด้านแรงดัดโค้ง และด้านแรงกระแทก พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแป้งดัดแปร สามารถดูดความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยไม่เติมแป้งดัดแปร แม้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว แต่พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวสามารถดูดซึมความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ผลการทดลองทั้งหมดบ่งชี้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนกับแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 90:10 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 10 phr กับที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนกับแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 90:10 และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร 10 phr มีสมบัติโดยรวมดีกว่าพอลิเมอร์ที่เตรียมจากสูตรอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต....ชาริณี....วิโนทพรรษ์.....
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา....วิมลวรรณ....พิมพ์พันธุ์.....
ปีการศึกษา 2548

4772275923 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD: MODIFICATION / POLYMER BLEND / GLUTINOUS STARCH / CASSAVA STARCH / PP

CHARINEE WINOTAPUN : PREPARATION OF POLYPROPYLENE/STARCHES/ MODIFIED STARCHES BLENDS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. VIMOLVAN PIMPAN, Ph.D., 151 pp. ISBN 974-17-4637 -7.

Polymer blends between polypropylene (PP) starches and modified starches were prepared in this research. Modified starches were prepared from the reaction between the starch and maleic anhydride using sodium hydroxide as a catalyst and water as a solvent at 50°C. While glutinous starch was modified by 35% by mole for 30 minutes, cassava starch was modified by 25% by mole for 2 hours. PP, unmodified and modified starches were then mixed and compressed to from polymer blend sheets at 180°C for 5 minutes. The amounts of unmodified starch starch were varied from 10, 20, 30, 40 and 50% w/w. The amounts of modified starches were varied from 5, 10, 15 and 20 phr. From mechanical tests including tensile, flexural and impact properties, it was found that PP/starch/modified starch blends exhibited higher %moisture absorption and better biodegradability than those of all starch/PP blends prepared without modified starch. While cassava starch blends exhibited better mechanical properties than glutinous starch blends, the latter showed better moisture absorption and biodegradability than the former. The results suggested that polymer blends prepared from PP and cassava starch at weight ratio of 90:10 and modified cassava starch 10 phr and from PP and glutinous starch at weight ratio of 90:10 and modified glutinous starch 10 phr exhibited better overall properties than those prepared with other compositions.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Materials Science Student's signature Charinee Winotapun
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature Vimolvan Pimpan
Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เป็นเพราะความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัตถุดิบ สถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ และได้รับคำแนะนำด้านวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ไพพรรณ สันติสุข รศ.อรอุษา สรวารี และ รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องบดบอลล์มิลล์ชนิดความเร็วสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยวา จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งข้าวเหนียวที่ใช้ในงานวิจัย ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการขึ้นรูป ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ญ
สารบัญรูป.....ฏ

บทที่

1. บทนำ.....1

2. วารสารปริทัศน์.....3
    2.1 พอลิเมอร์ผสม.....3
        2.1.1 กลไกของการเข้ากันได้.....4
        2.1.2 วิธีทำให้เข้ากันได้.....4
            2.1.2.1 ความเข้ากันทางอุณหภูมิอุณหพลศาสตร์.....5
            2.1.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์.....7
            2.1.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา...8
            2.1.2.4 การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างการผสม.....8
        2.1.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....9
        2.1.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม.....10
    2.2 พอลิโพรพิลีน.....12
        2.2.1 พอลิเมอไรเซชัน.....12
        2.2.2 สมบัติของพอลิโพรพิลีน.....13
        2.2.3 การใช้งานของพอลิโพรพิลีน.....13
    2.3 แป้ง.....14
        2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง.....14
        2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....14
        2.3.3 สมบัติของแป้ง.....17

บทที่ หน้า

2.3.4 การดัดแปรแป้ง……17
2.3.5 ประเภทของแป้งดัดแปร……18
2.4 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ……20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……22
3. วิธีการทดลอง……28
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง……28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง……28
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์……29
3.4 ขั้นตอนการทดลอง……30
3.4.1 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง……31
3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของแป้งข้าวเหนียว……32
3.4.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม……33
3.4.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ……35
3.4.4.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง……35
3.4.4.2 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง……36
3.4.4.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก……37
3.4.4.4 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา……39
3.4.4.5 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค
เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิส
(Thermogravimetric analysis, TGA)……40
3.4.4.6 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค
ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี
(Differential scanning calorimetry, DSC)……41
3.4.4.7 การทดสอบความทนทานต่อสารเคมี……42
3.4.4.8 การทดสอบการดูดซึมความชื้น……42
3.4.4.9 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ……43

บทที่ หน้า

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง……44

4.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรและไม่ดัดแปร……..……..44

4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล……..…….47

4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง……..……47

4.2.2 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง……53

4.2.3 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก……..58

4.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม……..60

4.4 สมบัติทางความร้อน……66

4.4.1 เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส

(Thermogravimetric analysis, TGA)……..66

4.4.2 ดิฟเฟอเรนเชียสแกนนิงแคลอริมิเตอร์

(Differential scanning calorimeter, DSC)……70

4.5 ความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสม……80

4.6 การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสม……..83

4.7 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม……85

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ……..87

5.1 สรุปผลการทดลอง……87

5.2 ข้อเสนอแนะ……..88

รายการอ้างอิง……..……...89

ภาคผนวก……92

ภาคผนวก ก……..92

ภาคผนวก ข……....127

ภาคผนวก ค……133

ภาคผนวก ง……..140

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์……..…….151

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด.....16

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่ศึกษาของแป้ง พอลิโพรพิลีน และแป้งดัดแปร.....33

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน (PP) แป้งมันสำปะหลัง (CSV) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (MCSV).....67

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (PP/CSV/MCSV).....67

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน (PP) แป้งข้าวเหนียว (GTN) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (MGTN).....68

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (PP/GTN/MGTN).....69

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร.....70

ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และแป้งมันสำปะหลัง ทั้งที่เติมและไม่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร.....72

ตารางที่ 4.7 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว โดยไม่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....75

ตารางที่ 4.8 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และแป้งข้าวเหนียว ทั้งที่เติมและไม่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....77

ตารางที่ 4.9 ดัชนีความเป็นขั้วของตัวทำละลายที่ใช้ในการทดสอบ.....80

ตารางที่ 4.10 ความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ที่อุณหภูมิห้อง และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....80

ตารางที่ 4.11 ความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งมันข้าวเหนียวดัดแปร ที่อุณหภูมิห้อง และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....81

สารบัญรูป

รูปประกอบ หน้า
รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน.....3
รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง LCST.....6
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง UCST.....6
รูปที่ 2.4 บล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างเฟส A และ B.....7
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม.....9
รูปที่ 2.6 ลักษณะต่างๆ ของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม.....10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส.....14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างอะไมโลเพกติน.....15
รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้ง.....19
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น
ตัวเร่งปฏิกิริยา.....27
รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง.....30
รูปที่ 3.2 ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการดัดแปรแป้ง.....31
รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Nicolet - Impact 400).....32
รูปที่ 3.4 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding, V508-18-CX).....34
รูปที่ 3.5 เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine model LR 100K.....35
รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 638 (type IV).....35
รูปที่ 3.7 เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine model 500.....36
รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790.....36
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (GT-7045MD).....37
รูปที่ 3.10 เครื่องบากชิ้นงาน.....37
รูปที่ 3.11 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 (type Izod).....38
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-6400).....39
รูปที่ 3.13 เครื่อง TGA รุ่น TGA/SDTA851.....40
รูปที่ 3.14 เครื่อง DSC รุ่น Diamond DSC.....41
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....44
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปร.....44
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....45

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปร.....45
รูปที่ 4.5 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน
แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....47
รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
พอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....48
รูปที่ 4.7 ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง
และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....48
รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งดัดแปร.....50
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน
แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....51
รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
พอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....51
รูปที่ 4.11 ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว
และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....52
รูปที่ 4.12 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง
และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....53
รูปที่ 4.13 ระยะดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง
และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....54
รูปที่ 4.14 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง
และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....54
รูปที่ 4.15 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว
และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....56
รูปที่ 4.16 ระยะดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว
และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....56
รูปที่ 4.17 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว
และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....57
รูปที่ 4.18 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง
และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....58
รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว
และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....58

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.20 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิโพรพิลีน (PP) แป้งมันสำปะหลัง (CSV) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (MCSV) แป้งข้าวเหนียว (GTN) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (MGTN)……60
รูปที่ 4.21 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 90/10/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……61
รูปที่ 4.22 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/ MCSV สูตร 50/50/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……..62
รูปที่ 4.23 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 90/10/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร……...63
รูปที่ 4.24 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 50/50/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร……...64
รูปที่ 4.25 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……..71
รูปที่ 4.26 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……....71
รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……..73
รูปที่ 4.28 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……73
รูปที่ 4.29 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……..74
รูปที่ 4.30 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร……..74
รูปที่ 4.31 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว โดยไม่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปร……..76

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.32 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว โดยไม่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....76
รูปที่ 4.33 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....78
รูปที่ 4.34 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....78
รูปที่ 4.35 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....79
รูปที่ 4.36 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....79
รูปที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....83
รูปที่ 4.38 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....83
รูปที่ 4.39 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....85
รูปที่ 4.40 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ.....85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันบทบาทของพอลิเมอร์สังเคราะห์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์มีมากขึ้นเรื่อยๆ โดยสามารถพบเห็นในรูปของผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ ของใช้ในครัวเรือน เครื่องใช้สำหรับการเกษตรกรรม เฟอร์นิเจอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยมีการดัดแปรสมบัติต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน อย่างไรก็ดี ถึงแม้พอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นวัสดุที่มีความคงทนแข็งแรง ไม่เป็นสนิม มีน้ำหนักเบา สามารถแต่งเติมสีสันได้ และสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย แต่พอลิเมอร์ดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติภายในระยะเวลาอันสั้น ไม่ว่าเป็นการย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation) หรือเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) จึงเกิดการสะสมของขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ และมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งถ้านำขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์นี้ไปทำลายโดยการเผา จะได้แก๊สที่เป็นพิษและมีความร้อนสูง หากนำไปทิ้งในมหาสมุทรก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล ดังนั้น หากกำจัดไม่ถูกวิธีจะเกิดเป็นปัญหาที่สำคัญของสิ่งแวดล้อม แนวทางหนึ่งในการพัฒนาและลดปริมาณขยะเหล่านี้ คือ การผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยนำเอาพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้แทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์ธรรมชาติมักมีความแข็งแรงต่ำและไม่ทนต่อความชื้น จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมมากที่สุด คือ แป้งเนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถนำมาขึ้นรูปในแม่แบบได้

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เองในธรรมชาติด้วยจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งแป้งนั้นผลิตจากธัญพืชที่มีอยู่ในธรรมชาติ และมีหลากหลายชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) แป้งข้าวเหนียว (glutinous starch) แป้งข้าวโพด (corn starch) แป้งข้าวเจ้า (rice starch) และแป้งสาลี (wheat starch) เป็นต้น ซึ่งในโครงสร้างของแป้งนั้นจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง โดยแป้งแต่ละชนิดมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย

อย่างไรก็ตาม จากการที่แป้งมีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จึงทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งทำให้เกิดการเข้ากันได้ยากเมื่อผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่งผลให้เกิดปัญหา ความไม่เข้ากัน (incompatibility) ของ

ส่วนผสมทั้งสอง วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพิ่มความเข้ากันได้ดีระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ คือ การดัดแปรโครงสร้างของแป้งให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ เป็นการเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการนำแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวมาดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารดัดแปรในตัวทำละลายที่เป็นน้ำและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ได้มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังกับพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวกับพอลิโพรพิลีน ตามลำดับ เพื่อให้ได้เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะบหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

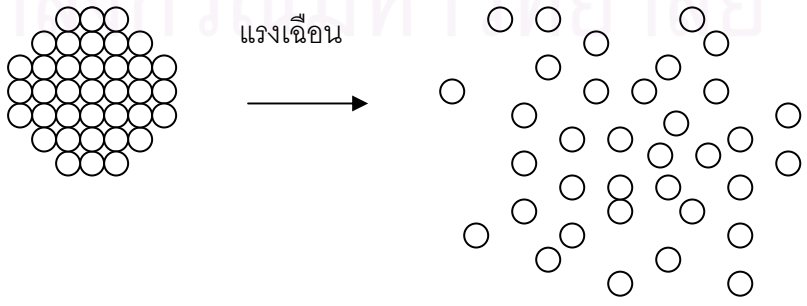
2.1 **พอลิเมอร์ผสม** [1]

พอลิเมอร์ผสม คือ การนำพอลิเมอร์ต่างชนิดกันมาผสมกันเพื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งช่วยในการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น และที่สำคัญเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต แต่การที่จะนำพอลิเมอร์มาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้นนั้นจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย อาทิ โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด รวมทั้งความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ หากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันไม่สามารถเข้ากันได้ดี จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ต่ำลงด้วย

การผสมกันของพอลิเมอร์มี 2 ลักษณะ คือ

1. การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Reactive blending) ในวิธีการนี้ พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันต้องมีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตและพอลิเอไมด์ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีนออกไซด์ จะเห็นว่าพอลิเมอร์ทุกชนิดจะมีหมู่ฟังก์ชันสำหรับทำปฏิกิริยา

2. การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Non-reactive blending) การผสมวิธีนี้ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก โดยใช้เครื่องมือในการผสม เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) หรือ เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill) ซึ่งเครื่องมือประเภทนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสมแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเกิดการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การผสมมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน

2.1.1 **กลไกของการเข้ากันได้** (Compatibilization mechanisms) [2]

การนำพอลิเมอร์ต่างชนิดกันมาผสมกันเพื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการนั้น ส่วนใหญ่จะมีสมบัติต่ำลงโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเปราะ และไม่แข็งแรง เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของดิสเพอร์สเฟสกับเมทริกซ์ต่ำ และมีความเค้นสะสม (stress concentration) เกิดขึ้น ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์จึงนิยมใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม โดยทั้งสัณฐานวิทยาและแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสจะมีความสำคัญมากในการช่วยถ่ายโอนแรงในระหว่างการใช้งาน ซึ่งสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับภาวะที่ได้รับในระหว่างกระบวนการผสม เช่น เครื่องผสม อัตราการผสม อุณหภูมิของการผสม นอกจากนี้ ยังขึ้นกับสมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบในการผสม และแรงตึงผิวขององค์ประกอบในขณะหลอมเหลวอีกด้วย

2.1.2 **วิธีทำให้เข้ากันได้** (Method of compatibilization) [2]

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อให้พอลิเมอร์เข้ากันได้ และทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติตามความต้องการมีด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้จึงขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลักซึ่งจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้ คือ

1. ความเข้ากันทางอุณหภูมิพลศาสตร์
2. การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์
3. การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา
4. การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างการผสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2.1 **ความเข้ากันทางอุณหภูมิอุณหพลศาสตร์** (Thermodynamic miscibility) [2]

โดยหลักการจะขึ้นกับสมดุลระหว่างเอนทาลปี (enthalpy) และเอนโทรปี (entropy) ของการผสมที่มีต่อพลังงานอิสระของการผสม (free energy of mixing) โดยที่เอนโทรปีเป็นการวัดระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) หรือความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเมื่อมีการผสมเกิดขึ้น โดยการผสมจะทำให้เอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ ($S_2 > S_1$) สำหรับโมเลกุลใหญ่ๆ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้น การเข้ากันได้จึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสมจะแสดงไว้ในสมการที่ 2.1

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \qquad (2.1)$$

โดยที่ ΔG = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม

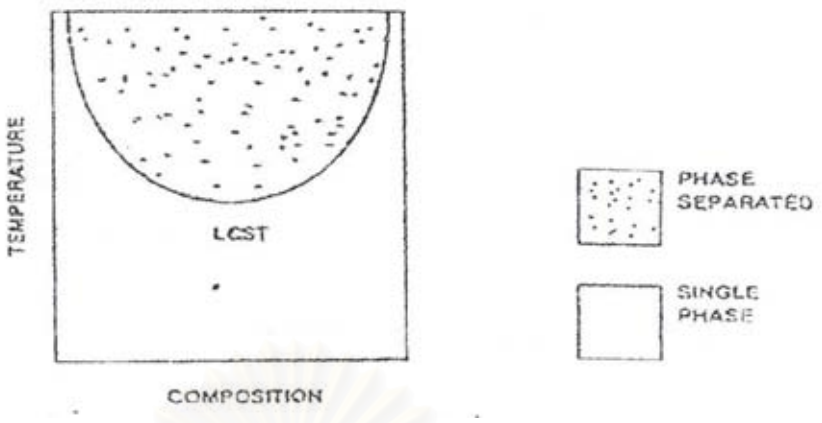
ΔH = การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม

ΔS = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T = อุณหภูมิ (K)

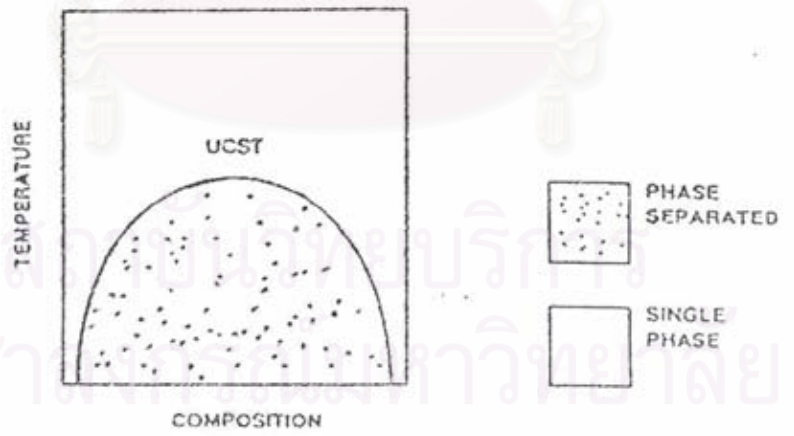
โดยการผสมที่สามารถเข้ากันได้นั้น ΔG ต้องมีค่าเป็นลบ หรือ $\Delta H - T\Delta S < 0$ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic mixture) คือ ภายในระบบจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน เช่น การที่โมเลกุล A กับโมเลกุล B ดึงดูดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน จากลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมีค่าเป็นลบ ($\Delta H < 0$) นั่นคือ การผสมสามารถเข้ากันได้ และเมื่อสร้างเป็นแผนภาพเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.2 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบมีผลทำให้ของผสมมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกเฟสขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลมีการสั่นเพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง และอุณหภูมิต่ำสุดที่พอลิเมอร์เริ่มเกิดการแยกเฟส เรียกว่า lower critical solution temperature (LCST)



รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง LCST [2]

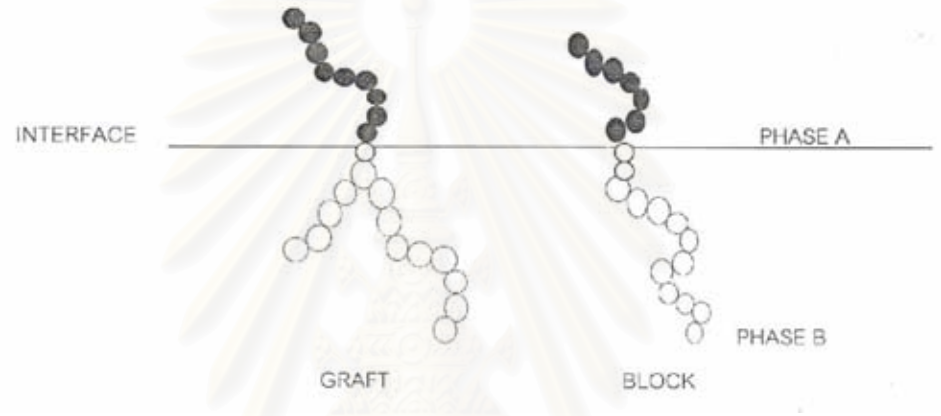
2. การผสมที่เป็นการปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic mixture) คือ ภายในระบบจะไม่มีแรงดึงดูดต่อกัน ซึ่งมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta H > 0$) ดังนั้น การผสมจะสามารถเข้ากันได้เมื่อ $T\Delta S$ มีค่ามากกว่า ΔH เพื่อให้ ΔG มีค่าเป็นลบ นั่นคือ การผสมที่เข้ากันได้จะเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง หรือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเฟส ที่เรียกว่า upper critical solution temperature (UCST)



รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง UCST [2]

2.1.2.2 **การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์** (Addition of block or graft copolymer) [2]

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะที่ประกอบด้วยบล็อกที่เหมือนกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่ง โคพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยพบว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์ต้องยาวพอที่จะจับกับพอลิเมอร์ที่ผสม แต่ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงเกินไป เพราะจะแพร่ไปที่ผิวระหว่างเฟสได้ช้ากว่าโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งกลไกของการเป็นสารช่วยผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 บล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างเฟส A และ B

โครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสมอย่างมาก จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสมโดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไดบล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไดบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกสั้นสลับยาวจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

การผสมพอลิเมอร์ที่สามารถเข้ากันได้ บ่อยครั้งขึ้นกับความสามารถของสารช่วยผสม ซึ่งโดยทั่วแล้วสารช่วยผสมจะมีหน้าที่ดังต่อไปนี้ คือ

1. ลดแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสในภาวะหลอมเหลว ทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์

2. ช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงระหว่างเฟส

3. เพิ่มความคงขนาดของดิสเพอร์สเฟสภายใต้ภาวะของการอบเหนียว (annealing)

2.1.2.3 **การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา** (Addition of functional/reactive polymer) [2]

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม อาจได้จากการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไอออนิกกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ ซึ่งการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านเครื่องอัดรีด เช่น การกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่ตรงของพอลิโอเลฟินส์ โดยหมู่แอนไฮไดร์ดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทำให้พอลิโอเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมในทางการค้า และมีราคาไม่แพงมากนัก

2.1.2.4 **การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างการผสม** (In-situ grafting copolymerization) [2]

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากัน โดยแตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์

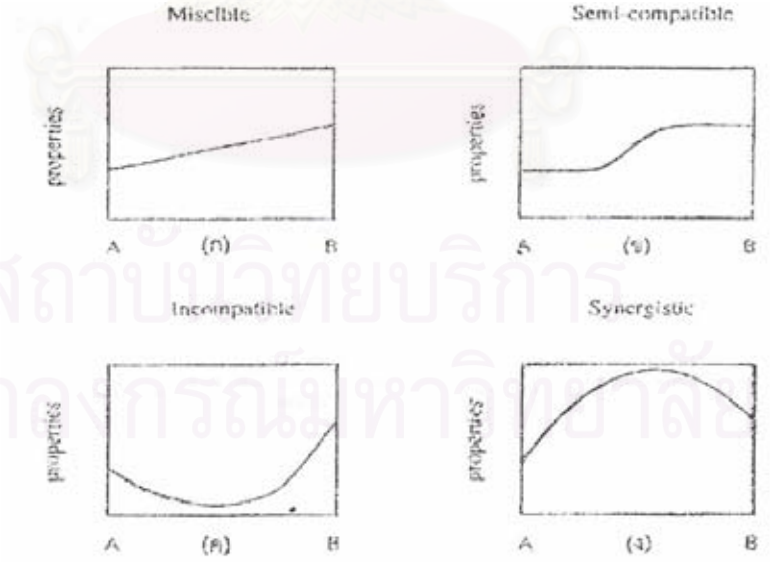
กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจมีได้ ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมสารริเริ่มในระหว่างการผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดกับพอลิเมอร์แบบควบแน่น
3. เกิดการขาดหรือรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อที่จะสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่มีความเค้นเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.3 **สมบัติของพอลิเมอร์ผสม** (Properties of polymer blends) [2]

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับอัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบ รวมทั้งสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ ลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละองค์ประกอบ (ลักษณะคล้ายแก้ว หรือยาง หรือพอลิเมอร์กึ่งผลึก) สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผสม และการจัดเรียงโมเลกุล

การผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์จะแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาเพียงเฟสเดียว ซึ่งเป็นการง่ายที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.5



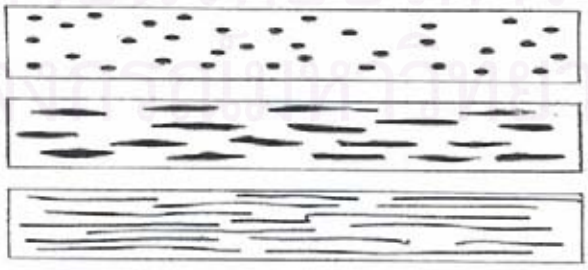
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม [2]

จากรูปที่ 2.5 ในระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนการผสมกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) แต่ในการผสมส่วนใหญ่จะไม่ต้องการความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ โดยให้มีความเข้ากันได้บางส่วน (semi-compatible) กล่าวคือ อนุภาคของดิสเพอร์สเฟสที่ขนาดเล็กจะกระจายอยู่ในเมทริกซ์โดยในระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และเมื่อนำไปพล็อตกราฟระหว่างสมบัติและอัตราส่วนการผสมจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) โดยพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลัก และควบคุมสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน ส่วนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกราฟจะมีสาเหตุมาจากการกลับเฟสของผสม

ในระบบที่มีความเข้ากันน้อยมากหรือไม่เข้ากันจะมีการแยกเฟสเกิดขึ้น โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายอยู่ในเฟสหลัก และระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ หรือไม่มีเลย จากลักษณะดังกล่าวสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ไม่นิยมนำไปใช้งานและจะได้กราฟระหว่างอัตราส่วนการผสมและสมบัติเป็นรูปตัวยู ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ค) ส่วนระบบสุดท้ายจะพบเห็นได้น้อย โดยการผสมจะปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่าระบบอื่นๆ กล่าวคือ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมากกว่า หรือเท่ากับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ง)

2.1.4 **สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม** (Morphology of polymer blends) [2]

การจัดเรียงตัวหรือสัณฐานวิทยาของแต่ละเฟสในพอลิเมอร์ผสมจะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สัณฐานวิทยาอาจมีลักษณะของดิสเพอร์สเฟสกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แผ่น หรือเส้นใย ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะต่างๆ ของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม [2]

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม จะขึ้นกับอัตราส่วนของการผสม อัตราส่วนของความหนืดในแต่ละองค์ประกอบ แรงตึงผิว และภาวะของการผสม โดยองค์ประกอบที่มีเป็นจำนวนมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเมทริกซ์หรือเป็นเฟสหลัก โดยขนาดของดิสเพอร์สเฟสจะถูกควบคุมจากการแตกตัวเป็นหยดของดิสเพอร์สเฟส (drop breakup) และการรวมกลุ่ม (coalescence) ของดิสเพอร์สเฟส โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นกับชนิดของเครื่องผสม แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส ลักษณะการไหลของแต่ละองค์ประกอบ นอกจากนี้ รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสยังสามารถควบคุมได้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสอาจถูกเปลี่ยนแปลงจากทรงกลมเป็นเส้นใยจากการไหลแบบยืดดึงที่บริเวณหัวดาย หรือจากทรงกลมเป็นแผ่นจากการยืดดึง 2 ทิศทาง ในกระบวนการเป่า เป็นต้น

ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด เข้าด้วยกันนั้น ส่วนใหญ่แล้วพอลิเมอร์ดังกล่าวมักไม่เข้ากัน โดยจะแยกเป็น 2 เฟส ตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะขึ้นกับอัตราส่วนการผสม สมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบ และภาวะในการผสม กล่าวคือ เมื่อผสมดิสเพอร์สเฟสในอัตราส่วนน้อย ดิสเพอร์สเฟสจะกระจายอยู่ในเฟสหลัก โดยอาจมีรูปร่างเป็นทรงกลม เส้นใย หรือแผ่น ทั้งนี้ขึ้นกับภาวะของการขึ้นรูป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมขึ้น ดิสเพอร์สเฟส และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมต่อไป ดิสเพอร์สเฟสเกิดการกลับเฟส (phase inversion) เปลี่ยนเป็นเฟสหลัก โดยก่อนถึงจุดนี้ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะเกิดการกลับเฟสทั้ง 2 เฟส เรียกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ว่า co-continuous ตัวอย่างของการกลับเฟสนี้สามารถเห็นได้จากการสังเคราะห์ (high impact polystyrene, HIPS) โดยในช่วงแรกเฟสของยางจะเป็นเฟสหลัก แต่เมื่อสิ้นสุดการสังเคราะห์แล้วพอลิสไตรีนจะเป็นเฟสหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 **พอลิโพรพิลีน** [3]

พอลิโพรพิลีนเตรียมจากโพรพิลีนด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบโคออร์ดิเนชัน โดยมีตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีโครงสร้างเป็นไอโซแทกติก โดยตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตานี้ ทำให้พอลิโพรพิลีนกลายเป็นพลาสติกที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง

พอลิโพรพิลีนไม่สามารถเตรียมจากวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัลหรือแบบไอออนิกได้ เนื่องจากฟรีแรดิคัลสามารถดึงเอาไฮโดรเจนบนอัลฟาคาร์บอน (α-carbon) นี้ออก เกิดเป็นมอนอเมอร์แรดิคัลที่มีเสถียรภาพโดยเรโซแนนซ์ ดังนี้

$$R\cdot + H - \overset{\alpha}{C}H_2 - CH = CH_2 \longrightarrow RH + \dot{C}H_2 - CH = CH_2 \leftrightarrow CH_2 = CH - \dot{C}H_2$$

การเกิดมอนอเมอร์แรดิคัลที่มีเสถียรภาพนี้เป็นแรงผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาการย้ายลูกโซ่อย่างมากมายในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ประกอบกับมอนอเมอร์แรดิคัลไม่ว่องไวพอที่จะทำปฏิกิริยาโพรพาเกชันต่อไปได้ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจึงไม่อาจเกิดขึ้น

2.2.1 **พอลิเมอไรเซชัน**

โพรพิลีนมอนอเมอร์เตรียมได้จากการนำน้ำมันมาผ่านกระบวนการแตกสลายโมเลกุล โพรพิลีนเป็นแก๊สมีจุดเดือด -48 องศาเซลเซียส ปัจจุบันพอลิโพรพิลีนในทางการค้าเตรียมด้วยปฏิกิริยาโคออดิเนชันได้พอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างเป็นไอโซแทกติกสูงถึง 95-98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 สมบัติของพอลิโพรพิลีน

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบเส้นตรงโดยตลอด ปราศจากกิ่ง มีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมตัว 165 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์นี้ถือได้ว่าเป็นพลาสติกที่เบาที่สุด มีความหนาแน่นเพียง 0.905 กรัม/ซม^3 และเนื่องจากความเป็นผลึกสูงนี้เอง ทำให้พอลิเมอร์นี้มีสมบัติเชิงกลดีมาก เช่น เหนียว แข็งแกร่ง และมีแรงดึงสูง จุดหลอมเหลวก็สูงกว่าพอลิเอทิลีน ทำให้พอลิโพรพิลีนเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า วัตถุที่ทำจากพอลิโพรพิลีนยังคงรักษาความแข็งแกร่งและรูปทรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส

พอลิโพรพิลีนไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดๆ ทั้งสิ้น ณ อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายได้ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและคลอริเนเตดไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ชนิดนี้ทนกรดและเบสได้ดี รวมทั้งเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพของพอลิเมอร์นี้ต่อความร้อน แสง และสารออกซิไดส์ มีน้อยกว่าพอลิเอทิลีน เพราะโซ่ของพอลิโพรพิลีนที่มีไฮโดรเจนอะตอมเกิดพันธะกับคาร์บอนองศา 3 (3° tertiary carbon) ดังนั้นก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมแอนติออกซิแดนต์และอัลตราไวโอเลตสเตบิไลเซอร์

2.2.3 การใช้งานของพอลิโพรพิลีน

การใช้งานของพอลิโพรพิลีนจะแบ่งตามประเภทของการขึ้นรูป คือ

1. งานฉีด (Injection molding) ใช้ทำกล่องแบตเตอรี่ กันชนรถยนต์ ลังใส่ขวด กระถางต้นไม้ เครื่องใช้ทางการแพทย์ เช่น กระบอกฉีดยาที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ด้ามแปรงสีฟัน ฝาจุกพลาสติก
2. งานเป่า (Blow molding) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) แต่จะมีความทนทานสูงกว่า เช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า HDPE
3. งานเป่าถุง (Blown film) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แต่จะมีความทนทานต่ออุณหภูมิใช้งานได้สูงกว่า เช่น ถุงร้อน พลาสติกหุ้มซองบุหรี่ ฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน เช่น ซองบะหมี่สำเร็จรูป
4. งานสิ่งทอ (Textile) ใช้ผลิตเส้นใยกระสอบ เชือกฟาง เชือกประมง เป็นต้น

2.3 **แป้ง** [4,5]

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซกคาไรด์ (polysaccharide) มีอยู่ในพืชแทบทุกชนิด มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยของกลูโคส กระบวนการผลิตแป้งนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ หลักการทั่วไป คือ แยกเม็ดแป้งออกจากองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เส้นใย โปรตีน เกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์ด้วยการล้างน้ำ ทำการปั่นแยกและอบให้แห้ง ในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งแขวนลอยอยู่ในน้ำ เนื่องจากแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น

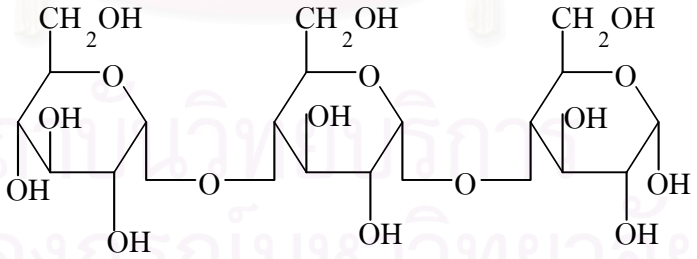
2.3.1 **องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง**

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage)

2.3.2 **โครงสร้างทางเคมีของแป้ง**

แป้งประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ

1. อะไมโลส (amylose) คือ ส่วนของกลูโคสที่มาต่อกันเป็นสายยาวไม่มีกิ่งก้านสาขา มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 2,000 ถึง 500,000 หน่วย ในโครงสร้างของอะไมโลสประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α - 1, 4 (α - 1,4 glycosidic) ดังรูปที่ 2.7



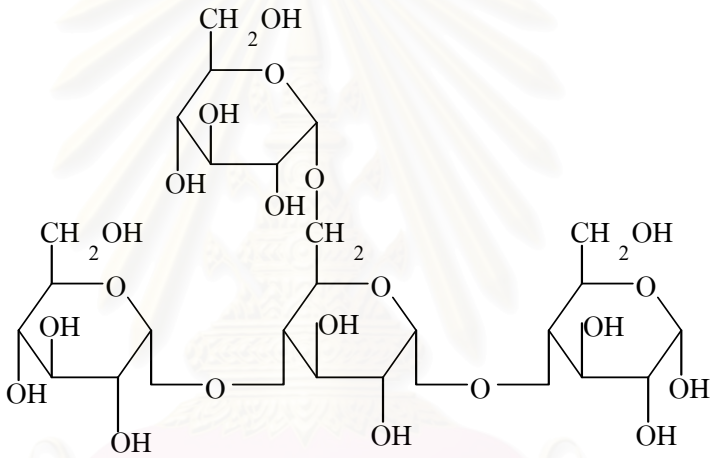
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส

อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป โดยแป้งส่วนใหญ่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก จึงส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ อย่างไรก็ตาม โมเลกุล

ของอะไมโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้อะไมโลสจัดเรียงตัวขนานกันและใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหขึ้น และมีสมบัติไฮโดรฟิลิกลดลง สารละลายที่ได้จะมีลักษณะขุ่น

2. อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นส่วนของกลูโคสที่ต่อกันเป็นสาย ซึ่งมีกิ่งก้านสาขาแตกแขนงออกไป โครงสร้างที่เป็นสายประกอบไปด้วยหน่วยของกลูโคสที่มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α-1,4 (α-1,4 glycosidic) ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างโซ่หลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α-1,6 (α-1,6 glycosidic) ดังรูปที่ 2.8 ประมาณร้อยละ 4-5 โดยทั่วไปจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 800,000



รูปที่ 2.8 โครงสร้างอะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะไมโลสประมาณ 1,000 เท่า กิ่งก้านสาขาของอะไมโลเพกตินจะขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลในการเกิดเจล อะไมโลเพกตินไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่จะดูดน้ำและเกิดการพองตัวขึ้น การที่มีโซ่สาขาของโมเลกุลอะไมโลเพกติน ทำให้ลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และขัดขวางการเรียงตัวของสายโซ่ให้ใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้สารละลายของอะไมโลเพกตินจึงมีลักษณะใส ฟิล์มที่ได้จากอะไมโลเพกตินไม่มีความแข็งแรง และไม่สามารถโค้งงอได้เหมือนฟิล์มที่ได้จากอะไมโลส อะไมโลสจะทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ให้สีน้ำเงิน ในขณะที่อะไมโลเพกตินจะให้สีม่วงแดง ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของแป้ง

สายโซ่หลักของอะไมโลเพกตินและอะไมโลสที่อยู่ขนานติดกันมีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนที่ติดกันได้ ทำให้เกิดกลุ่มของโครงผลึก (micellar crystallite) ซึ่งเป็นตัวยึดให้แป้งอยู่

เป็นเม็ด และมีสมบัติไบร์ฟิงเจนซ์ (birefingence) ซึ่งสามารถแสดงให้ทราบได้โดยการเกิดโพลาไรเซชันครอส (polarization cross)

ส่วนของแป้งที่เอื้ออำนวยต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ คือ โครงสร้างที่เป็นสายตรงโดยจุลินทรีย์ย่อยสลายด้วยเอนไซม์เบตาอะไมเลส (β-amylase) ทำลายเฉพาะพันธะไกลโคซิดิกแบบ α-1,4 ส่วนพันธะไกลโคซิดิกแบบ α-1,6 ไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้น การย่อยแป้งส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะไมโลเพกติน จึงได้เป็นสายสั้นของแป้งที่เรียกว่า เดกซ์ทริน (dextrin) เท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด [4]

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณอะไมโลเพกติน (เปอร์เซ็นต์)
ข้าวโพด	28	72
มันฝรั่ง	21	79
ข้าวสาลี	28	72
มันสำปะหลัง	17	83
ข้าวเหนียว	0	100
ข้าวฟ่าง	28	72
ข้าว	17	83
สาคู	27	73
ข้าวยายม่อม	20	80
ข้าวโพด (amylose maize)	50-80	20-50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.3 **สมบัติของแป้ง**

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้น การจัดเรียงตัวลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้น ในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจึงมีความหนืดมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

2.3.4 **การดัดแปรแป้ง**

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะสมกับภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติ แป้งดัดแปร (modified starch) โดยทั่วไปหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

2.3.5 ประเภทของแป้งดัดแปร

แป้งดัดแปรที่นิยมศึกษามีหลายประเภท ได้แก่

1. แป้งอีเทอร์ (starch ethers)

เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาอีเทอริฟิเคชันระหว่างแป้งกับสารเคมีที่ทำให้เกิดหมู่อีเทอร์ (etherifying agent) ในภาวะเบส ได้แก่ แป้งไฮดรอกซีอัลคิล (hydroxyalkyl starch) แป้งแคทไอออนิก (cationic starch) และแป้งคาร์บอกซีเมทิล (carboxymethyl starch) เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับเอทิลีนออกไซด์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ระดับการแทนที่ (degree of substitution, D.S.) ประมาณ 0.05-0.10 ทำให้แป้งเกิดการคืนตัวน้อยลง อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ต่ำลง ทำให้แป้งสามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น จะได้แป้งที่มีความเหนียว คงตัว และยึดติดได้ดี ฟิล์มที่ได้มีความใสมากขึ้น เป็นมันเงา ยืดหยุ่นมากขึ้น ได้แผ่นฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง และละลายน้ำได้มากขึ้น แป้งมีความต้านทานต่อการทำงานของกรด เบสและสารออกซิไดซ์อย่างอ่อนได้ สมบัติโดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่า มีลักษณะเป็นสารเพิ่มความคงตัว มีความหนืดสูงกว่าแป้งปกติ จึงนำมาใช้ในเคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความมันเงา ความสามารถในการพิมพ์ให้แก่กระดาษ ใช้เคลือบเส้นด้าย ทำให้เส้นด้ายมีความแข็งแรงมากขึ้น

2. แป้งเอสเทอร์ (starch esters)

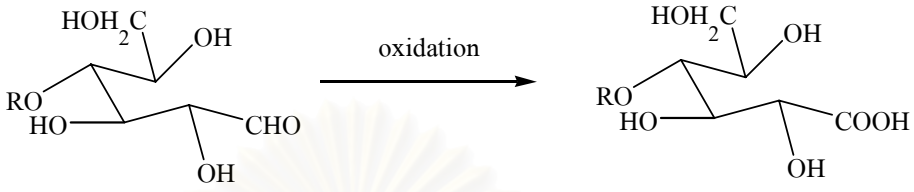
เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่ที่ทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ของสารเคมี ในภาวะเบส ซึ่งมีมากมายหลายประเภท โดยทั่วไปได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกันแอซิดคลอไรด์ (acid chloride) หรือ แอซิดแอนไฮไดรด์ (acid anhydride) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เช่น แป้งแอซิเตด (starch acetate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับแอซิติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) หรือ แป้งมาลิเนต (starch maleinate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3. แป้งออกซิไดส์ (oxidized starch)

เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน โดยใช้สารออกซิไดส์ (oxidizing agent) เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite) แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง สมบัติเคมี และขนาดของโมเลกุลเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป

ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ แป้งที่ได้จะมีหมู่คาร์บอนิลกับหมู่คาร์บอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ทั้งนี้อัตราส่วนปริมาณของหมู่คาร์บอนิลต่อหมู่คาร์บอกซิลจะ

ขึ้นกับ pH ของระบบ พบว่า หมู่คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้น เมื่อ pH ของระบบมีค่าลดลง โดยทั่วไปปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะทำที่ pH เท่ากับ 10 ทั้งนี้เพื่อให้ได้หมู่คาร์บอกซิลมากๆ อย่างไรก็ตาม จะเกิดการออกซิเดชันที่พันธะไกลโคซิดิกด้วย ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมีขนาดสั้นลง



รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้ง

4. แป้งครอสลิงก์ (Crosslinked starches)

เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เรียกสารเคมีนั้นว่า สารเชื่อมโยง (crosslinking agent) เช่น อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) ไวนิลซัลโฟน (vinyl sulfone) กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ไตรพอลิฟอสเฟต (tripolyphosphates) เป็นต้น ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของแป้งในสภาพแขวนลอย พันธะโควาเลนต์จะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งไว้ มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้งโดยเพิ่มความต้านทานต่อภาวะความเป็นกรด ความร้อน ความหนืดคงตัวที่อุณหภูมิสูง

5. แป้งดีพอลิเมอร์ไรซ์ (Depolymerized starches)

เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการลดขนาดโมเลกุลของแป้ง เนื่องจากในการใช้งานบางประเภทต้องการแป้งที่มีความหนืดลดลง ดังนั้น จึงต้องมีการดัดแปรเพื่อทำให้น้ำหนักโมเลกุลของแป้งลดลง

6. เดกซ์ทริน (dextrins)

เดกซ์ทรินเป็นแป้งที่เกิดการดีพอลิเมอไรซ์ (depolymerize) และจัดโครงสร้างอีกครั้ง (restructure) ใหม่เป็นสายโซ่กิ่งสั้น ยาว หรือพอลิเมอร์แบบวงแหวน (cyclic polymers) การดีพอลิเมอไรซ์จะใช้กรดหรือเอนไซม์ เดกซ์ทรินมีสมบัติที่สำคัญคือ สามารถละลายในน้ำเย็นได้เพิ่มขึ้น มีความหนืดในขณะร้อนลดลง ฟิล์มที่ได้มีสมบัติยึดเกาะได้มากกว่าฟิล์มจากแป้งดิบ ใช้ใน

ผลิตภัณฑ์อาหารพวกครีมเทียม ลูกกวาด เนื่องจากมีความสามารถในการละลายได้สูงกว่าและมีความหนืดน้อยกว่า จึงทำให้ใช้งานได้สะดวกและระเหยน้ำได้อย่างรวดเร็ว

2.4 **พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ** [6,7]

เนื่องจากปริมาณการใช้งานของพลาสติกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมากเรื่อยๆ จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่ดีเหนือกว่าวัสดุอื่น คือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมี สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และยังมีราคาถูก ด้วยสมบัติที่ดีหลายประการจึงทำให้การใช้งานของพลาสติกเป็นไปอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จนก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะพลาสติกส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการย่อยสลายและใช้เวลานับร้อยปีกว่าจะมีการสูญเสียน้ำหนักบางส่วน พลาสติกส่วนมากมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์สูงเพราะโมเลกุลของพลาสติกไม่ยอมให้น้ำผ่านเข้าออก จึงทำให้โอกาสที่จุลินทรีย์ที่ปล่อยเอนไซม์ออกมากที่เข้าย่อยสลายได้น้อยลง ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น หากกำจัดไม่ถูกวิธีจะเกิดเป็นปัญหาที่สำคัญของสิ่งแวดล้อม

ดังนั้น จึงมีการศึกษาการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ

1. การปรับปรุงพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เป็นการนำเอาพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมาปรับปรุงโดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือทางเคมี เพื่อทำการผลิตพลาสติกให้มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น ใช้ทำชิ้นส่วนยึดอวัยวะที่เป็นกระดูกในร่างกาย หรือใช้ทำฟิล์มสำหรับห่อผลิตภัณฑ์

2. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น พลาสติกสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ แต่ต้องมีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกเอสเทอร์เท่านั้น เช่น พอลิคาร์โพแลกโทน (carpolactone) เรียกย่อว่า PCL และพอลิไกลโคลิกแอซิด เป็นต้น

3. การนำสารเติมแต่งใส่ลงในพลาสติกเพื่อปรับปรุงให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น การเติมแป้งในพลาสติก โดยแป้งจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของพลาสติกและมีกลไกการสลายตัวของพลาสติก คือ ขั้นแรกที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์นี้จะย่อยโมเลกุลของแป้งให้มีขนาดเล็กลง จนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อถูกย่อยสลายต่อไป

ทำให้เม็ดแป้งหายไปจากเนื้อของพลาสติก เกิดเป็นรูพรุน (porus) ขนาดเล็กในเนื้อพลาสติก ส่งผลให้เนื้อพลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นในขั้นที่สอง น้ำและแร่ธาตุต่างๆ ในธรรมชาติจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (auto-oxidation) ได้สารเปอร์ออกไซด์ สารดังกล่าวจะเข้าไปกระตุ้นโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้เกิดการแตกตัว ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ต่อไปได้เกิดเป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้อัตราเร็วของการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ เกลือของโลหะ สารอาหารที่อยู่ในดิน รวมไปถึงความหนาของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ส่วนมากเป็นเทอร์โมพลาสติก

จะเห็นได้ว่า แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและมีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสสามารถพองตัวขึ้นแผ่นฟิล์มได้ รวมทั้งมีลักษณะที่เปลี่ยนรูปได้ นำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก และมีความบริสุทธิ์สูง จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัตถุใช้ทดแทนพลาสติกในบางส่วนของการใช้งาน แต่แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆ ต่ำ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ จึงมีการดัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ น่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการแก้ไขปัญหาโดยวิธีการอื่น เนื่องจากพลาสติกที่ได้ยังมีความแข็งแรงพอที่จะใช้งานได้ อีกทั้งยังย่อยสลายได้เองด้วยกระบวนการทางธรรมชาติอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาแป้งดัดแปรมาผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับแป้งที่ไม่ดัดแปร เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้ากันได้และแข็งแรงพอที่จะใช้งานได้ รวมทั้งมีความสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Santayanon และ J. Wootthikanokkhan [8] ได้ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง ด้วยโพรพิโนอิกแอนไฮไดรด์ (propinoic anhydride) โดยใช้ไพริดีน (pyridine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วศึกษาผลของปริมาณแอนไฮไดรด์ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) ศึกษาลักษณะความเข้มของพีกหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งที่เปลี่ยนไปเป็นหมู่เอสเทอร์ และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตรวจสอบลักษณะที่พื้นผิวรอยต่อของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งดัดแปรกับพอลิยูรีเทนพบว่า การยึดเกาะระหว่างแป้งดัดแปรและพอลิยูรีเทนดีกว่าแป้งไม่ดัดแปร อย่างไรก็ตาม ผลของการทดสอบการนำพอลิเมอร์ผสมไปฝังดิน พบว่า แป้งดัดแปรสามารถย่อยทางชีวภาพได้ช้ากว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร

R. Mani และ M. Bhattacharya [9] ได้ศึกษาแป้งข้าวโพดที่มีอัตราส่วนของปริมาณอะไมโลเพกตินต่ออะไมโลสที่แตกต่างกัน ซึ่งผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ คือ เอทิลีนไวนิลแอซีเทต (ethylene vinyl acetate) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในเครื่องอัดรีด (extruder) และใช้แป้งที่แตกต่างกันสี่ชนิดคือ แป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย (waxy maize) ซึ่งมีอะไมโลเพกติน 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวโพดที่ใช้ในอุตสาหกรรม (industrial corn) มีอะไมโลเพกติน 70 เปอร์เซ็นต์และมีอะไมโลส 30 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวโพดทั่วไป (common corn) มีอะไมโลเพกติน 50 เปอร์เซ็นต์และมีอะไมโลส 50 เปอร์เซ็นต์ และแป้งที่มีอะไมโลสสูง (high amylose starch) โดยใช้ปริมาณของแป้งที่ผสม 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า การผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์กับแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง ใช้พลังงานในการผสมมากกว่าการผสมกับแป้งที่มีอะไมโลสสูง เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการทำลายกิ่งของอะไมโลเพกตินในระหว่างกระบวนการผลิต ส่วนการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้ง พบว่า สมบัติทั้งสองมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อแป้งมีปริมาณอะไมโลส 70 เปอร์เซ็นต์ และสูงมากขึ้น เมื่อมีปริมาณอะไมโลสต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้น ผลการทดสอบการดูดซึมความชื้น พบว่า แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสน้อยสามารถดูดซึมความชื้นได้มากกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง

R. Chandra และ R. Rustgi [10] ได้ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) แล้วผสมกับแป้ง โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์บนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นในไซลีน (xylene) ใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ใช้ปริมาณของแป้งข้าวโพดดัดแปรและไม่ดัดแปรที่ต่างกัน (ระหว่าง 10 และ 60 เปอร์เซ็นต์) ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเพื่อเปรียบเทียบกัน พบว่า ความทนแรงดึง มอดุลัส และการดูดซึมความชื้นเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืดดึงลดลง เมื่อปริมาณแป้งที่ผสมเพิ่มขึ้น แล้วทดสอบการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมทางชีวภาพ โดยใช้วิธีฝังดินเป็นระยะเวลา 6 เดือน และผสมเชื้อราเป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่า การฝังดินทำให้เกิดการย่อยสลายได้มากกว่าการใช้เชื้อราเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม จากการใช้ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC) หาปริมาณผลึกและใช้เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ (TGA) หาปริมาณของแป้งที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมพบว่า ความเป็นผลึกลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น

N. Ramani และคณะ [11] ได้ใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และแอซิดคลอไรด์หลายประเภทในการดัดแปรแป้งข้าวโพด ใช้ไดเมทิลซัลฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายและใช้ไพริดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า สามารถดัดแปรโครงสร้างของแป้งข้าวโพดได้ รวมทั้งได้ทดลองนำแป้งดัดแปรไปขึ้นรูปเป็นพลาสติก แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

A.G. Pedroso และ D.S. Rosa [12] ได้ศึกษาอิทธิพลของแป้งข้าวโพดที่มีต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลแล้ว การนำมาผสมกับแป้งข้าวโพดในปริมาณ 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (extrusion) และวิเคราะห์คุณลักษณะโดยหาค่าดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) ความทนแรงดึง และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่นำมาผสมกับแป้งข้าวโพดในอัตราส่วนเดียวกัน จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณของแป้งข้าวโพดลงไปในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ค่าดัชนีการไหล ความทนแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดลดลง ในขณะที่ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าดัชนีการไหล ความทนแรงดึงนี้ส่งผลให้เห็นเด่นชัดเมื่อมีการเพิ่มแป้งข้าวโพดลงไปในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำปริมาณ 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นแสดงให้เห็นถึงแรงกระทำระหว่างผิวหน้าของเฟสทั้งสองอย่างอ่อน ๆ เมื่อมีการนำแป้งข้าวโพดมาผสมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่าน

กระบวนการรีไซเคิลแล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมแป้งข้าวโพดลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลแล้วแสดงพฤติกรรมเช่นเดียวกับการผสมแป้งข้าวโพดลงไปในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ซึ่งสิ่งนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวโพดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการผสมของงานวิจัยนี้

Piyush B. Shah และคณะ [13] ได้ศึกษาลักษณะกลไกการย่อยสลายของแป้งที่เติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยผสมแป้งกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill) ที่อุณหภูมิ 125-130 องศาเซลเซียส แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแบบบราเบนเดอร์สกรูเดี่ยว จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม เช่น การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของแป้งด้วยเอนไซม์อะไมเลสที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากนั้นทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทดสอบสมบัติเชิงกล หาค่าดัชนีการไหล และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจสอบลักษณะที่พื้นผิวรอยต่อของพอลิเมอร์ผสมพบว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแป้ง จะเห็นรอยแตก หลุม บ่อ ของพื้นผิวแป้งที่เกิดจากเอนไซม์อะไมเลสได้อย่างชัดเจน

สมพร รุ่งสัมพันธ์กุล และสุพิชญา ชื่นชนม์ [7] ได้ดัดแปรแป้งข้าวเหนียวกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 50 องศาเซลเซียส ภาวะที่ใช้ในการดัดแปร คือ เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็น 5 15 25 35 50 65 75 และ 85 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 30 60 90 และ 120 นาที เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก พร้อมทั้งตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทราน-สฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากนั้น นำแป้งดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ พร้อมทั้งจับเวลาการแห้งตัว แล้วนำแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติความทนแรงดึง การดูดความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่า ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างมีผลต่อสมบัติของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้ ซึ่งโดยรวมแล้ว แผ่นพลาสติกซึ่งเตรียมจากแป้งข้าวเหนียวที่ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการปฏิกิริยา 30 นาที ให้สมบัติที่ดีที่สุด

วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ กรวัลลิ์ รัตนะรัต และมัลลิกา พงษ์ชวนะกุล [6] ได้ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิริยาเป็น 2 4 และ 6

ชั่วโมง เมื่อนำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อพร้อมทั้งศึกษาลักษณะและสมบัติบางประการของแผ่นพลาสติกดังกล่าวในเบื้องต้น โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายชนิดพบว่า ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งและลักษณะของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มีความแตกต่างกัน ในขณะที่เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลกระทบแผ่นพลาสติกดังกล่าวนี้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายทั่วๆ ไป เช่น คลอโรฟอร์มหรือสารละลายกรด ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง แต่ละลายได้ในสารละลายด่างที่ร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากแป้งดัดแปรมีสมบัติแตกต่างจากพลาสติกที่เตรียมจากแป้งไม่ดัดแปร กล่าวคือ มีอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า มีการดูดซึมน้ำที่ดีกว่า และมีความแข็งแรงสูงกว่า

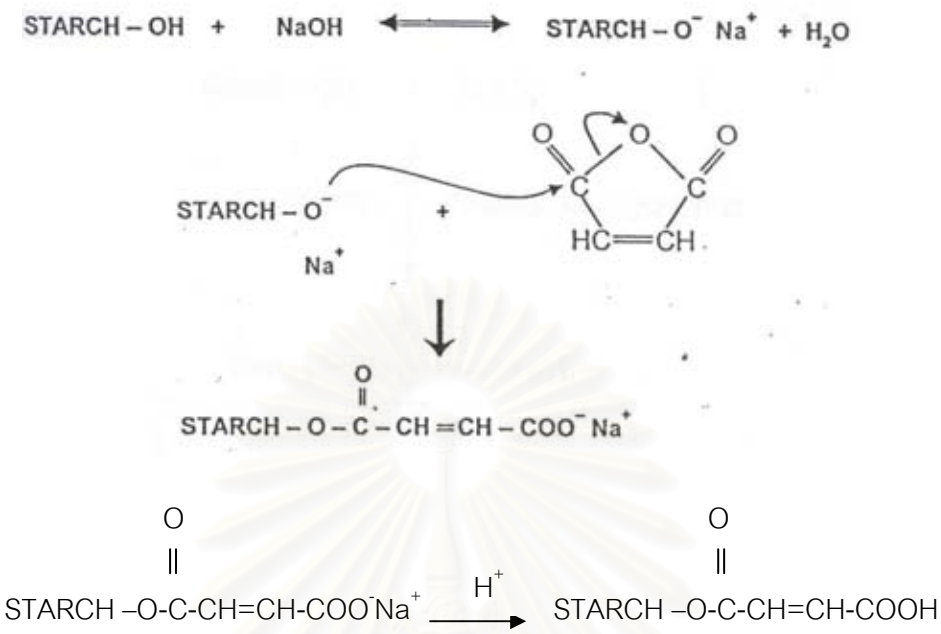
จักรกฤษณ์ โสวิรัชน์ และศรายุทธ์ คูสกุล [14] ได้เตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากแป้งธรรมชาติดัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร แป้งข้าวเหนียวดัดแปร แป้งข้าวเจ้าดัดแปร แป้งข้าวโพดดัดแปร และแป้งสาลีดัดแปร โดยนำแป้งเหล่านี้มาดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าพลาสติกที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวดัดแปรมีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าแป้งชนิดอื่น แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งธรรมชาติที่ให้พลาสติกมีสมบัติต่างๆ ดีที่สุด

นรศิษฎ์ จันทรกูล [15] ได้เตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและไม่ดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยแป้งข้าวเหนียว ดัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปร คือ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 30 นาที แล้วนำแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและที่ไม่ได้ดัดแปรไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง จากนั้น นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งข้าวเหนียวเป็น 0 5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ สำหรับที่ปริมาณแป้ง 0-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึง ความทนการดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกลดลง ในขณะที่การดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณแป้งเท่ากันพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีสมบัติ

เชิงกลที่ดีกว่า แต่มีการดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

สุภสิทธิ์ ผู้มีโชคชัย [16] ได้เตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและไม่ดัดแปรกับพอลิโพรพิลีน โดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปร คือ 50 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 2 ชั่วโมง แล้วนำแป้งมันสำปะหลังทั้งที่ดัดแปรและไม่ได้ดัดแปรไปผสมกับพอลิโพรพิลีนและขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งเป็น 0 5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิโพรพิลีนที่ผสมแป้ง 0-50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง การดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยมีความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้ เป็นการเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ ด้วยการนำแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวมาดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารดัดแปรในตัวทำละลายที่เป็นน้ำและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.10 จากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ได้มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังกับพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวกับพอลิโพรพิลีน ตามลำดับ เพื่อให้ได้เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แป้งมันสำปะหลัง (commercial grade จากบริษัทไทยวา จำกัด)
2. แป้งข้าวเหนียว (commercial grade จากบริษัทไทยวา จำกัด)
3. พอลิโพรพิลีน (polypropylene, melt flow index of 0.7 จากบริษัท TPI Co.,Ltd)
4. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, G.R. grade จากบริษัท Fluka)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, A.R. grade จากบริษัท Ajax FineChem)
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 35 เปอร์เซ็นต์ (hydrochloric acid, A.R. grade จากบริษัท J.T.Baker)
7. เมทานอล (methanol, G.R.grade จากบริษัท Zen Point)
8. เตตระไฮโดรฟิวแรน
9. โทลูอีน
10. เบนซีน
11. ไซลีน
12. น้ำกลั่น
13. ดิน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. ชุดเครื่องปั่นกวน พร้อมใบพัด
4. เครื่องให้ความร้อน (hot plate)
5. กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
6. กระจกนาฬิกา
7. ไฮโกรมิเตอร์
8. ตู้กระจก
9. เวอร์เนียร์
10. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

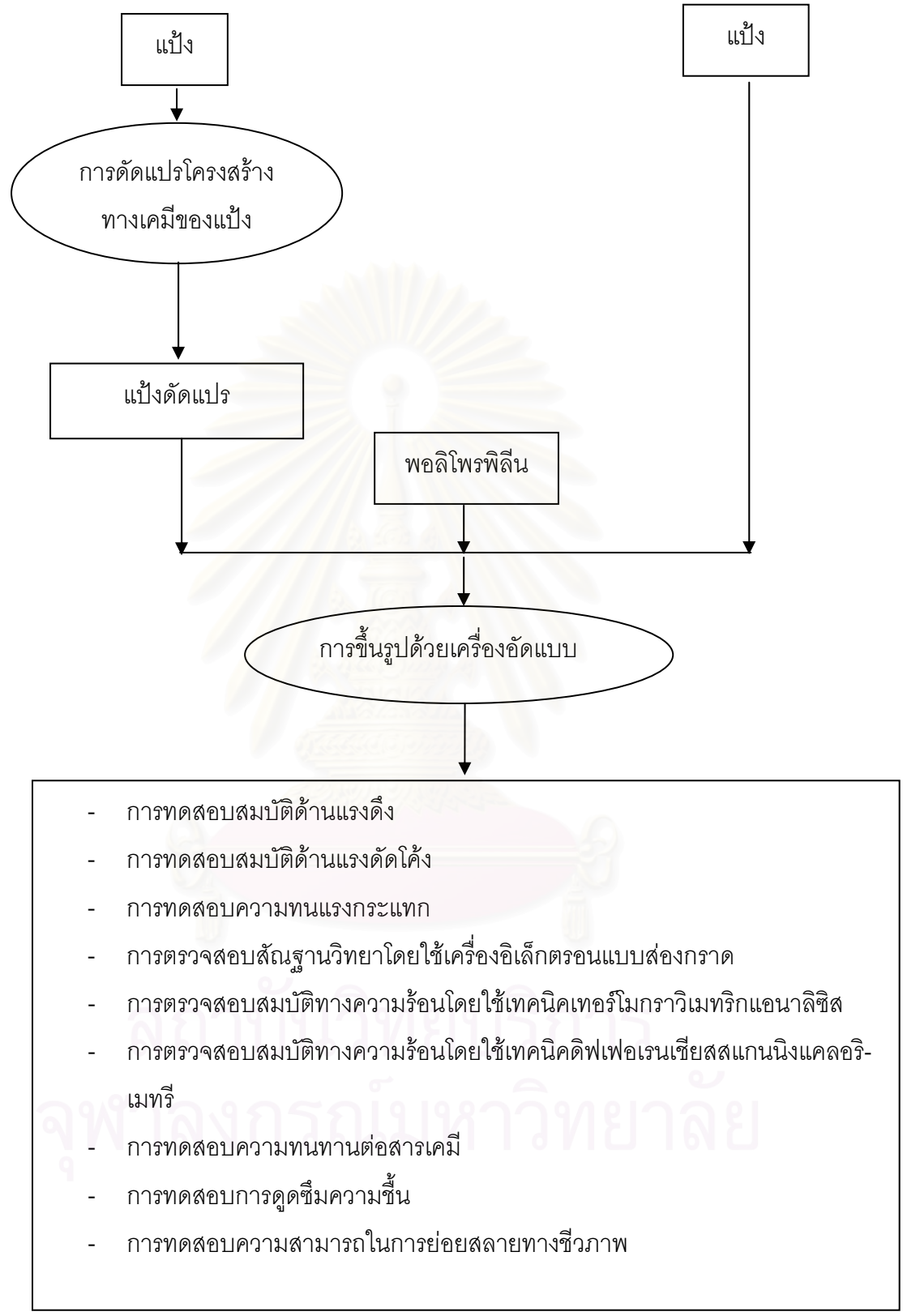
11. เครื่องทำรอยบาก
13. เดซิเคเตอร์
14. กระบะสำหรับบรรจุดิน
15. เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโฟโตมิเตอร์ (ของ Nicolet รุ่น Impact 400)
2. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding รุ่น V508-18-CX)
3. Universal Testing Machine (ของ LLOYD รุ่น model LR 100K)
4. Universal Testing Machine (ของ LLOYD รุ่น model 500)
5. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (ของ Gotech รุ่น GT-7045MD)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ของ JEOL รุ่น JSM-6400)
7. เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) (ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA851)
8. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) (ของ Perkin Elemer รุ่น Dimond DSC)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การดัดแปรแป้ง

รูปที่ 3.2 ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการดัดแปรแป้ง

ขั้นตอนในการดัดแปรแป้ง เป็นดังนี้

1. อบแป้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแป้งที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แล้วนำไปใช้คำนวณหาปริมาณสารอื่นๆ ที่ใช้ในปฏิกิริยา
2. เตรียมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เติมน้ำกลั่นและละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่นจนหมด (ปริมาณ NaOH : MA = 2.2 : 1 โมล)
3. ละลายแป้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยค่อยๆ ใส่แป้งทีละน้อยพร้อมกับการกวนและให้ความร้อนไปด้วย ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการละลายแป้งหลังจากใส่จนหมดครึ่งชั่วโมง
4. เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์* ในแป้งมันสำปะหลัง และ 35 เปอร์เซ็นต์* ในแป้งข้าวเหนียว (เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมา) ลงไปช้าๆ โดยค่อยๆ ใส่ทีละน้อย พร้อมกับปั่นกวนตลอดเวลา โดยให้ทำปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนด กล่าวคือ กรณีแป้งมันสำปะหลังใช้เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนแป้งข้าวเหนียวใช้เวลา 30 นาที
5. เมื่อครบกำหนด ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแป้งดัดแปรให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก นำไปตกตะกอนในเมทานอล กรอง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแป้งดัดแปรที่อบจนแห้งแล้วไปบดให้ละเอียดด้วย
6. นำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี

*ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ คิดเป็นโมลเปอร์เซ็นต์ของหมู่กรดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในแป้ง

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปร

เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งดัดแปร ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยละเอียด ดังนี้

1. นำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ มาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน KBr 2 ส่วน ต่อ แป้ง 1 ส่วน จากนั้นนำไปอัดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องไฮดรอลิกอัดแผ่นตัวอย่าง
2. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Nicolet - Impact 400) ดังรูปที่ 3.3 ได้สเปกตรัมของแป้งดัดแปร

รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Nicolet - Impact 400)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม

การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งและแป้งดัดแปร โดยนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาวางบนแม่แบบเพื่อเตรียมกดอัดเป็นแผ่น (compression molding, V508-18-CX) ดังรูปที่ 3.4 โดยให้อุณหภูมิในช่วงแรก (preheat) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ต่อมาให้ความดัน 10 ตัน เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลง (cool down) เหลือ 40 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานที่เตรียมเสร็จแล้วไปตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมทดสอบสมบัติต่างๆ ในขั้นตอนต่อไป

โดยอัตราส่วนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งและแป้งดัดแปร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่ศึกษาของพอลิโพรพิลีน แป้งและแป้งดัดแปร

สูตร	ปริมาณพอลิโพรพิลีน (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแป้ง (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแป้งดัดแปร (phr)
1	90	10	0
2	90	10	5
3	90	10	10
4	90	10	15
5	90	10	20
6	80	20	0
7	80	20	5
8	80	20	10
9	80	20	15
10	80	20	20
11	70	30	0
12	70	30	5
13	70	30	10
14	70	30	15

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนที่ศึกษาของพอลิโพรพิลีน แป้งและแป้งดัดแปร (ต่อ)

สูตร	ปริมาณพอลิโพรพิลีน (โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแป้ง (โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแป้งดัดแปร (phr)
15	70	30	20
16	60	40	0
17	60	40	5
18	60	40	10
19	60	40	15
20	60	40	20
21	50	50	0
22	50	50	5
23	50	50	10
24	50	50	15
25	50	50	20

รูปที่ 3.4 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding, V508-18-CX)

3.4.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

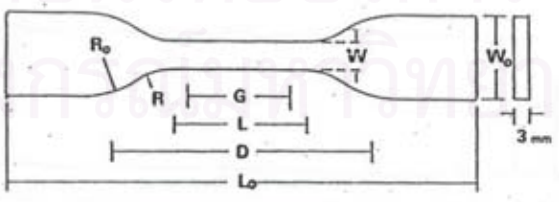
3.4.4.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D638 (type IV) (Standard Test Method For Tensile Properties of Plastic) โดยใช้ LLOYD Universal Testing Machine (model LR 100K) ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 LLOYD Universal Testing Machine (model LR 100K)

โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50 เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	1 กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50 มม./นาที



W : 6 มม. L : 33มม. R : 14 มม. G : 25 มม.

W_0: 19 มม. L_0: 115มม. R_0 : 25 มม. D : 65 มม.

รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 638 (type IV)

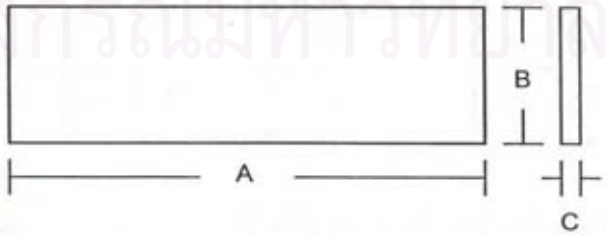
3.4.4.2 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง

เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้ LLOYD Universal Testing Machine (model 500) ดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 LLOYD Universal Testing Machine (model 500)

โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50 เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	2500 กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50 มม./นาที
ระยะที่ใช้ทดสอบ	50 มม.



A : 80 มม. B : 80 มม. C : 3.2 มม.

รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790

3.4.4.3 **การทดสอบความทนแรงกระแทก**

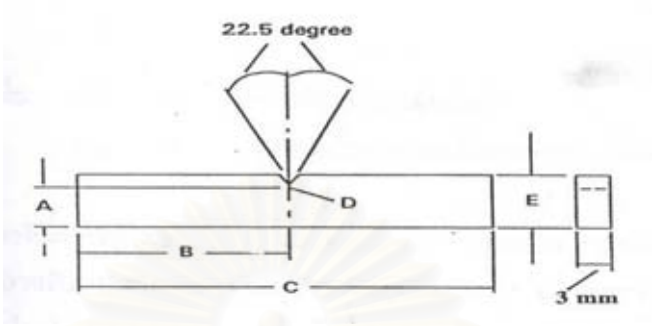
เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D256 (type Izod) โดยใช้เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ของ Gotech รุ่น GT-7045MD ดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (GT-7045MD)

รูปที่ 3.10 เครื่องบากชิ้นงาน

โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50 เปอร์เซ็นต์



A : 10.16±0.05 มม. B : 31.8±1.00 มม. C : 63.5±2.00 มม.

D : 0.25±0.05 มม. E : 12.7±0.20 มม.

รูปที่ 3.11 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 (type Izod)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4.4 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

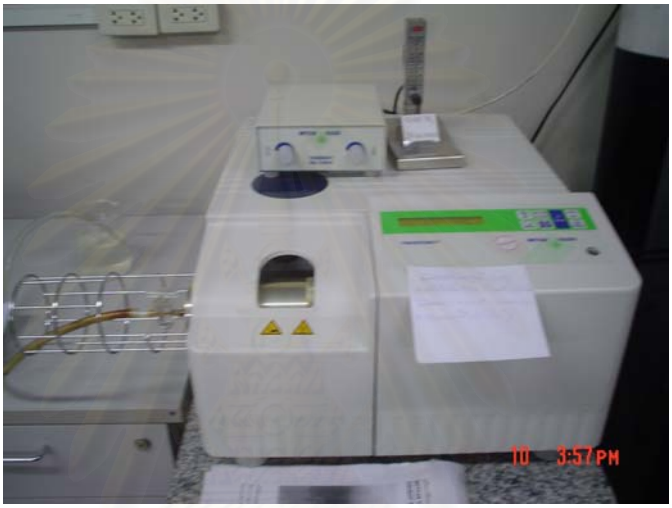
การตรวจสอบลักษณะที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6400 ดังรูปที่ 3.12 โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ซึ่งก่อนการทดสอบต้องเคลือบผิวด้วยทอง โดยศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก ทั้งนี้เพื่อดูการกระจายตัวของแป้ง และการยึดเกาะระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งและแป้งดัดแปร

รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-6400)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4.5 **การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิส** (Thermogravimetric analysis, TGA)

เป็นการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน และอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง TGA ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA851 โดยใช้พอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 3-10 มิลลิกรัม ใส่ในที่ใส่ตัวอย่างซึ่งทำจากอะลูมินา (alumina 70 ul) ตั้งภาวะทดสอบโดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.13 เครื่อง TGA (TGA/SDTA851)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4.6 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียสสแกนนิงแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC)

เป็นการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่อง DSC ของ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้พอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุในช่องอะลูมิเนียมที่มีฝาปิด โดยในขั้นตอนแรกใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่ 60 ถึง 300 องศาเซลเซียส จากนั้น ในขั้นตอนที่สอง ทำให้ชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมอุณหภูมิลดลงจาก 300 ถึง 60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเย็นตัว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และในขั้นตอนที่สามซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย ให้ความร้อนชิ้นตัวอย่างจาก 60 องศาเซลเซียสถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิในการหลอมเหลว

นอกจากนี้ เทคนิค DSC ยังสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย โดยอาศัยการคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว จากสมการที่ 3.1

$$\text{ปริมาณความเป็นผลึก (\%) (degree of crystallinity,\%)} = \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \qquad (3.1)$$

โดย

H_f^* = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (จูล/กรัม)

H_f^0 = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% สำหรับพอลิโพรพิลีน คือ 207.1 จูล/กรัม

รูปที่ 3.14 เครื่อง DSC (Diamond DSC)

3.4.4.7 การทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

1. ตัดชิ้นงานทดสอบให้มีน้ำหนัก 0.05 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง
2. จากนั้นนำตัวทำละลาย คือ เตตระไฮโดรฟิวแรน โทลูอีน เบนซีน เมทานอล ไซลีน และน้ำ ปริมาณ 40 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีชิ้นงานทดสอบ พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. แล้วสังเกตพฤติกรรมการละลาย

3.4.4.8 การทดสอบการดูดซึมความชื้น

มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 2.5ซม. × 2.5ซม. แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในเดซิเคเตอร์ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นทดสอบ
3. นำชิ้นงานทดสอบไปวางบนตะแกรงในตู้กระจก ซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
4. นำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนัก

ความสามารถในการดูดซึมความชื้น คือ การหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ M_1 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ

M_2 = น้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4.9 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 2.5 ซม. × 2.5 ซม. แล้วนำไปใส่ในเดซิเคเตอร์ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นทดสอบ
3. นำชิ้นทดสอบฝังลงในดินให้ลึกจากผิวดิน 5 ซม. ในกระบะที่บรรจุดินอยู่เต็ม (กระบะใส่ดินต้องมีรูสำหรับระบายน้ำส่วนเกินออก)
4. รดน้ำบนดินให้ชุ่ม จากนั้นนำกระบะดินเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด*
5. นำชิ้นทดสอบออกจากดินอย่างระมัดระวัง และเอาดินที่ติดที่ผิวออก จากนั้นทำชิ้นทดสอบให้แห้งโดยใส่ในตู้อบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักชิ้นทดสอบคงที่

ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ คือ การหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \qquad (3.3)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ

W_2 = น้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบ

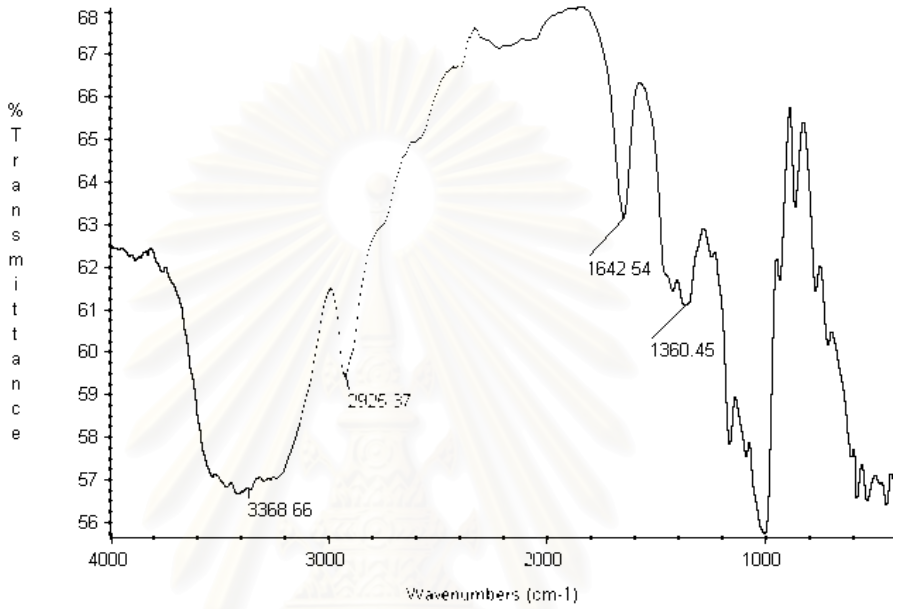
*ระยะเวลาที่ทำการทดสอบรวม 30 วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

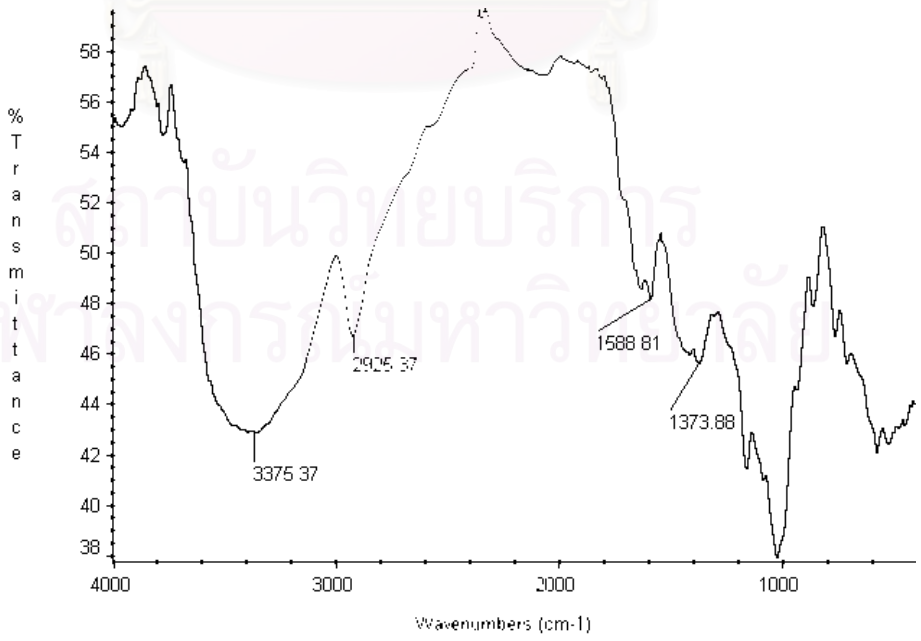
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

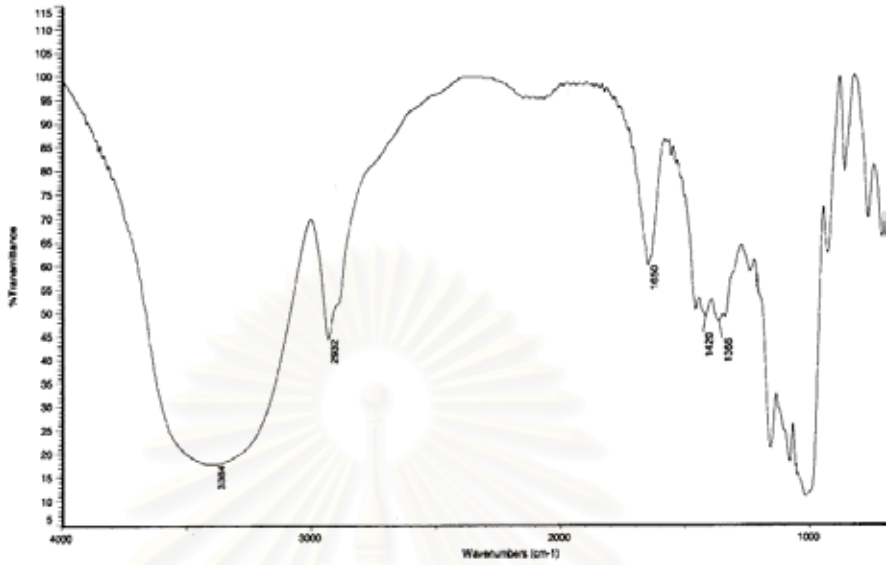
4.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรและไม่ดัดแปร



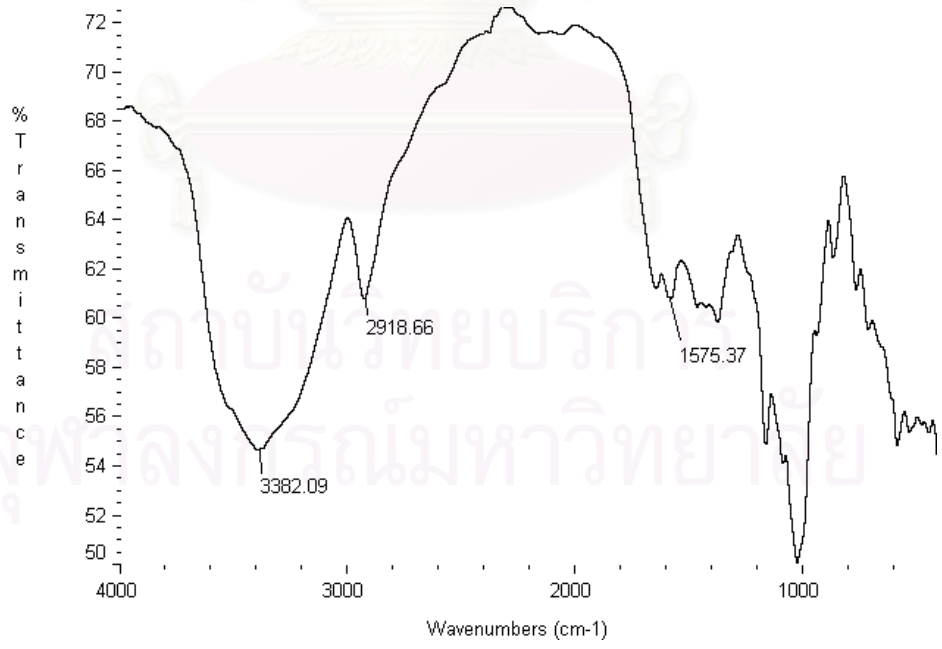
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปร



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปร

แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าลักษณะของสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ดัดแปร แสดงว่าเกิดการดัดแปรทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังไม่ดัดแปรและดัดแปร พบว่า สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังไม่ดัดแปรมีพีกที่สำคัญ คือ พีกที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ที่เลขคลื่น 3,200-3,600 cm^{-1} ดังรูปที่ 4.1 แต่เมื่อดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์แล้ว จะเห็นการปรากฏของพีกที่แสดงถึงหมู่เอสเทอร์ (CO-O) ที่เลขคลื่น 1,588.81 cm^{-1} ดังรูปที่ 4.2

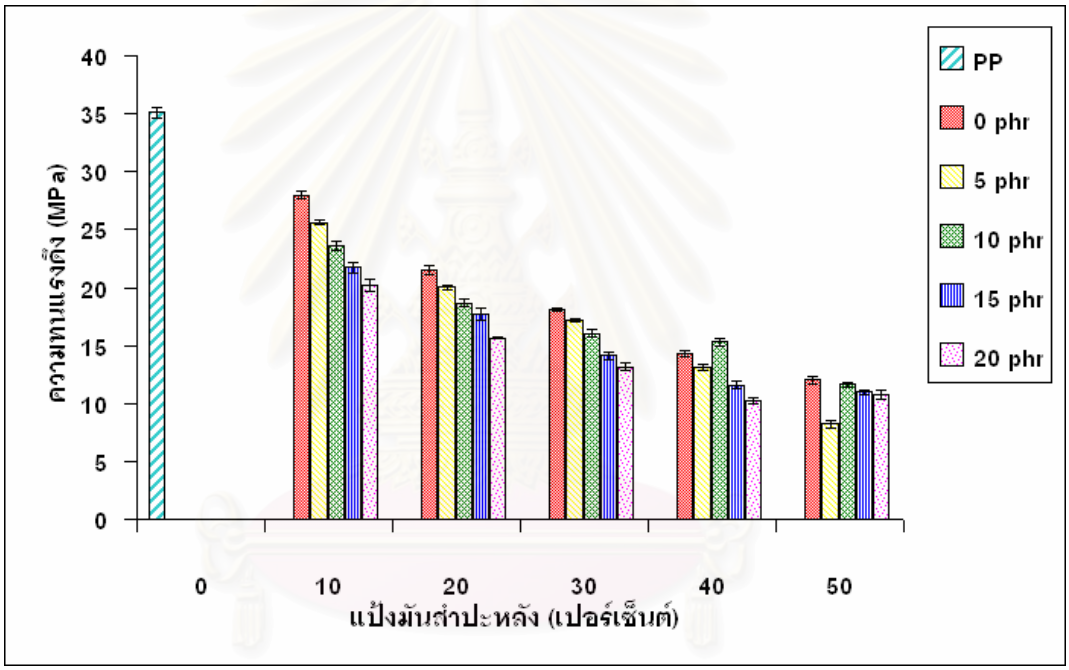
ส่วนการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรและดัดแปรพบว่า ลักษณะสเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวดัดแปรเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร โดยสเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีพีกที่สำคัญ คือ พีกที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งอยู่ในช่วงเลขคลื่น 3,200-3,600 cm^{-1} ดังรูปที่ 4.3 แต่เมื่อดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์แล้ว จะเห็นพีกที่แสดงถึงหมู่เอสเทอร์ที่เลขคลื่น 1,575.37 cm^{-1} ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

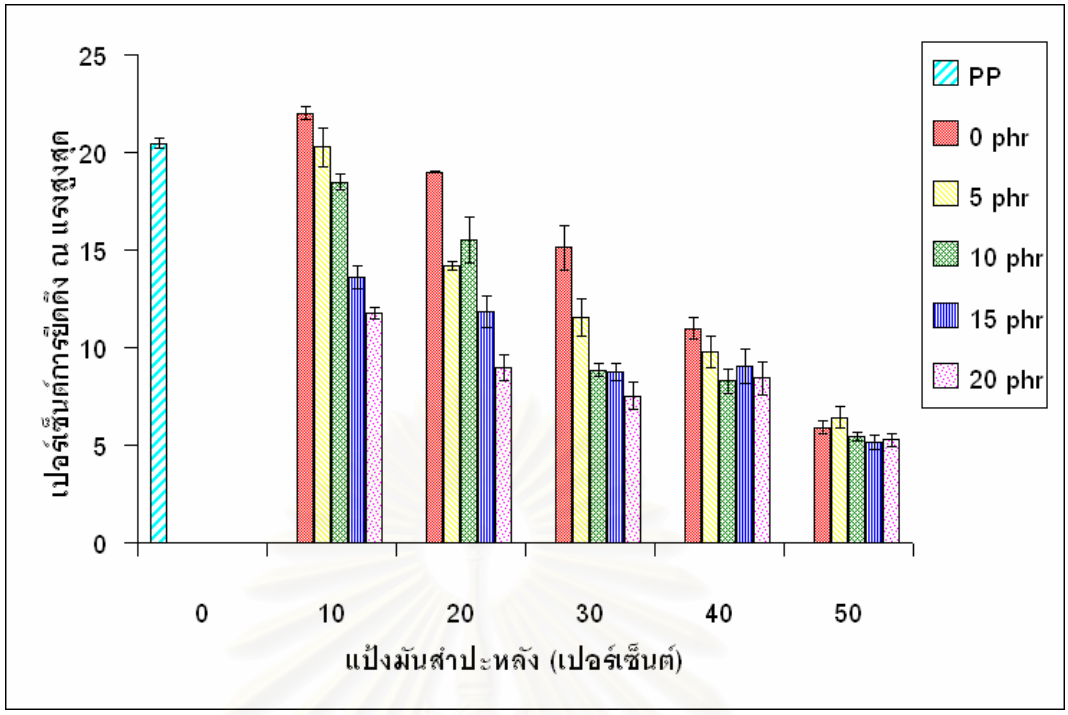
4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง

จากผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (PP/CSV/MCSV) ที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถแสดงค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด (% elongation at maximum load) และค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus) ในรูปที่ 4.5-4.7 ตามลำดับ

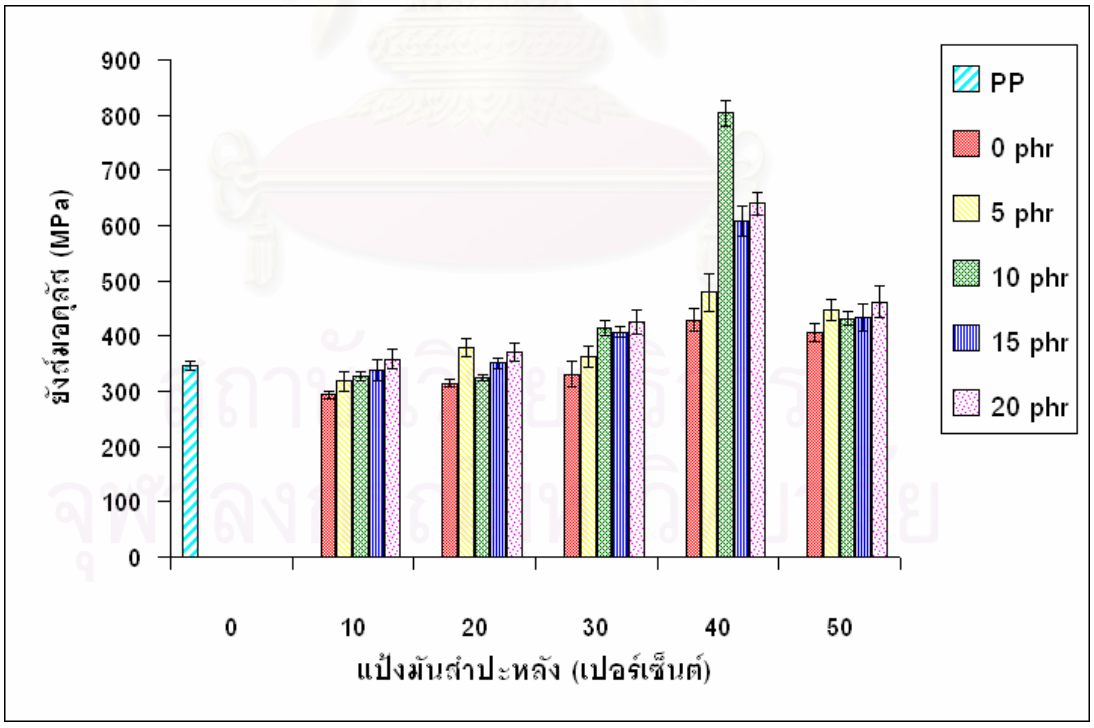


รูปที่ 4.5 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



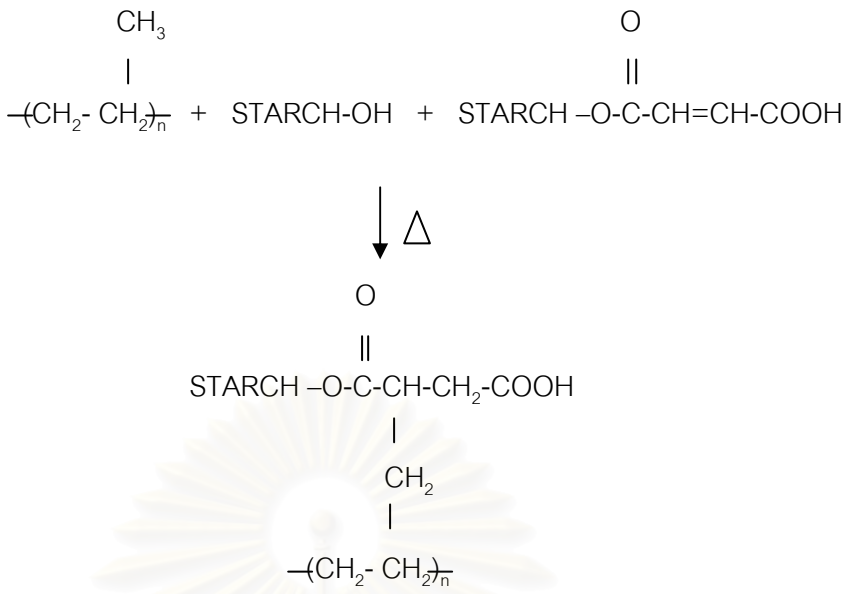
รูปที่ 4.7 ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ในระบบที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังต่ำ ก่อให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (defect) ของชิ้นงาน ซึ่งเกิดการขาดออกจากกันได้ง่าย นอกจากนี้ โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นยังเป็นการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกลดลง ดังนั้น เมื่อได้รับแรงดึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

ส่วนในระบบที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนต่อแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง สันนิษฐานได้ว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีสายโซ่โมเลกุลของหมู่เอสเทอร์ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนมากยิ่งขึ้น ดังนั้น เมื่อเพิ่มแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จึงเป็นการเพิ่มจุดบกพร่องของชิ้นงาน

รูปที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสม พบว่า ในระบบที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสตรงบริเวณรอยต่อระหว่างแป้งมันสำปะหลังและพอลิโพรพิลีนที่ต่ำ เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ที่อาจขาดออกจากกันก่อนที่ชิ้นทดสอบจะเกิดการยืดตัว นอกจากนี้ การลดลงของเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมยังเกิดจากการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงกว่าพอลิโพรพิลีน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนผ่านกันเมื่อได้รับแรงดึงเป็นไปได้ยากกว่า จึงเป็นผลให้ความสามารถในการยืดดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

ส่วนในระบบที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนต่อแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เติมลงไป ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

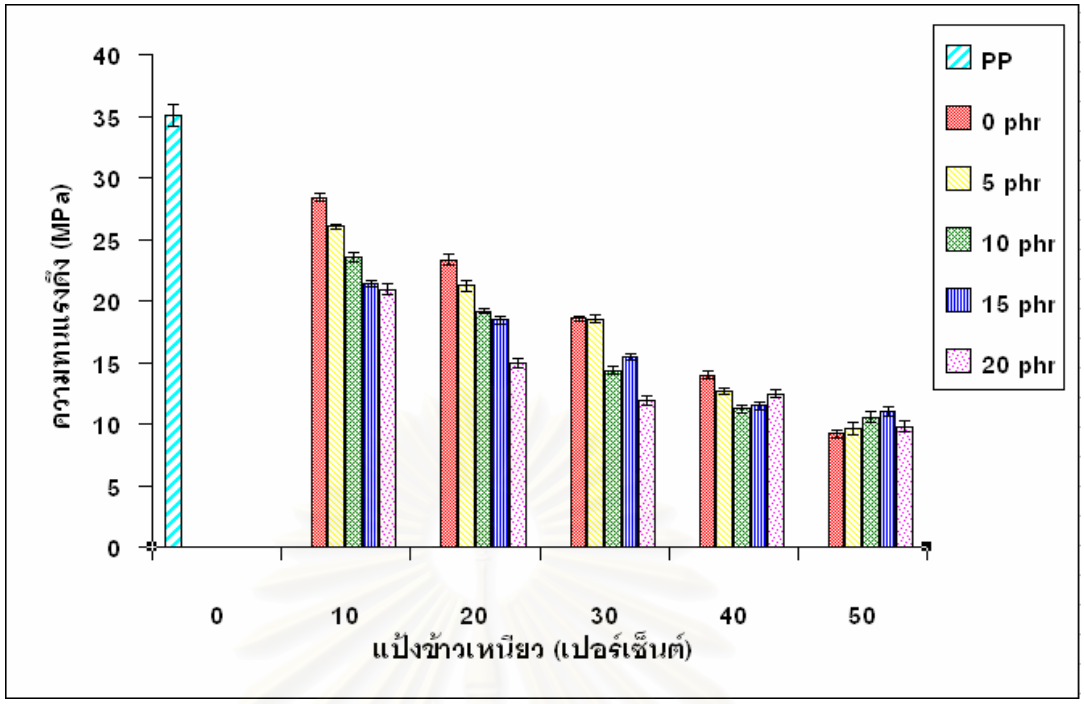


รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งดัดแปร

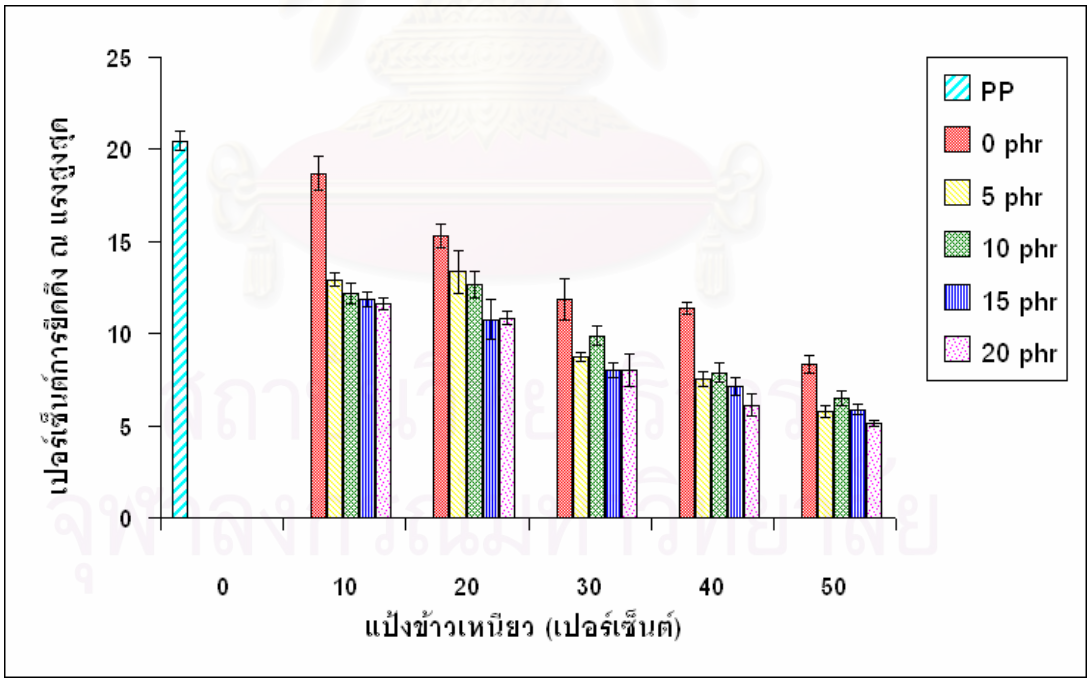
ดังนั้น เมื่อได้รับแรงดึงทำให้พันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นจะยึดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมไว้จึงเกิดการเลื่อนผ่านกันได้น้อย ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมยืดตัวได้ลดลง

ซึ่งผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมจึงส่งผลต่อยังส์มอดุลัสให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งในระบบที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและมีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.7

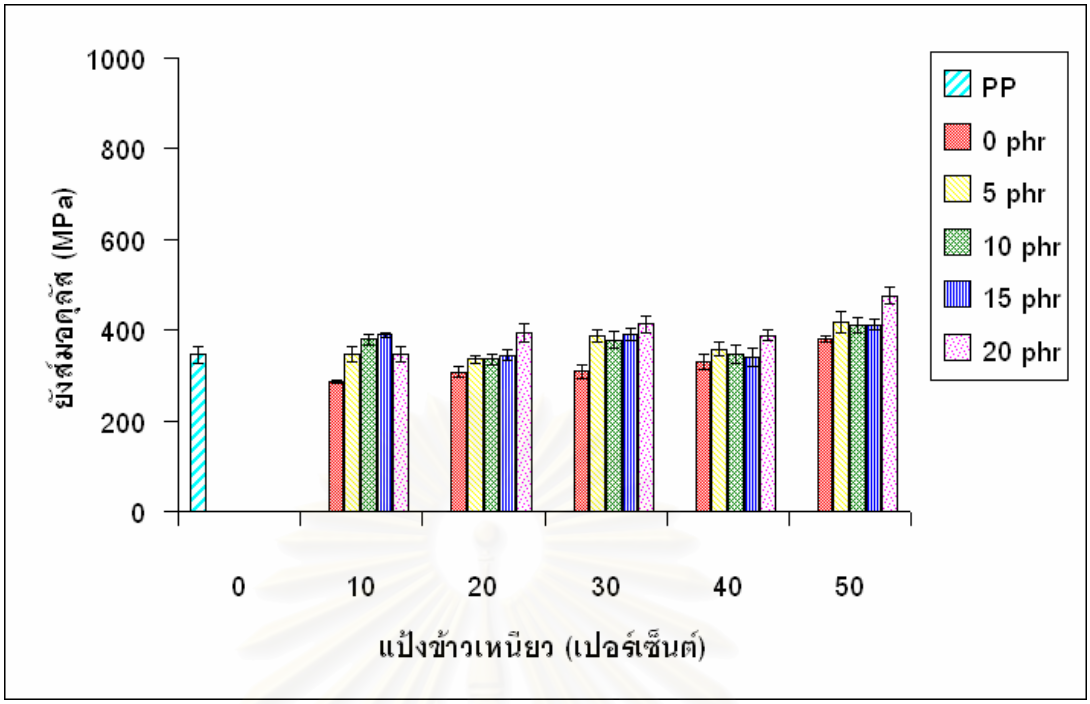
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



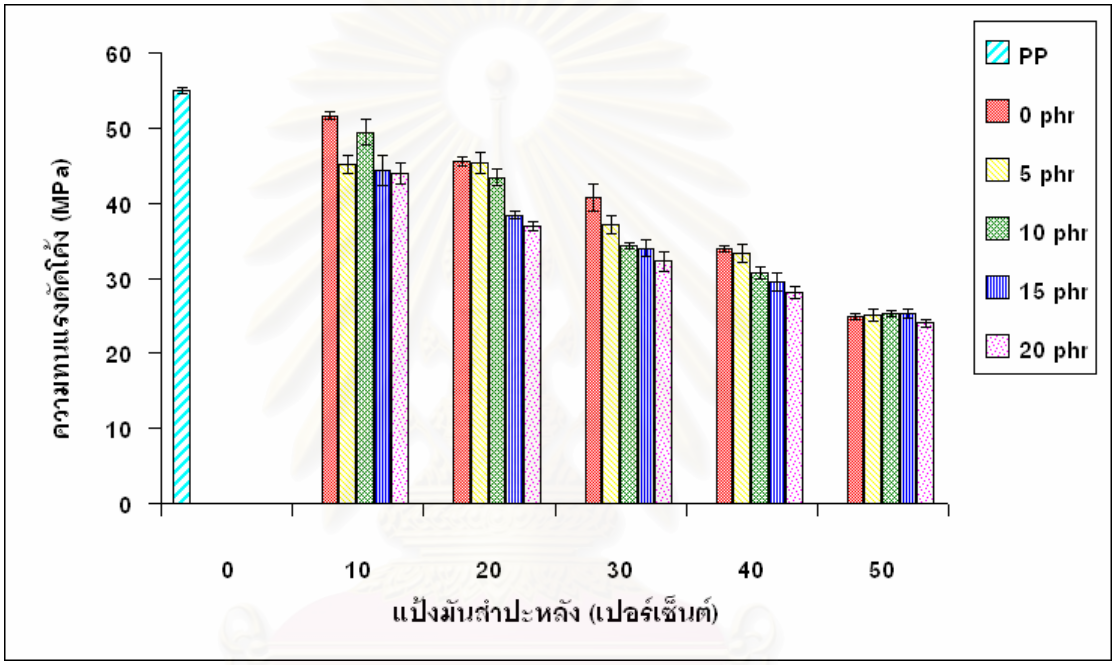
รูปที่ 4.11 ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

ส่วนในระบบของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว พบว่า ความทนแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด และยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม ทั้งที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและไม่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับระบบของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.11

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความทนแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุด และยังส์มอดุลัสระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง กับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว มีความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ แรงสูงสุดใกล้เคียงกัน แสดงว่า ชนิดของแป้งไม่มีผลมากนัก แต่ปริมาณแป้งเป็นปัจจัยที่มีส่วนมากกว่า แต่ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังกลับสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีความเป็นผลึกที่สูงกว่าแป้งข้าวเหนียว ทำให้ต้องใช้แรงดึงที่มากกว่าแป้งข้าวเหนียวนั่นเอง

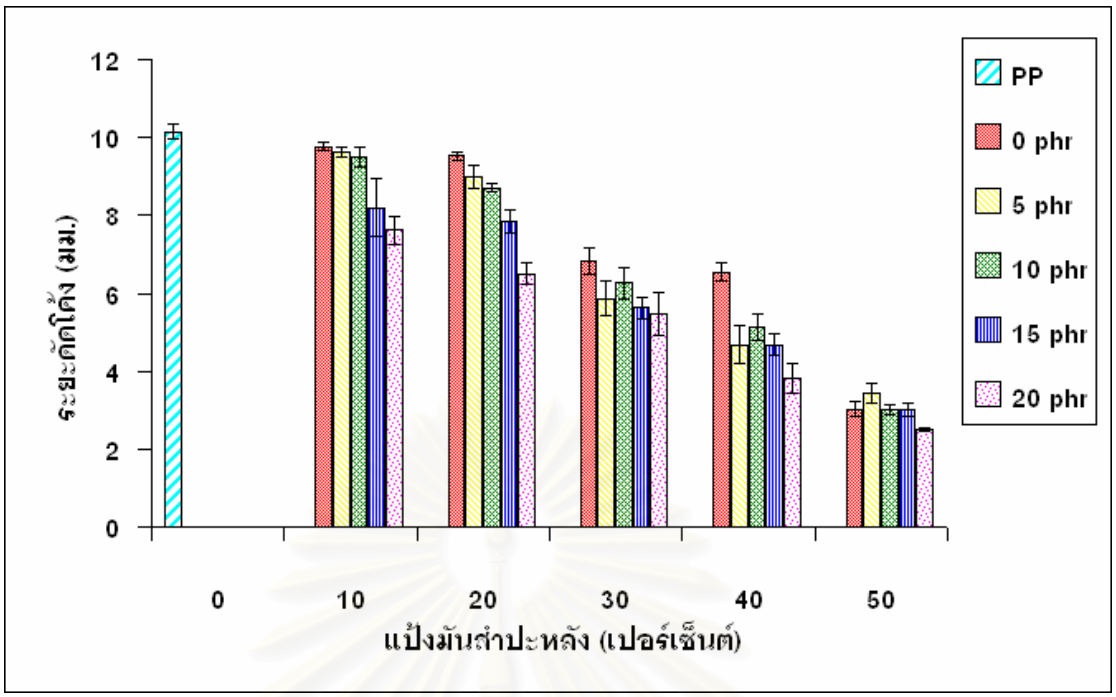
4.2.2 **สมบัติด้านแรงดัดโค้ง**

จากผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร สามารถแสดงค่าความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ค่าระยะดัดโค้ง (deformation at maximum load) และค่ามอดุลัสดัดโค้ง (flexural modulus) ดังกราฟรูปที่ 4.12 ถึง 4.14 ตามลำดับ

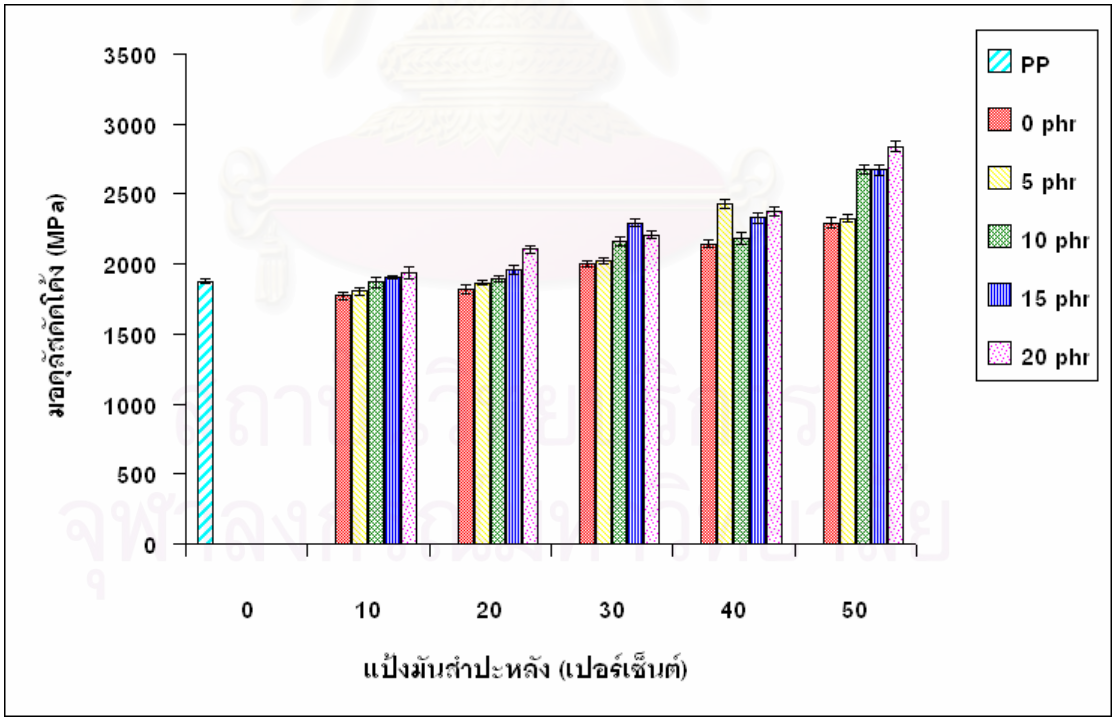


รูปที่ 4.12 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ระยะดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.14 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความเปราะและมีความยืดหยุ่นต่ำอยู่แล้ว [3] เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังที่มีความเปราะเช่นกัน จึงทำให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ นอกจากนี้ ภายในพอลิเมอร์ผสมมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังที่ต่ำ ทำให้เมื่อได้รับแรงกด ภายในชิ้นงานจึงไม่มีการถ่ายโอนแรงระหว่างผิวสัมผัส เป็นผลให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง

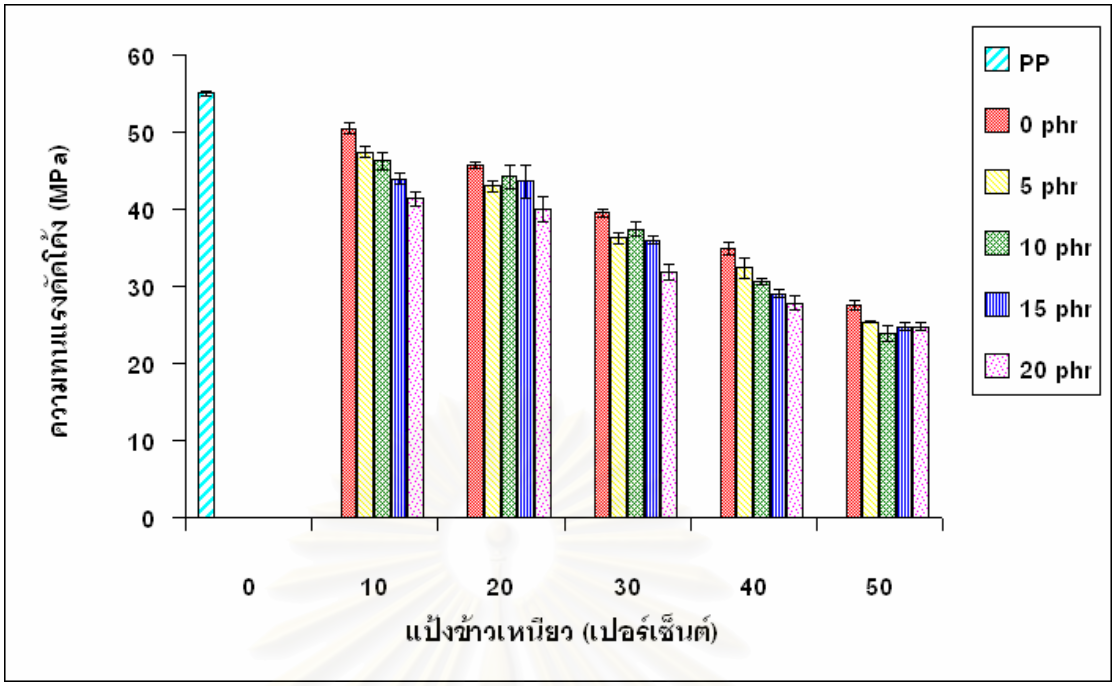
ส่วนในกรณีเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนต่อแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง แสดงว่าปริมาณของแป้งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ส่งผลให้ระยะดัดโค้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความเปราะและมีความยืดหยุ่นต่ำ การยืดตัวจึงต่ำ ดังนั้น เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงกว่าพอลิโพรพิลีน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนผ่านกันเมื่อได้รับแรงดัดโค้งเป็นไปได้ยาก จึงส่งผลให้ระยะดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

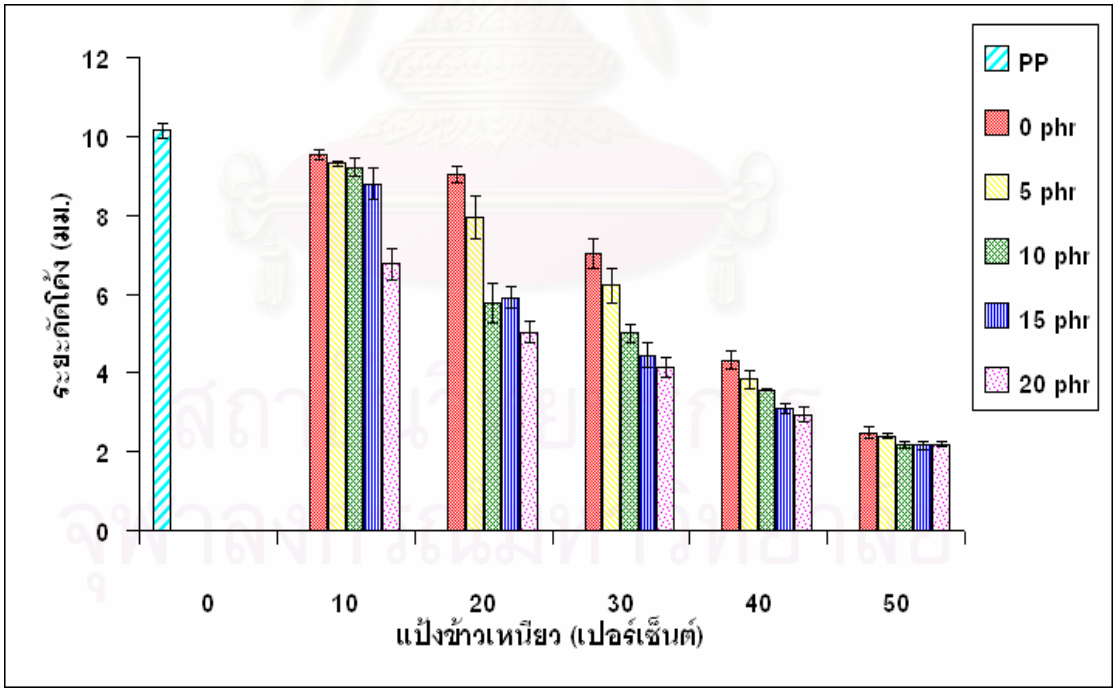
ส่วนในกรณีเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนต่อแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่า ระยะดัดโค้งมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิโพรพิลีน ซึ่งยึดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมไว้ ดังนั้น เมื่อออกแรงกดชิ้นงาน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการเลื่อนผ่านกันได้สั้นกว่ากรณีที่ไม่ได้เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พอลิเมอร์ผสมจึงมีระยะดัดโค้งลดลง

ซึ่งผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมจึงส่งผลต่อมอดุลัสดัดโค้งให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งในระบบที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและมีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.14

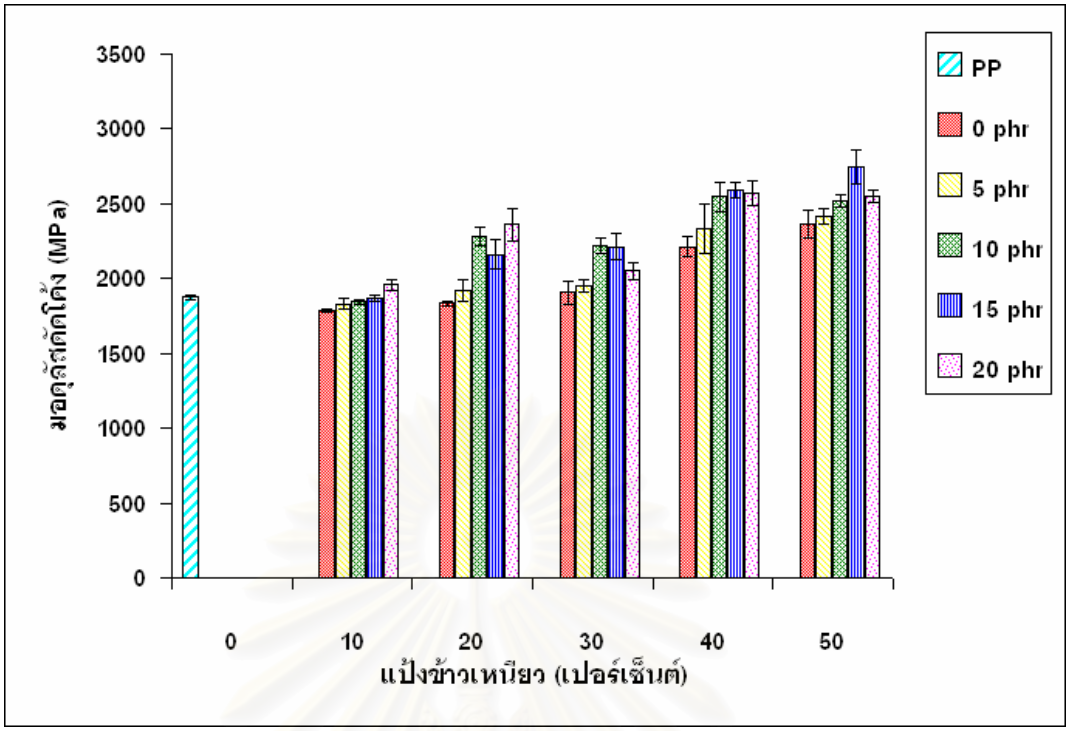
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.16 ระยะดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่าง

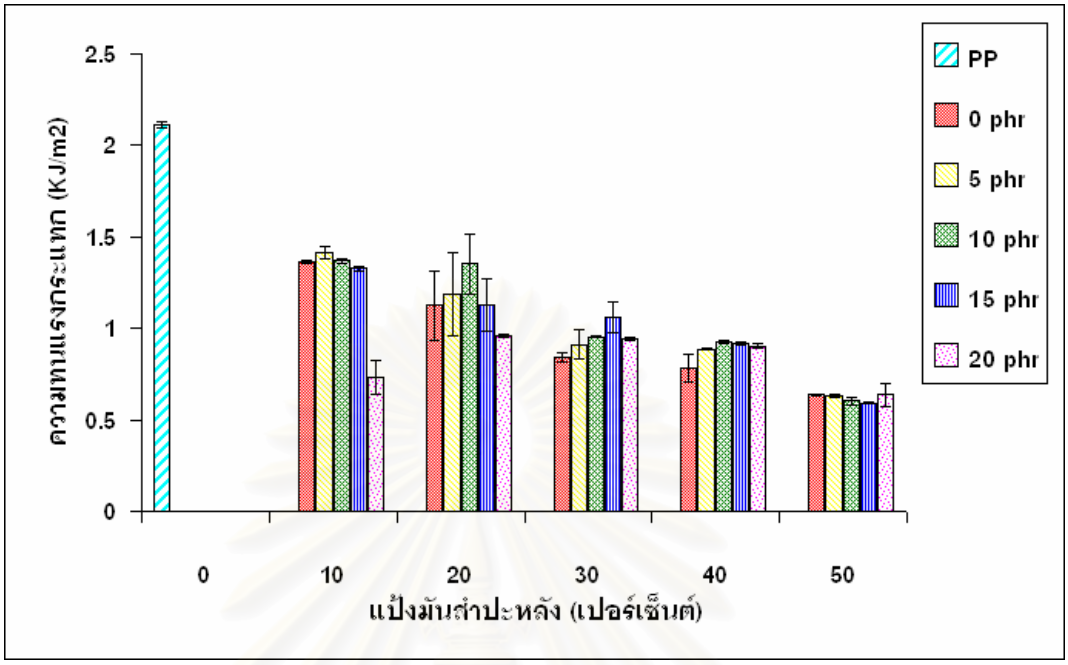


รูปที่ 4.17 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

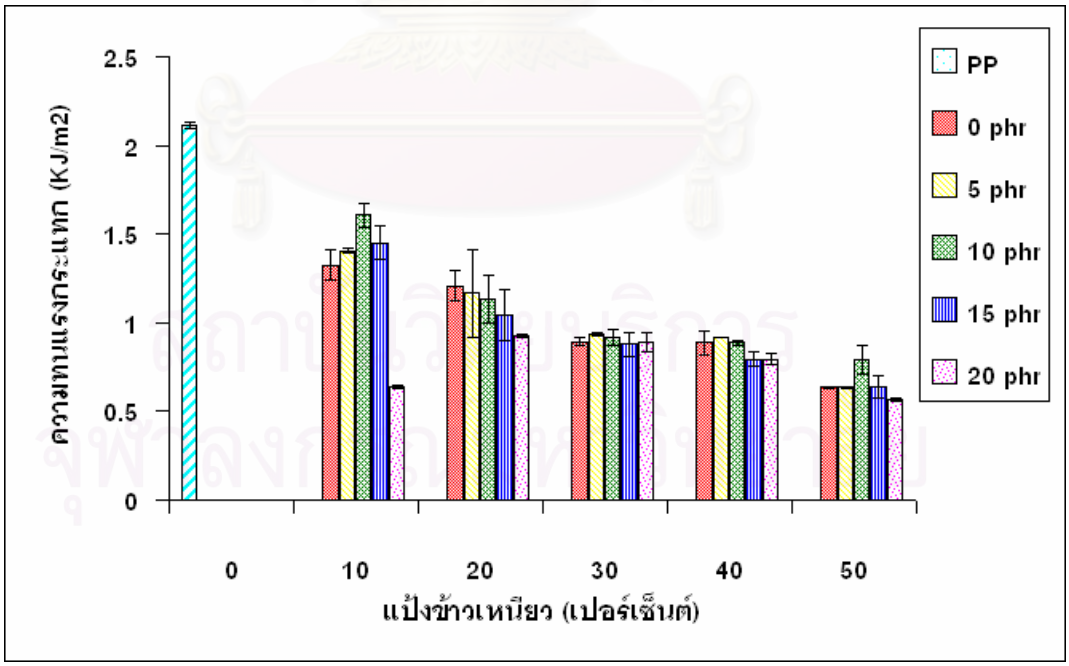
ส่วนในระบบของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว พบว่า ความทนแรงดัดโค้ง ระยะดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม ทั้งที่มีการเติมและไม่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร จะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.17

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความทนแรงดัดโค้ง ระยะดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้งระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง กับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวมีความทนแรงดัดโค้ง ระยะดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้งที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดของแป้งไม่มีผลมากนัก แต่ปริมาณแป้งเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากกว่า

4.2.3 ความทนแรงกระแทก



รูปที่ 4.18 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกลดลง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความเปราะอยู่แล้ว เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังที่มีความเปราะเหมือนกัน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเปราะมากยิ่งขึ้นไปอีก ความอ่อนตัวจึงลดลง ทำให้เมื่อได้รับแรงกระแทกจึงรับแรงกระแทกได้น้อยลง นอกจากนี้ บริเวณรอยต่อของพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง มีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ ทำให้เมื่อได้รับแรงกระแทกไม่มีการถ่ายโอนแรงระหว่างผิวสัมผัส ดังนั้น ชิ้นงานจึงแตกหักได้ง่ายขึ้น ความทนแรงกระแทกจึงลดลง

ส่วนในกรณีเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนต่อแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่า ความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เติมเข้าไป ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง จึงช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสทำให้มีการถ่ายโอนแรงระหว่างผิวสัมผัสได้ดี

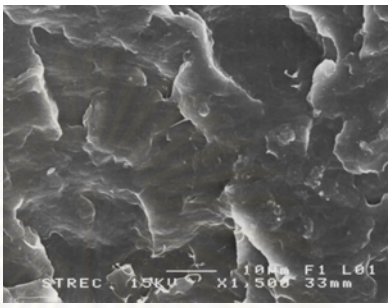
ในระบบของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวโดยที่ไม่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ดังรูปที่ 4.19 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียว ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง ส่วนในกรณีเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปรในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวเดียวกัน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถทนแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความทนแรงกระแทกระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งทั้งสองชนิดมีความทนแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดของแป้งไม่มีผลมากนัก แต่ปริมาณแป้งเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากกว่า

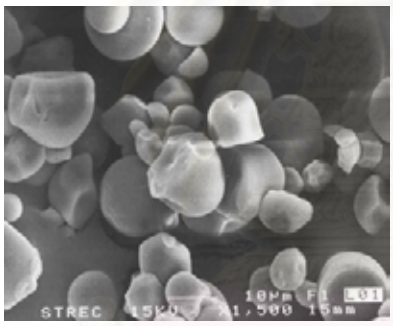
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

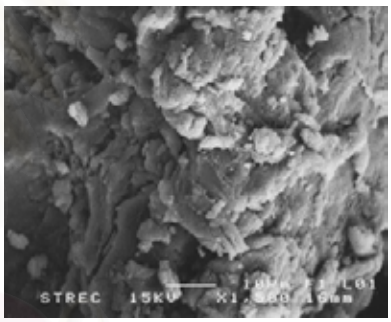
ในงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งดัดแปร โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.24 ตามลำดับ



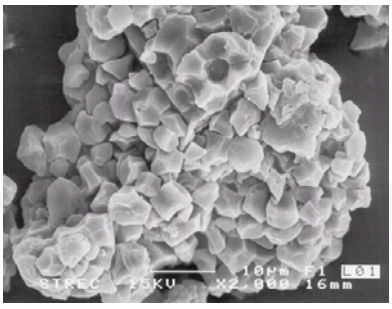
พอลิโพรพิลีน (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



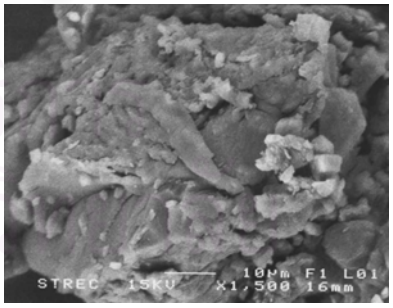
CSV (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



MCSV (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

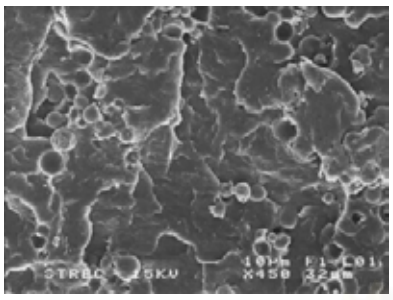


GTN (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

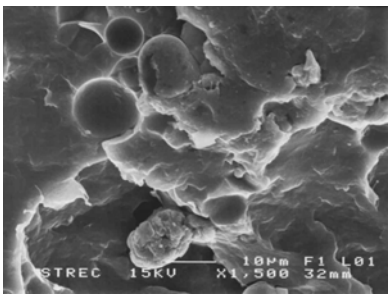


MGTN (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

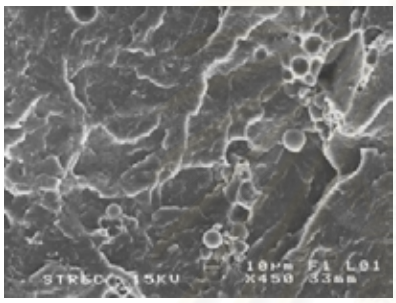
รูปที่ 4.20 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิโพรพิลีน (PP) แป้งมันสำปะหลัง (CSV) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (MCSV) แป้งข้าวเหนียว (GTN) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (MGTN)



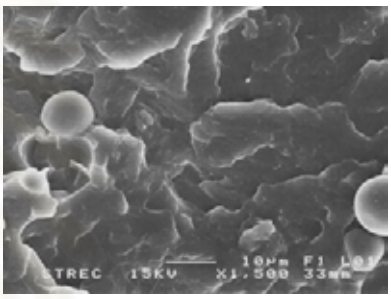
0 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



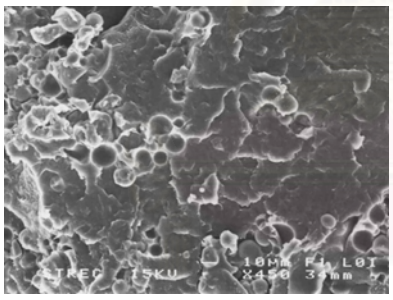
0 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



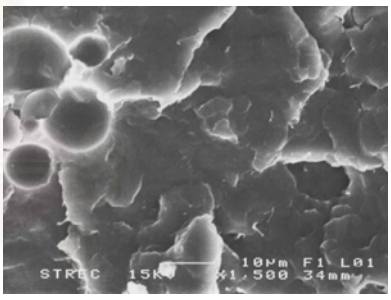
5 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



5 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

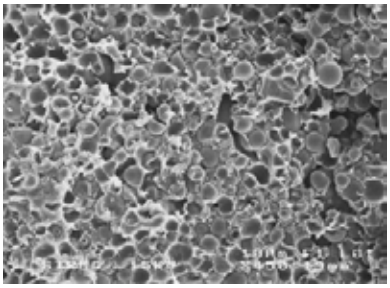


20 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)

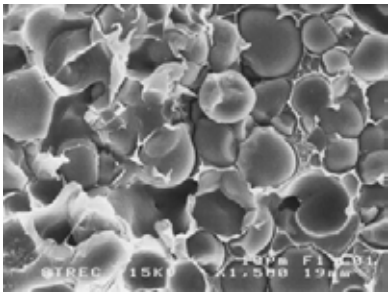


20 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

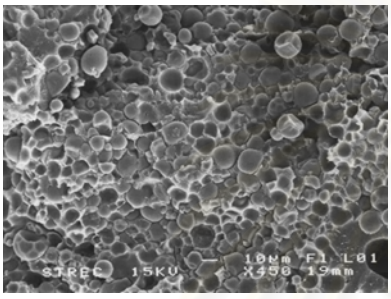
รูปที่ 4.21 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 90/10/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร



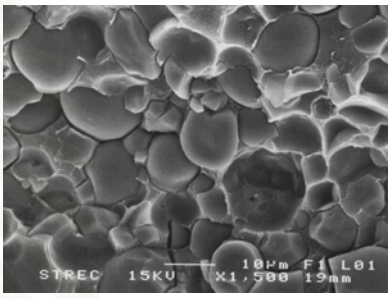
0 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



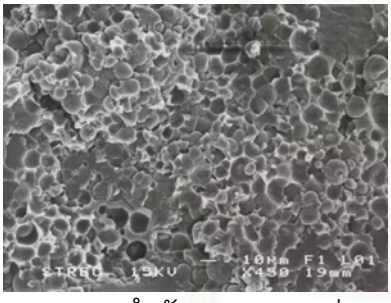
0 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



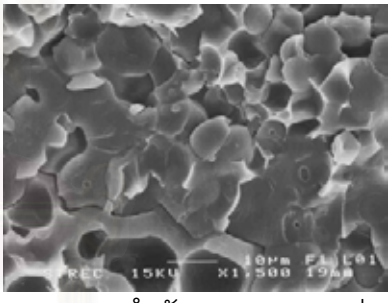
5 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



5 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



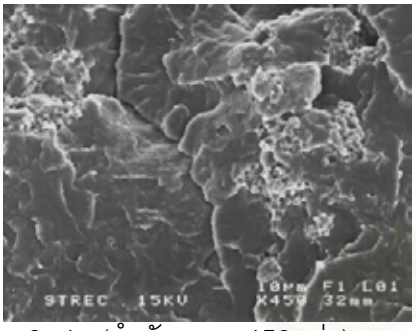
20 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



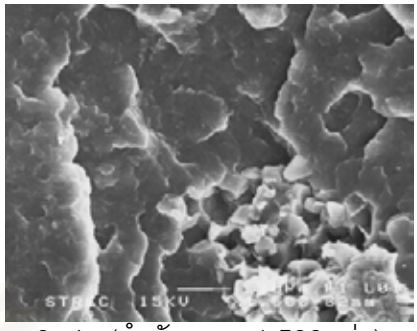
20 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

รูปที่ 4.22 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/ MCSV สูตร 50/50/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

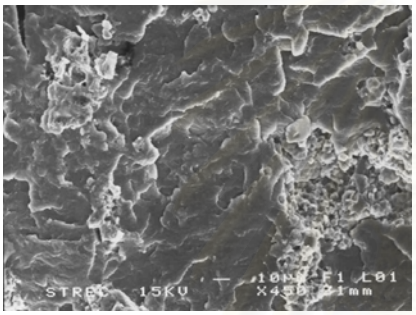
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



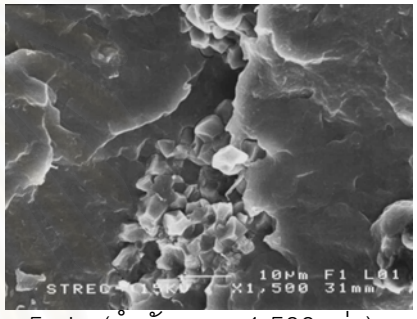
0 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



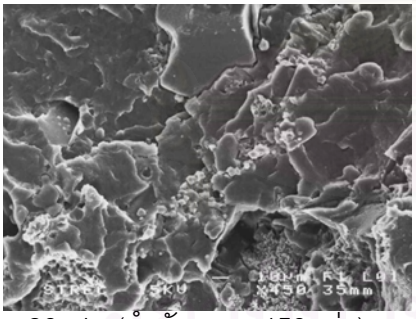
0 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



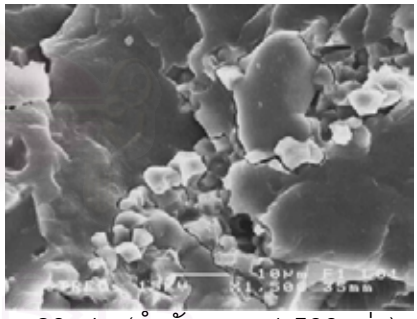
5 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



5 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

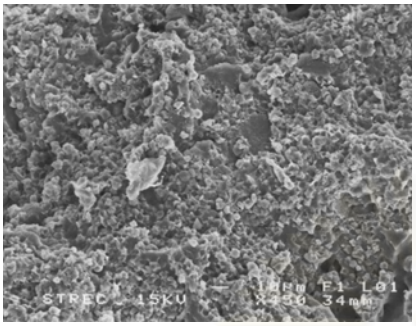


20 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)

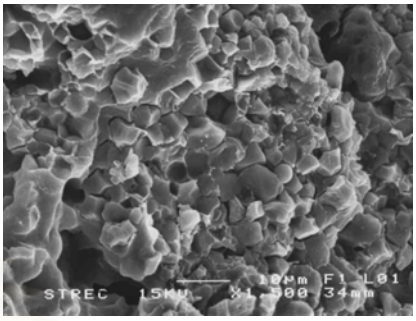


20 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

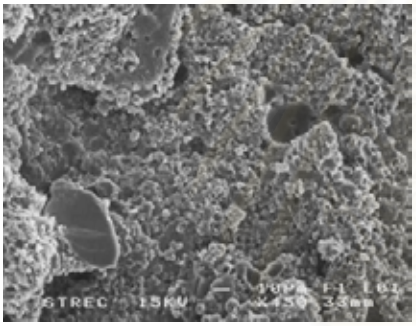
รูปที่ 4.23 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 90/10/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร



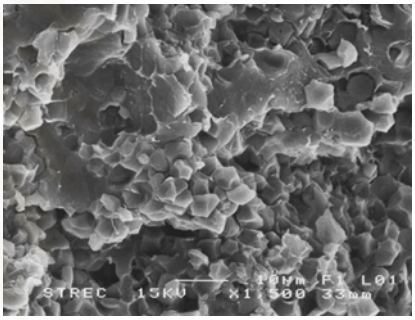
0 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



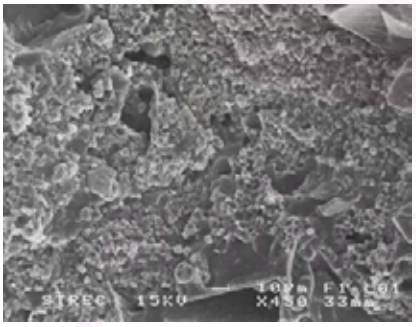
0 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



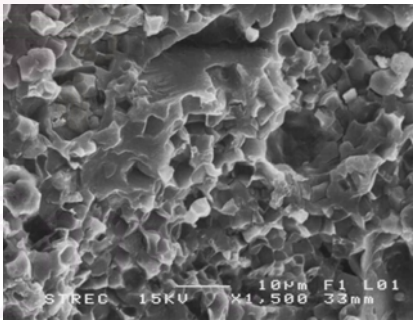
5 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



5 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



20 phr (กำลังขยาย 450 เท่า)



20 phr (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

รูปที่ 4.24 ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 50/50/X เมื่อ X =ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในระบบที่ยังไม่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จะสังเกตเห็นความขรุขระและการเสียสภาพมากขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 และเมื่อเปรียบเทียบพอลิโพรพิลีนที่ผสมแป้งมันสำปะหลังและมีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จะสังเกตเห็นว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงไป มีรอยฉีกขาดจากเสียสภาพชัดเจนกว่าและมีความขรุขระมากกว่า เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร โดยรอยฉีกขาดและความขรุขระนี้จะน้อยลงเมื่อมีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงไปในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเห็นชัดเจนมากเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังไปที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ผสม ส่วนแป้งมันสำปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ผสม จะเห็นว่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ดัดแปร ทำให้ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมไม่มีความแตกต่างกัน

ส่วนในระบบของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ 2 เทคนิคในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม คือ เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิสและดิฟเฟอเรนเชียสแกนนิงแคลอริเมทรี ทั้งนี้เพื่อความครอบคลุมในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมจากพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งดัดแปร

4.4.1 เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิส (Thermogravimetric analysis, TGA)

เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังที่ยังไม่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค TGA พบว่า พอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง โดยพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการสลายตัว 444.09 องศาเซลเซียส ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิการสลายตัวคือ 313.60 องศาเซลเซียส เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนในขั้นแรกต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังเล็กน้อย คือ ที่อัตราส่วนพอลิโพรพิลีนต่อแป้งมันสำปะหลังที่ 90/10 มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นที่ 307.65 องศาเซลเซียส และ 50/50 มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นที่ 310.63 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนในขั้นตอนที่ 2 สูงกว่าพอลิโพรพิลีน คือ อัตราส่วนที่ 90/10 และ 50/50 มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นที่ 456.15 และ 457.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน (PP) แป้งมันสำปะหลัง (CSV) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (MCSV)

PP/CSV/MCSV	จำนวนขั้นตอนการสลายตัว	อุณหภูมิการสลายตัว (^{o}C)
100/0/0	1	444.09
0/100/0	1	313.60
0/0/100	1	271.47

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (PP/CSV/MCSV)

PP/CSV/MCSV	จำนวนขั้นตอนการสลายตัว	อุณหภูมิการสลายตัว (^{o}C)
90/10/0	1	307.65
	2	456.15
90/10/5	1	291.48
	2	452.24
90/10/20	1	281.10
	2	455.53
50/50/0	1	310.63
	2	457.58
50/50/5	1	296.31
	2	459.48
50/50/20	1	283.54
	2	460.40

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีค่าต่ำที่สุดคือ 271.47 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงในพอลิเมอร์ผสม จึงส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ต่ำลงไปด้วย เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวก็ยิ่งต่ำลง กล่าวคือ เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงไปใน

พอลิเมอร์ผสมที่ 5 phr พบว่า ที่อัตราส่วน 90/10 และ 50/50 อุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่ 1 คือ 291.48 และ 296.31 องศาเซลเซียส ถ้าเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ 20 phr พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง คือ 281.10 และ 283.54 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนการสลายตัวในขั้นที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90/10 และ 50/50 ที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 5 phr คือ 452.24 และ 459.48 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถ้าเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ 20 phr พบว่าอุณหภูมิการสลายตัว คือ 455.53 และ 460.40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สำหรับในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวนั้น พอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวเช่นกัน แต่เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน โดยยังไม่ใส่แป้งข้าวเหนียวดัดแปร พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนพอลิโพรพิลีนต่อแป้งข้าวเหนียวที่ 90/10 และ 50/50 มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของของแป้งข้าวเหนียว ซึ่งผลเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน (PP) แป้งข้าวเหนียว (GTN) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (MGTN)

PP/GTN/MGTN	จำนวนขั้นตอนการสลายตัว	อุณหภูมิการสลายตัว (^{o}C)
100/0/0	1	444.09
0/100/0	1	309.23
0/0/100	1	267.39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (PP/GTN/MGTN)

PP/GTN/MGTN	จำนวนขั้นตอนการสลายตัว	อุณหภูมิการสลายตัว (^{o}C)
90/10/0	1	307.43
	2	454.45
90/10/5	1	286.79
	2	454.05
90/10/20	1	272.64
	2	456.16
50/50/0	1	309.69
	2	451.15
50/50/5	1	295.18
	2	459.19
50/50/20	1	287.23
	2	457.95

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิการสลายตัวของข้าวเหนียวดัดแปรมีค่าต่ำที่สุดคือ 267.39 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อผสมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรลงในพอลิเมอร์ผสม จึงส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ต่ำลงไปด้วย เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปรเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวก็ยิ่งต่ำลง กล่าวคือ เมื่อเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรลงไปในพอลิเมอร์ผสมที่ 5 phr พบว่า ที่อัตราส่วน 90/10 และ 50/50 อุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่ 1 คือ 307.43 และ 309.69 องศาเซลเซียส ถ้าเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ 20 phr พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง คือ 272.64 และ 287.23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนการสลายตัวในขั้นที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90/10 และ 50/50 ที่แป้งข้าวเหนียวดัดแปร 5 phr คือ 454.05 และ 459.19 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถ้าเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ 20 phr พบว่าอุณหภูมิการสลายตัว คือ 456.16 และ 457.95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

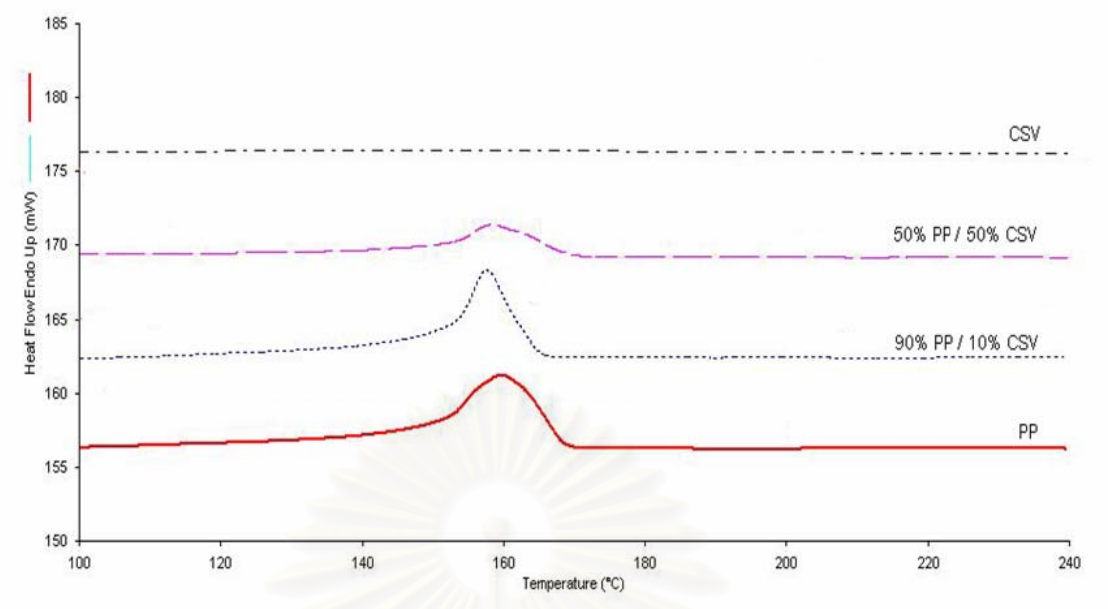
4.4.2 **ดิฟเฟอเรนเชียสสแกนนิงแคลอริเมทรี** (Differential scanning calorimetry, DSC)

เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ มาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาปริมาณความเป็นผลึก (degree of crystalline, %) อุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_C) และอุณหภูมิในการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) โดยทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งดัดแปร ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณความเป็นผลึก อุณหภูมิในการเกิดผลึก และอุณหภูมิในการหลอมเหลว

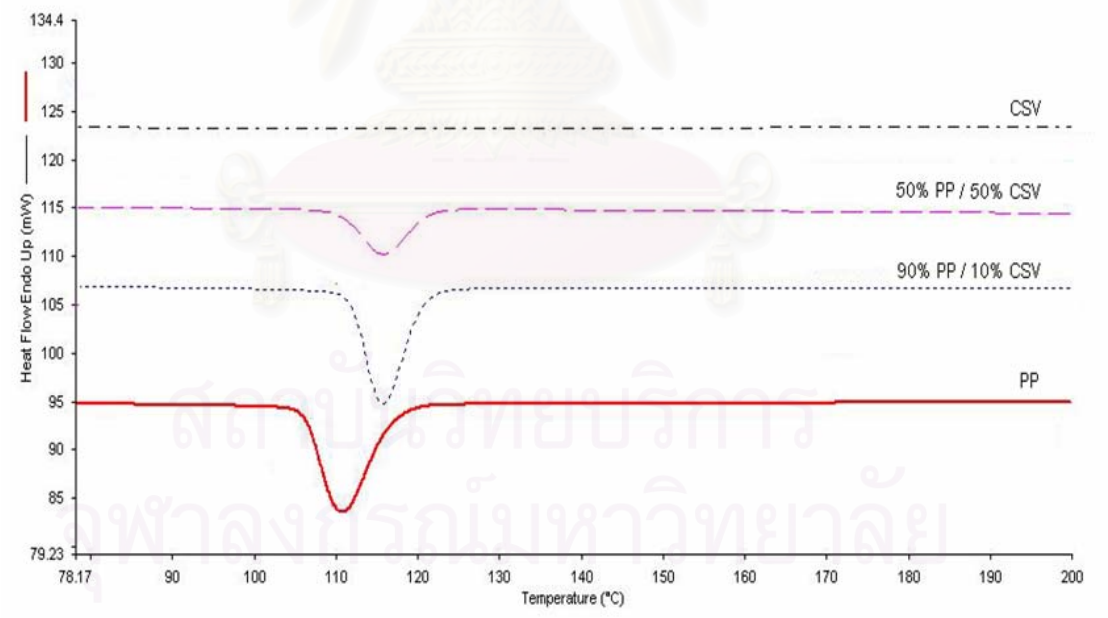
จากผลการตรวจสอบพบว่า ในระบบพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งมันสำปะหลังไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน แต่อุณหภูมิในการเกิดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงไป อาจช่วยเร่งการเกิดผลึกให้กับพอลิเมอร์ผสม ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลัง อุณหภูมิในการเกิดผลึกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิในหลอมเหลวมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.24 ถึง 4.25

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

PP/CSV/MCSV	ปริมาณผลึก (%)	T_m (°C)	T_c (°C)
100/0/0	40.35	160.23	110.94
90/10/0	30.29	158.48	116.12
50/50/0	8.96	158.67	116.01
0/100/0	-	-	-



รูปที่ 4.25 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร



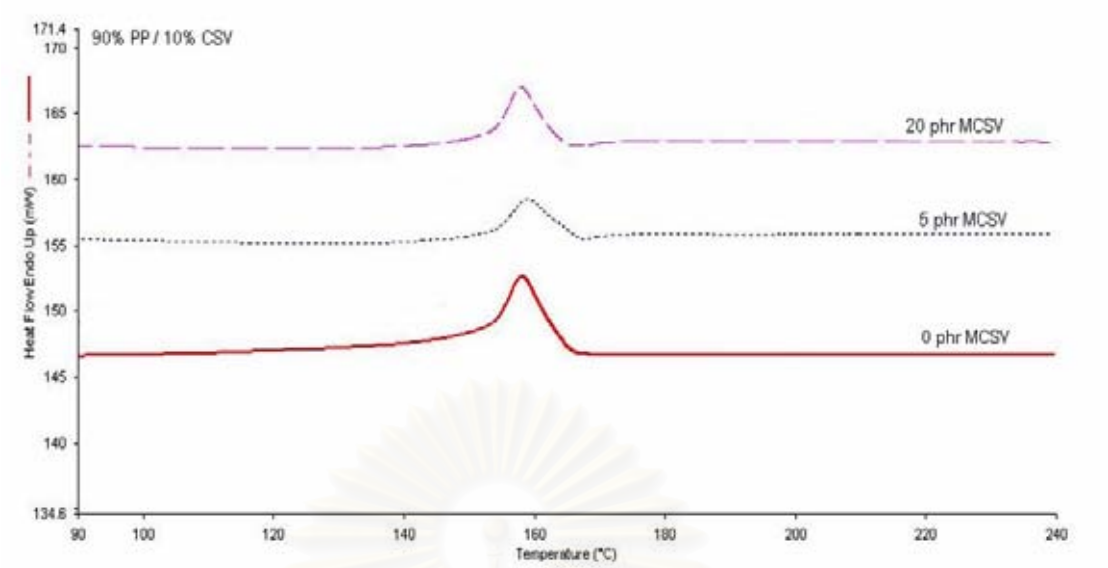
รูปที่ 4.26 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง โดยไม่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

ส่วนในระบบพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไปเพิ่มการขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนมากยิ่งขึ้นไปอีก นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไม่มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการหลอมเหลวและอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม แม้ว่าจะเติมในปริมาณที่สูงก็ตาม ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.27 ถึง 4.30

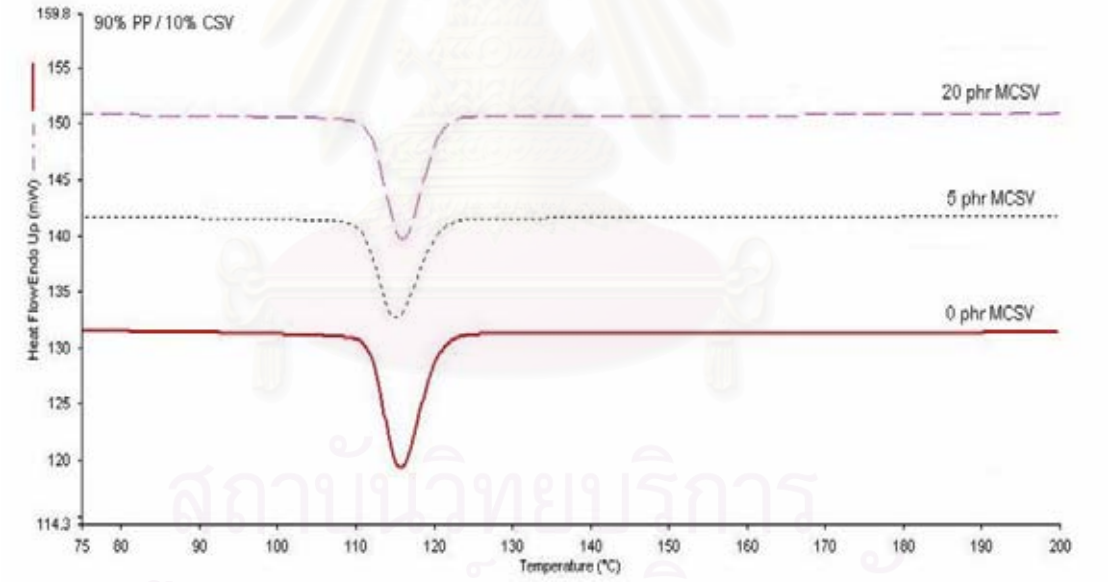
ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง ทั้งที่เติมและไม่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

PP/CSV/MCSV	ปริมาณผลึก(%)	T_m(°C)	T_c(°C)
90/10/0	30.29	158.48	116.12
90/10/5	15.04	159.49	115.7
90/10/20	18.46	158.83	116.11
50/50/0	8.96	158.67	116.01
50/50/5	4.04	158.26	116.63
50/50/20	8.35	160.26	115.49

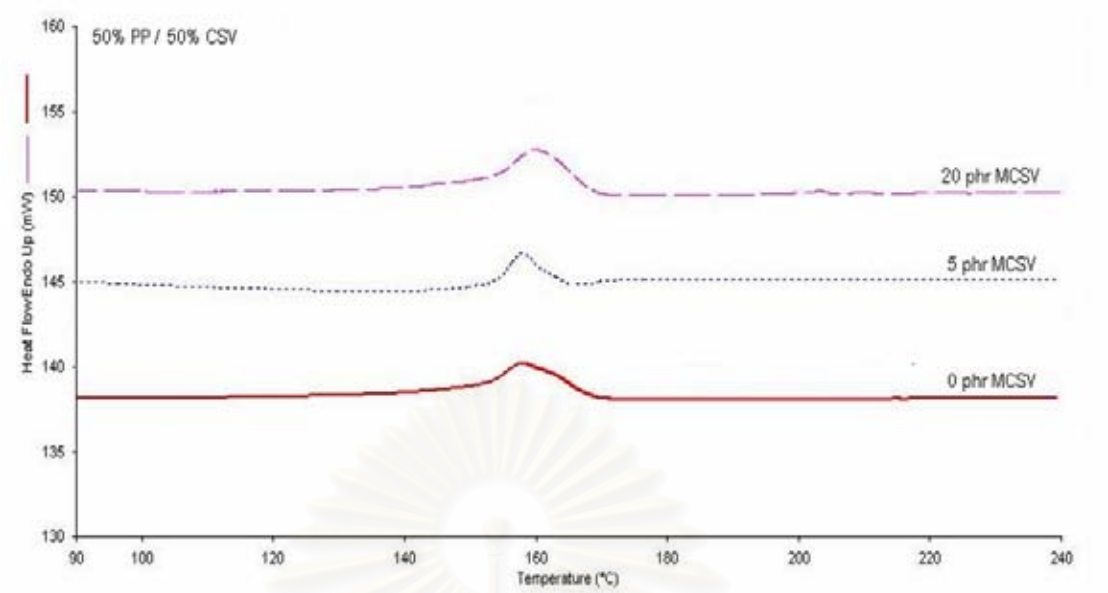
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



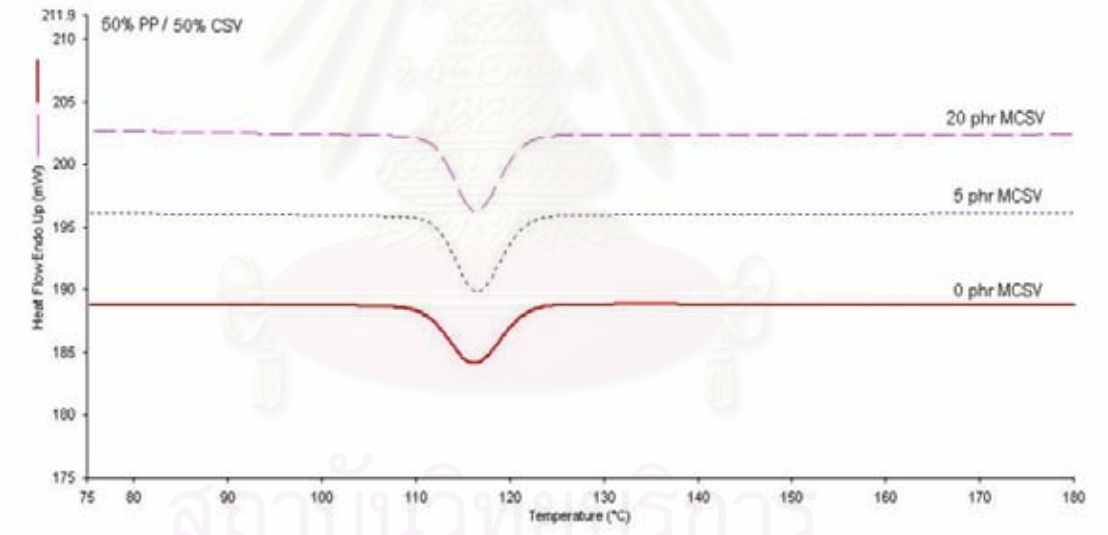
รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร



รูปที่ 4.28 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร



รูปที่ 4.29 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร



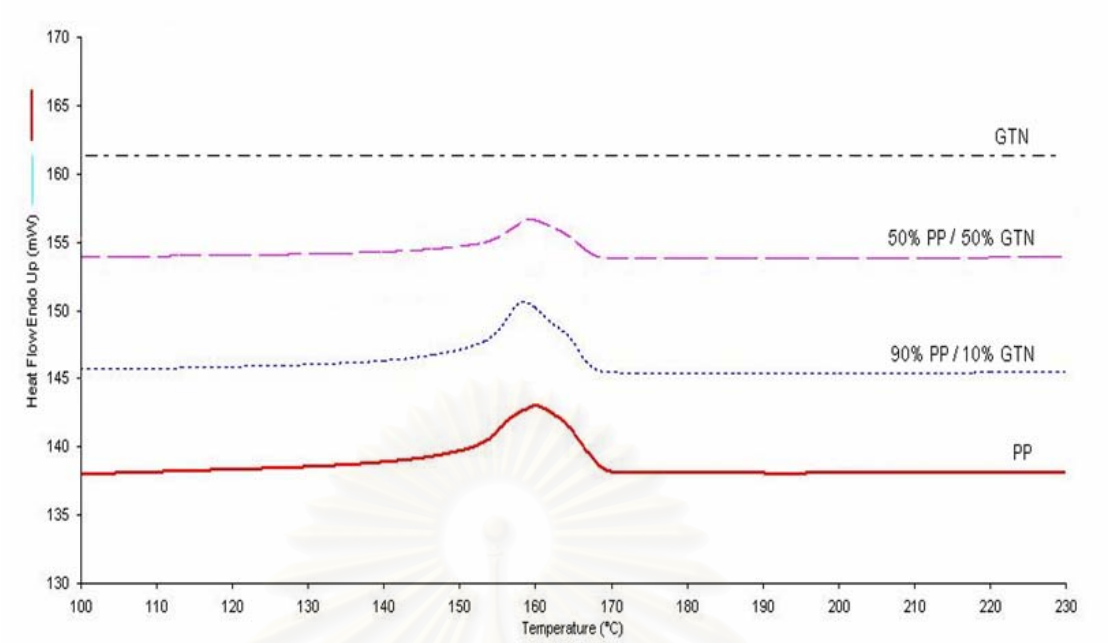
รูปที่ 4.30 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/CSV/MCSV สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

ส่วนในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากขึ้น ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งข้าวเหนียวไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน แต่อุณหภูมิในการเกิดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวที่เติมลงไป อาจช่วยเร่งการเกิดผลึกให้กับพอลิเมอร์ผสม ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียว อุณหภูมิในการเกิดผลึกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิในหลอมเหลวมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.31 ถึง 4.32 ซึ่งผลเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลัง

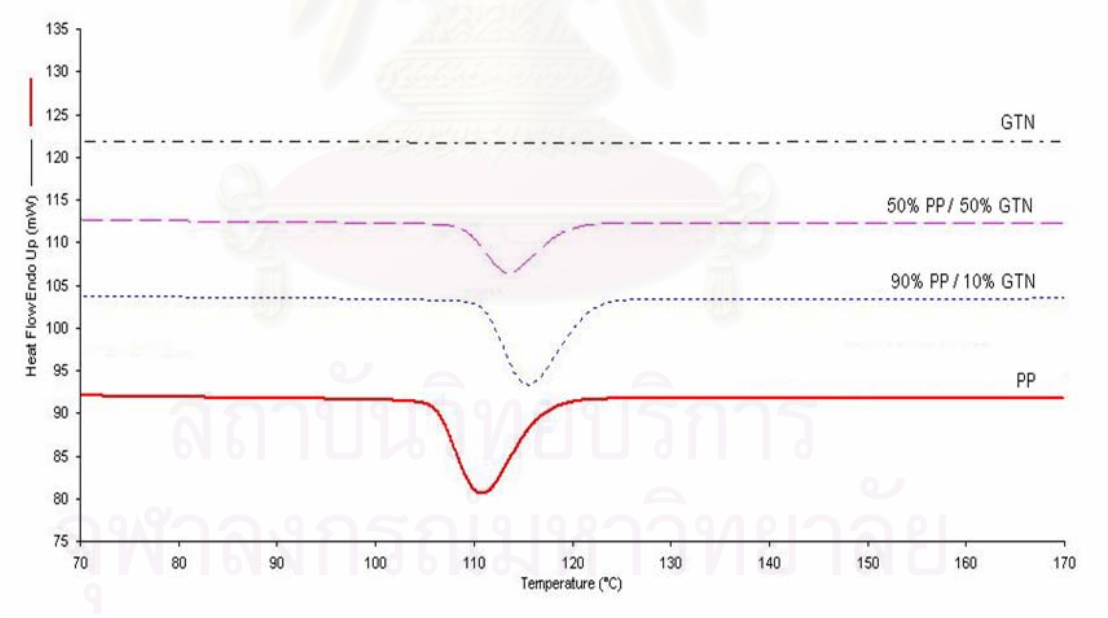
ตารางที่ 4.7 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว โดยไม่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

PP/GTN/MGTN	ปริมาณผลึก (%)	T_m (°C)	T_c (°C)
100/0/0	40.35	160.23	110.94
90/10/0	31.88	158.67	115.6
50/50/0	8.82	159.72	113.85
0/100/0	-	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว โดยไม่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปร



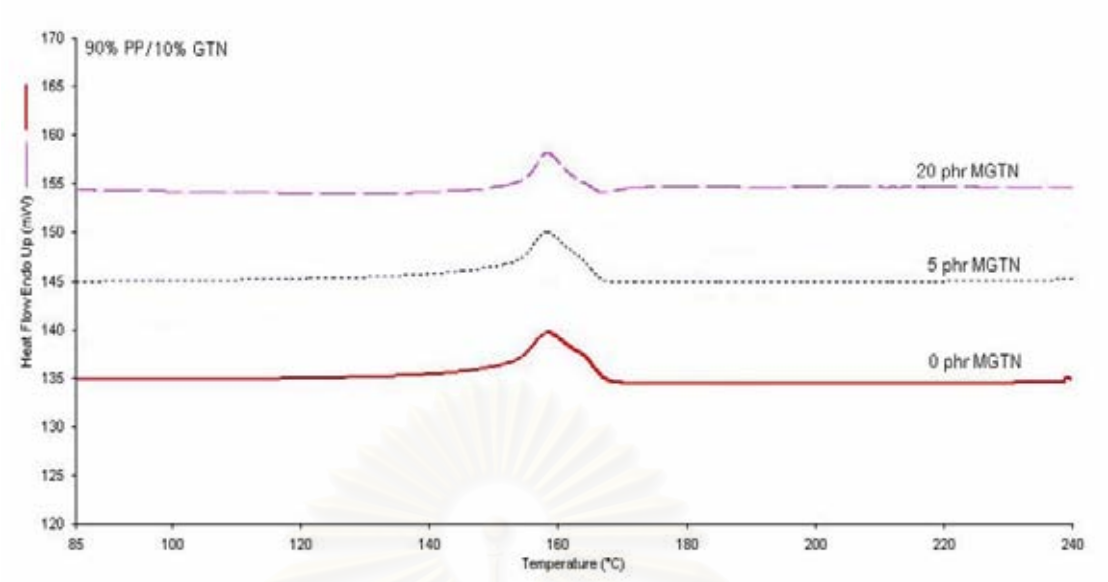
รูปที่ 4.32 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว โดยไม่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

ส่วนในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งแป้งดัดแปรไม่มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการหลอมเหลวและอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.33 ถึง 4.36 ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

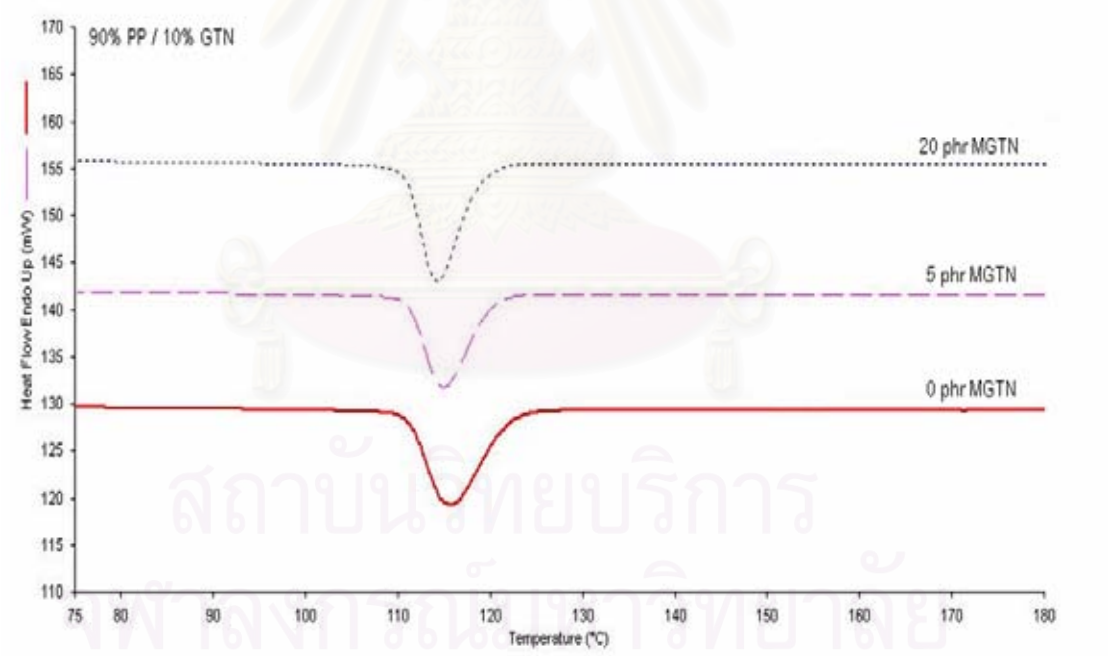
ตารางที่ 4.8 ปริมาณผลึกและอุณหภูมิต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว ทั้งที่เติมและไม่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

PP/GTN/MGTN	ปริมาณผลึก(%)	T_m(°C)	T_c(°C)
90/10/0	31.88	158.67	115.6
90/10/5	26.69	158.27	114.18
90/10/20	15.54	158.30	114.99
50/50/0	8.82	159.72	113.85
50/50/5	8.75	158.83	115.17
50/50/20	7.24	158.95	114.31

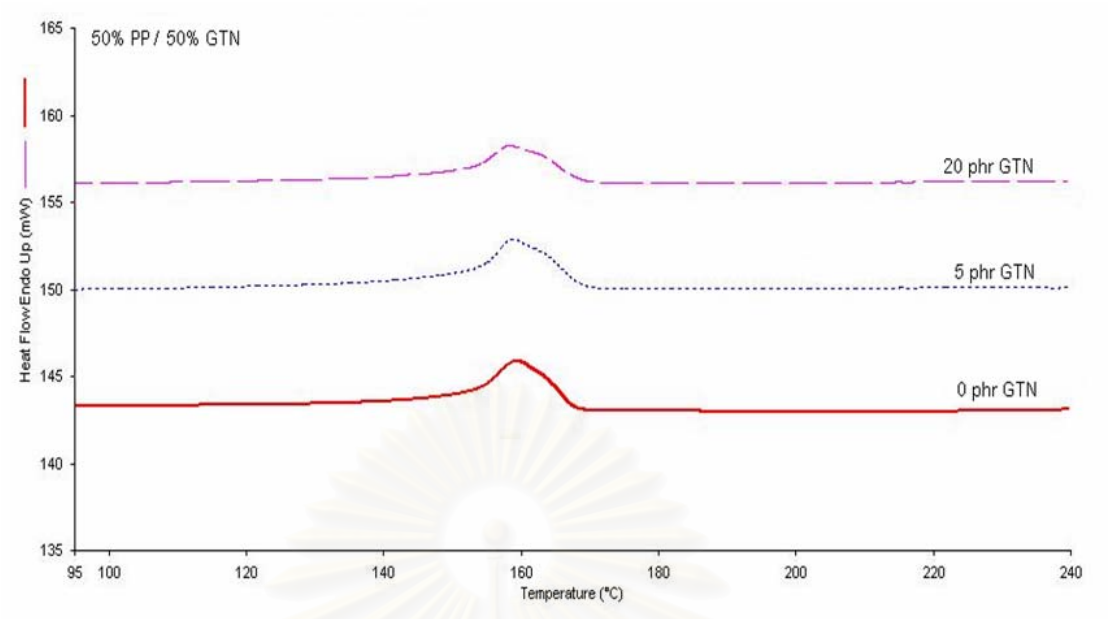
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



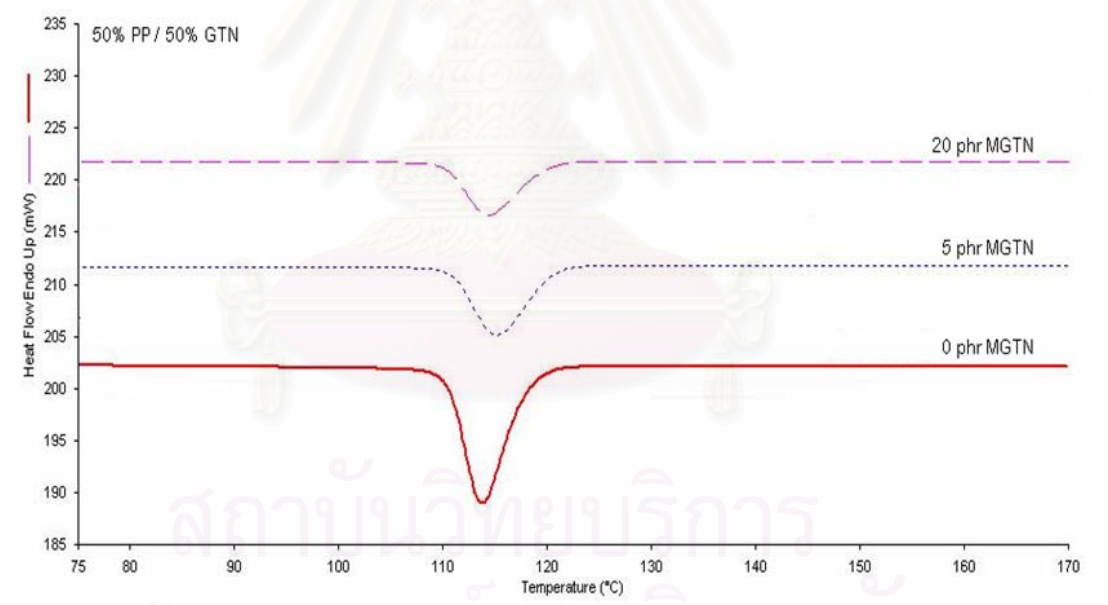
รูปที่ 4.33 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร



รูปที่ 4.34 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 90/10/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร



รูปที่ 4.35 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร



รูปที่ 4.36 เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PP/GTN/MGTN สูตร 50/50/X เมื่อ X = ปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

4.5 ความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.9 ดัชนีความเป็นขั้วของตัวทำละลายที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวทำละลาย	ดัชนีความเป็นขั้ว
เตตระไฮโดรฟิวแรน (THF)	4.2
โทลูอีน (toluene)	2.3
เบนซีน (benzene)	3.0
เมทานอล (methanol)	6.6
ไซลีน (xylene)	2.4
น้ำ (water)	9.0

ตารางที่ 4.10 ความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ที่อุณหภูมิห้องและ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	PP/CSV/MCSV	เตตระไฮโดร-ฟิวแรน	โทลูอีน	เบนซีน	เมทานอล	ไซลีน	น้ำ
อุณหภูมิห้อง	100/0/0	×	×	×	×	×	×
	0/100/0	S	S	S	S	S	S
	0/0/100	S	S	S	S	S	S
	50/50/0	S	S	S	S	S	S
	50/50/5	S	S	S	S	S	S
	50/50/20	S	S	S	S	S	S
60 °C	100/0/0	×	×	×	×	×	×
	0/100/0	S	S	S	S	S	S
	0/0/100	S	S	S	S	S	S
	50/50/0	S	S	S	S	S	S
	50/50/5	S	S	S	S	S	S
	50/50/20	S	S	S	S	S	S

หมายเหตุ: × = ไม่ละลายหรือไม่บวม

S = ไม่ละลายแต่บวม

√ = ละลาย

ตารางที่ 4.11 ความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียวและแป้งมันข้าวเหนียวดัดแปร ที่อุณหภูมิห้องและ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	PP/GTN/MGTN	เตตระไฮโดร-ฟิวแรน	โทลูอีน	เบนซีน	เมทานอล	ไซลีน	น้ำ
อุณหภูมิห้อง	100/0/0	×	×	×	×	×	×
	0/100/0	S	S	S	S	S	S
	0/0/100	S	S	S	S	S	S
	50/50/0	S	S	S	S	S	S
	50/50/5	S	S	S	S	S	S
	50/50/20	S	S	S	S	S	S
60 °C	100/0/0	×	×	×	×	×	×
	0/100/0	S	S	S	S	S	S
	0/0/100	S	S	S	S	S	S
	50/50/0	S	S	S	S	S	S
	50/50/5	S	S	S	S	S	S
	50/50/20	S	S	S	S	S	S

หมายเหตุ: × = ไม่ละลายหรือไม่บวม

S = ไม่ละลายแต่บวม

√ = ละลาย

จากการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสม ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 พบว่า พอลิโพรพิลีนไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดๆ ทั้งสิ้น ณ อุณหภูมิห้อง ถึงแม้เพิ่มอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่มีขั้ว จึงไม่สามารถละลายในตัวทำละลายข้างต้นซึ่งมีขั้วได้

ในกรณีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวสามารถบวมตัวในตัวทำละลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีขั้วอยู่ในโครงสร้าง จากการที่แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างสูง ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอย่างหนาแน่น จึงเหลือหมู่ไฮดรอกซิลที่จะเกิดอันตรกิริยากับตัวทำละลายน้อยลง เมื่อนำมาละลายกับตัวทำละลายที่มีขั้วสูง ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังและ

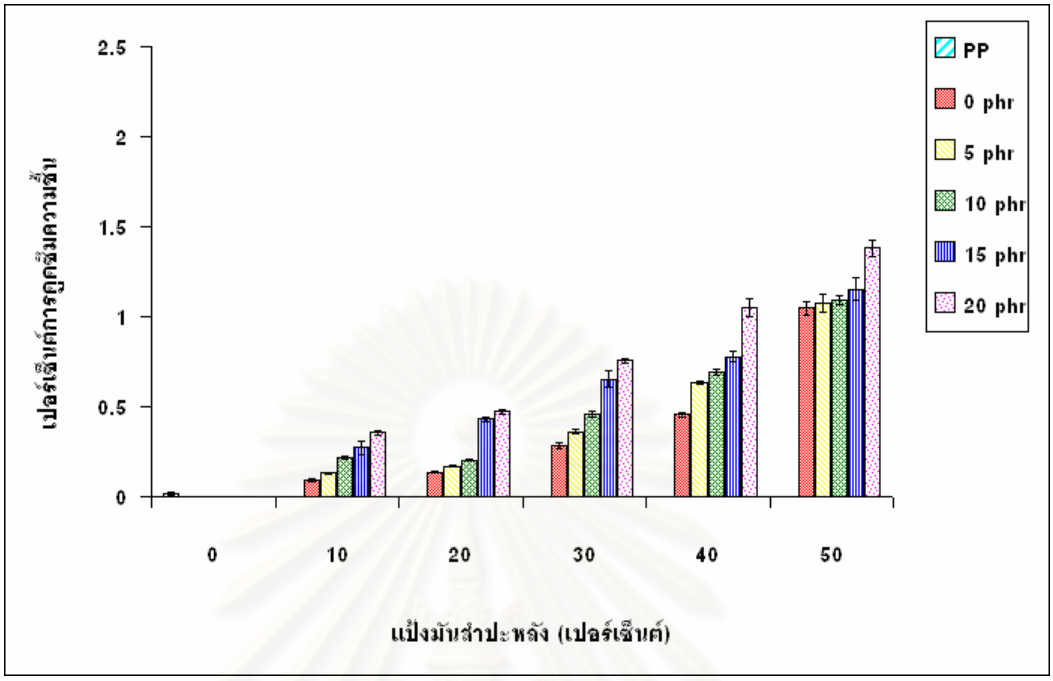
แป้งข้าวเหนียวไม่เกิดการละลายเพียงแต่บวมตัวเฉยๆ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ส่งผลให้ระบบมีพลังงานสูงขึ้น สายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้น ทำให้ตัวทำละลายดังกล่าวสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลได้มากขึ้น แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวบวมตัวเพิ่มจากเดิมอีกเล็กน้อย

ในกรณีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ในโครงสร้างของแป้งดัดแปรจะเกิดหมู่เอสเทอร์ขึ้นแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ทำให้เป็นการลดความสม่ำเสมอในโครงสร้างของแป้ง การจัดเรียงตัวของแป้งดัดแปรจึงหลวมขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของตัวทำละลายสามารถแทรกเข้าไปเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งดัดแปรได้ จึงบวมตัวในทั้งที่อุณหภูมิห้องได้มากกว่าแป้งที่ไม่ดัดแปร เมื่อนำมาละลายในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถบวมตัวได้มากกว่าแป้งที่ไม่ดัดแปร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ระบบมีพลังงานสูงขึ้น สายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้น ส่งผลให้ตัวทำละลายดังกล่าวสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่ได้มากขึ้น ทำให้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวดัดแปรบวมตัวเพิ่มจากเดิมอีกเล็กน้อย

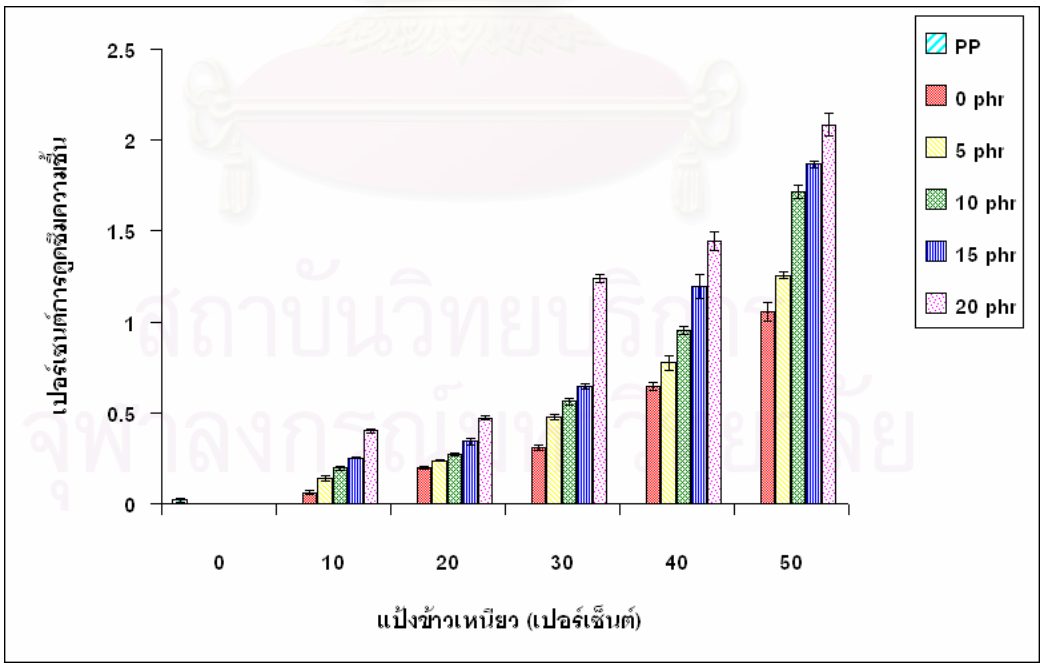
ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร กับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว พอลิโพรพิลีน และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร มีความทนทานต่อสารเคมีที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่ 60 องศาเซลเซียส โดยมีระดับการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความมีขั้วเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้พลังงานในระบบสูงขึ้นด้วย ชิ้นงานจึงสามารถบวมตัวเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



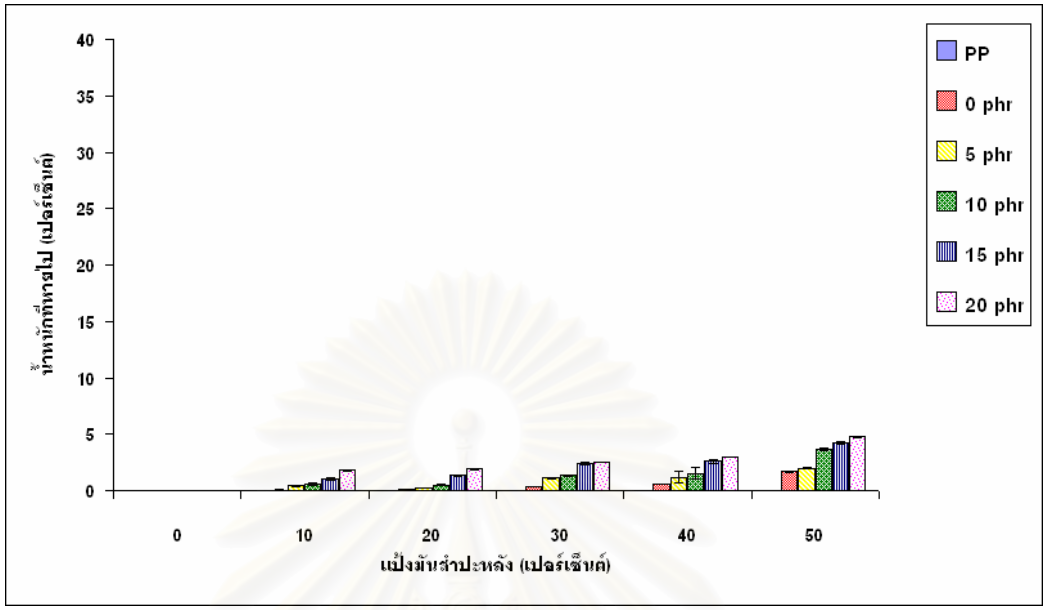
รูปที่ 4.38 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นต่ำมาก เนื่องจากโครงสร้างมีแต่คาร์บอนกับไฮโดรเจน จึงมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงมากขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากในสายโซ่โมเลกุลของแป้งมีหมู่ที่ชอบน้ำ คือ หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ เป็นผลให้สามารถดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นมากจากเดิม เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีโครงสร้างเปิดมากขึ้น ทำให้ความชื้นสามารถแทรกเข้าไปในแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถดูดซึมความชื้นได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่ได้เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียวแสดงผลของการดูดซึมความชื้นเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 4.38

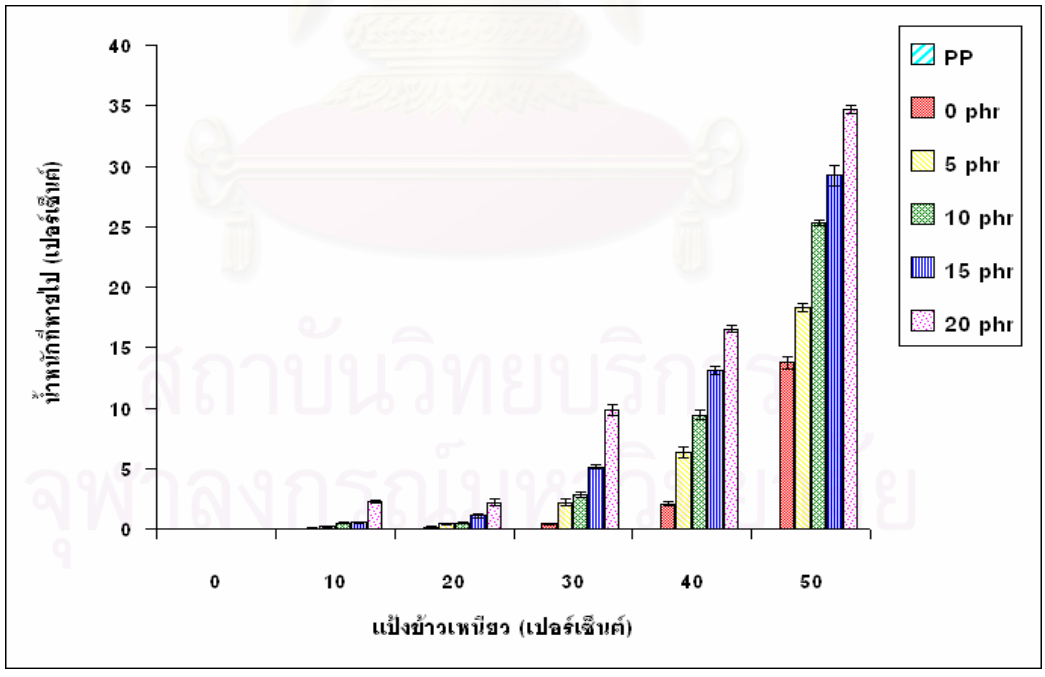
แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งมันสำปะหลังมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว ซึ่งโมเลกุลอะไมโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้อะไมโลสจัดเรียงตัวขนานกันและใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกขึ้น โมเลกุลของน้ำจึงแทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น ส่วนอะไมโลเพกตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลส ประกอบกับการที่มีโซ่สาขาของโมเลกุลอะไมโลเพกติน ทำให้การเกิดผลึกลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.39 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.40 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าเมื่อฝังชิ้นงานเป็นเวลา 30 วัน เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงมากขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากในสายโซ่โมเลกุลของแป้งมีหมู่ที่ชอบน้ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ซึ่งน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน ดังนั้น การเติมแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้มากขึ้น เมื่อทำการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่า เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นมากจากเดิม เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของแป้งดัดแปรมีหมู่ที่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้จุลินทรีย์ในดินเติบโตได้ดีขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจึงย่อยสลายทางชีวภาพได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่ได้เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนและแป้งข้าวเหนียว การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นไปในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 4.40

แต่เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไประหว่างพอลิเมอร์ผสมมีแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบ พบว่า แป้งมันสำปะหลังมีความสามารถในการย่อยสลายที่ต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสสูงกว่า ทำให้ดูดซึมความชื้นได้ต่ำและจุลินทรีย์เติบโตได้น้อยกว่าแป้งข้าวเหนียว ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การผสมแป้งลงในพอลิโพรพิลีนโดยไม่มีแป้งดัดแปร ทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง ประกอบกับความไม่เข้ากันของแป้งและพอลิโพรพิลีน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวต่ำ เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นทดสอบ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ ความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกลดลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน

5.1.2 จากการเกิดจุดบกพร่องในชิ้นทดสอบ อันเนื่องมาจากความไม่เข้ากันของแป้งและพอลิโพรพิลีน จึงทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการขาดหรือแตกหัก ก่อนการยืดตัวและโค้งงอ นอกจากนี้ การเติมแป้งที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าแรงวันเดอร์วาลล์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาด และระยะดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และจากปัจจัยเหล่านี้ ทำให้โดยรวมแล้ว ยังส์มอดุลัสและมอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าของพอลิโพรพิลีน

5.1.3 การเติมแป้งดัดแปร ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลขึ้น ทำให้ยังส์มอดุลัสและมอดุลัสดัดโค้งมีค่าสูงขึ้น แต่ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดดึงและระยะดัดโค้งจึงลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นนี้ ยังไม่เพียงพอที่จะชดเชย ปริมาณผลึกที่ลดลงไป ดังนั้น โดยรวมจึงส่งผลให้ความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง

5.1.4 การเติมแป้งดัดแปรซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำกว่าแป้งไม่ดัดแปร ส่งให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง

5.1.5 แป้งที่เติมลงไปในพอลิโพรพิลีน อาจช่วยเร่งการเกิดผลึก จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าพอลิโพรพิลีน โดยปริมาณและชนิดของแป้งดัดแปรไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าว

5.1.6 การผสมแป้ง ทั้งที่ดัดแปรและไม่ดัดแปร ลงในพอลิโพรพิลีน ไม่มีผลต่อสมบัติการละลายมากนัก

5.1.7 การเติมแป้งดัดแปรลงไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและแป้ง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมความชื้นและเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมแป้งดัดแปร ทั้งนี้เพราะแป้งดัดแปรมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลจึงไม่แน่นหนา ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ในพอลิเมอร์ผสมจากแป้งข้าวเหนียวและพอลิโพรพิลีนสามารถดูดซึมความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิโพรพิลีน เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง น้ำและจุลินทรีย์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ง่ายกว่า

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนกับแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 90:10 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 10 phr กับที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนกับแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 90:10 และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร 10 phr มีสมบัติโดยรวมดีกว่าพอลิเมอร์ที่เตรียมจากสูตรอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น

5.2.2 ควรศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่น เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้หลากหลาย เช่น พอลิสไตรีน เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1.ชลดา ฤตวิรุฬห์. เอกสารประกอบการสอนวิชาหัวข้อที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544.

2.ณัฐวุฒิ หาญเม่ง, ธนัฒ อ่อนวงศ์ และปรียานุช อันติมานนท์. อิทธิพลของสภาวะการขึ้นรูปด้วยการฉีดที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนผสมแป้งมันสำปะหลัง. ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร 2544.

3.ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2527.

4.กล้าณรงค์ ศรีรอต. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพมหานคร ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

5.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาการดัดแปรพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547.

6.Pimpan, V.; Ratanarat, K.; and Pongchawanakul, M. Preliminiary study on preparation of biodegradable plastic from modified cassava starch. Journal of Scientific Research Chulalongkorn University 26(2001): 117-125.

7.สมพร รุ่งสัมพันธ์กุล และสุพิชญา ชื่นชนม์. ภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวเพื่อใช้ในการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544

8.Santayanon, R.; and Wootthikanokkhan, J. Modification of cassava starch by using propionic anhydride and properties of the starch-blended polyester polyurethane. Carbohydrate Polymers 51(2003): 17-24.

9.Mani, R.; and Bhattacharya, M. Properties of injection moulded starch/synthetic polymer blends III effect of amylopectin to amylose ratio in starch. European Polymer Journal 34(1998): 1467-1475.

10.Chandra, R.; and Rustgi, R. Biodegradation of maleated linear low-density polyethylene and starch blends. Polymer Degradation and Stability 56(1997): 185-202.

11.Ramani, N.; Ramsay, J. A.; and Vergooht, H. Method of preparing biodegradable modified-starch moldable product and films. United States Patent 5(1999): 889, 847.

12.Predroso, A.G.; and Rosa, D. S. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. Carbohydrate Polymers 59(2005): 1-9.

13.Piyush B.; Bandopadhyay S.; and Jayesh R. Environmentally degradable starch filled low density polyethylene. Polymer Degradation and Stability 47(1995): 165-173.

14.จักรกฤษณ์ โสวิรัชน์ และศรายุทธ์ คูสกุล. การเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากแป้งธรรมชาติดัดแปรชนิดต่างๆ. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544.

15.นรศิษฎ์ จันทรกูล. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547.

16.สุภสิทธิ์ ผู้มีโชคชัย. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

17.Naryan, R.; Bloembergen, S.; and Lathia, A. United States Patent 5(1999): 869, 647.

18.Kiatkamjornwonwong, S.; Sonsuk, M.; Wittayapichet, S.; Prasassarakich, P.; and Vejjanukroh, P. Degradation of styrene-g-cassava starch filled polystyrene plastics. Polymer Degradation and Stability 66(1999): 323-335.

19.Zuchowska, D.; Steller, R.; and Meissner W. Structure and properties of degradable polyolefin-starch blends. Polymer Degradation and Stability 60(1998): 471-480.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ก.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจากพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

ก.1.1 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

ก.1.1.1 พอลิโพรพิลีน

PP	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	36.04	20.36	357.02
2	33.83	20.29	323.33
3	34.87	21.31	346.61
4	35.82	20.01	369.58
5	34.91	20.39	333.56
Average	35.09 ± 0.88	20.47 ± 0.49	346.02 ±18.35

ก.1.1.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

90% PP / 10% CSV 0 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	27.93	21.73	303.10
2	28.28	22.80	300.96
3	28.44	21.83	304.86
4	28.26	22.58	282.37
5	26.82	21.16	277.24
Average	27.95 ± 0.65	22.02 ± 0.67	293.71 ± 12.89

90% PP / 10% CSV 5 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	25.19	18.26	352.08
2	26.21	22.63	342.24
3	25.84	19.78	276.85
4	25.41	22.05	289.29
5	25.30	18.60	328.99
Average	25.59 ± 0.43	20.26 ± 1.99	317.89 ± 33.12

90% PP / 10% CSV 10 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	23.67	18.26	338.94
2	23.13	17.63	313.70
3	24.07	19.78	336.76
4	24.57	18.05	335.97
5	22.55	18.60	310.88
Average	23.60 ± 0.79	18.46 ± 0.81	327.25 ± 13.74

90% PP / 10% CSV 15 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	20.47	14.50	317.54
2	21.84	11.80	369.51
3	22.87	14.41	388.68
4	21.25	14.36	316.523
5	22.35	13.03	302.07
Average	21.75 ± 0.94	13.62 ± 1.18	338.87 ± 37.84

90% PP / 10% CSV 20 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	19.15	12.24	324.33
2	21.47	10.89	330.59
3	20.06	12.49	342.92
4	20.92	11.46	406.94
5	19.35	11.76	385.99
Average	20.19 ± 1.00	11.77 ± 0.63	358.15 ± 36.37

80% PP / 20% CSV 0 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	21.43	19.01	298.62
2	20.85	18.93	321.40
3	22.19	18.95	304.62
4	20.69	19.09	312.77
5	22.42	19.00	333.07
Average	21.52 ± 0.78	19.00 ± 0.06	314.10 ± 13.64

80% PP / 20% CSV 5 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	20.18	14.45	350.85
2	20.05	14.69	341.45
3	19.96	14.19	426.00
4	19.35	14.01	376.67
5	20.57	13.53	400.04
Average	20.02 ± 0.44	14.17 ± 0.44	379.00 ± 34.86

80% PP / 20% CSV 10 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	18.50	16.93	313.14
2	19.87	18.52	339.10
3	18.72	13.07	338.31
4	18.08	13.32	312.66
5	18.23	15.64	320.62
Average	18.68 ± 0.71	15.50 ± 2.34	324.77 ± 13.11

80% PP / 20% CSV 15 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	17.39	10.13	376.90
2	18.10	13.70	343.40
3	18.03	12.24	347.27
4	18.76	13.02	328.62
5	16.13	10.18	360.80
Average	17.68 ± 0.99	11.85 ± 1.64	351.40 ± 18.29

80% PP / 20% CSV 20 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	15.85	8.41	348.87
2	15.56	7.74	358.91
3	15.81	10.87	393.81
4	15.48	8.07	412.99
5	15.47	9.86	339.62
Average	15.63 ± 0.18	8.99 ± 1.33	370.84 ± 31.24

70% PP / 30% CSV 0 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	18.11	15.11	292.75
2	17.71	11.37	365.66
3	18.07	17.01	287.68
4	18.21	16.46	319.32
5	18.41	15.60	390.97
Average	18.10 ± 0.26	15.11 ± 2.22	331.28 ± 45.48

70% PP / 30% CSV 5 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	16.95	14.22	337.90
2	16.89	9.86	358.67
3	17.18	9.65	424.12
4	17.38	11.39	325.92
5	17.42	12.72	364.03
Average	17.16 ± 0.24	11.57 ± 1.93	362.13 ± 37.93

70% PP / 30% CSV 10 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	15.90	8.21	433.24
2	15.21	8.93	423.94
3	17.03	9.92	442.57
4	15.91	8.79	382.11
5	16.17	8.36	390.71
Average	16.04 ± 0.66	8.84 ± 0.67	414.51 ± 26.66

70% PP / 30% CSV 15 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	14.88	8.28	417.42
2	14.17	9.39	427.59
3	14.12	9.50	415.40
4	13.44	9.26	372.66
5	13.98	7.45	404.64
Average	14.12 ± 0.51	8.78 ± 0.88	407.54 ± 21.13

70% PP / 30% CSV 20 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	12.54	6.61	394.72
2	14.21	7.04	478.97
3	13.33	6.24	455.03
4	13.25	9.55	427.43
5	12.53	8.20	370.27
Average	13.17 ± 0.69	7.53 ± 1.35	425.28 ± 43.97

60% PP / 40% CSV 0 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	14.35	12.11	479.08
2	14.64	11.39	393.98
3	14.90	9.85	391.07
4	13.73	11.83	467.24
5	13.96	9.72	413.45
Average	14.31 ± 0.48	10.98 ± 1.12	428.96 ± 41.46

60% PP / 40% CSV 5 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	13.40	11.02	459.21
2	13.38	9.64	474.14
3	12.28	9.40	455.66
4	13.26	7.36	595.91
5	13.10	11.56	411.96
Average	13.08 ± 0.47	9.80 ± 1.64	479.38 ± 69.14

60% PP / 40% CSV 10 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	15.03	7.06	831.18
2	16.21	7.61	830.02
3	15.26	7.42	828.24
4	15.55	9.83	806.82
5	14.43	9.45	722.15
Average	15.30 ± 0.65	8.27 ± 1.27	803.68 ± 46.66

60% PP / 40% CSV 15 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	10.74	10.33	589.75
2	11.81	7.012	692.91
3	11.07	10.75	582.53
4	11.77	9.79	553.91
5	12.60	7.39	621.62
Average	11.60 ± 0.72	9.05 ± 1.73	608.15 ± 53.16

60% PP / 40% CSV 20 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	10.823	6.09	687.08
2	10.53	7.57	637.73
3	9.50	10.29	673.99
4	9.82	8.79	620.86
5	10.32	9.36	579.80
Average	10.20 ± 0.53	8.42 ± 1.63	639.89 ± 42.92

50% PP / 50% CSV 0 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	12.77	5.21	413.92
2	12.57	6.58	455.57
3	11.73	6.65	410.06
4	11.75	5.89	389.61
5	11.26	5.20	368.22
Average	12.02 ± 0.63	5.91 ± 0.70	407.48 ± 32.49

50% PP / 50% CSV 5 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	7.22	7.52	456.45
2	8.78	5.77	505.39
3	8.33	7.60	400.30
4	7.95	5.15	423.11
5	8.78	6.11	448.17
Average	8.21 ± 0.66	6.43 ± 1.09	446.68 ± 39.53

50% PP / 50% CSV 10 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	10.94	5.07	414.41
2	12.11	6.17	452.36
3	11.96	5.35	417.15
4	11.36	5.06	411.83
5	11.76	5.59	464.65
Average	11.63 ± 0.48	5.45 ± 0.46	432.08 ± 24.58

50% PP / 50% CSV 15 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	11.56	5.16	404.82
2	10.71	4.83	386.76
3	10.82	4.74	408.88
4	11.38	4.58	495.01
5	10.35	6.34	474.46
Average	10.96 ± 0.50	5.13 ± 0.71	433.99 ± 47.63

50% PP / 50% CSV 20 phr MCSV	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	11.65	5.39	515.44
2	9.86	4.86	455.91
3	11.33	4.57	520.29
4	10.10	5.33	393.27
5	10.98	6.14	424.63
Average	10.78 ± 0.78	5.26 ± 0.60	461.91 ± 55.70

ก.1.1.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

90% PP / 10% GTN 0 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	28.53	21.40	279.03
2	27.33	18.71	274.61
3	28.39	16.81	294.13
4	28.92	17.14	289.08
5	28.78	19.32	290.50
Average	28.39 ± 0.63	18.68 ± 1.85	285.47 ± 8.26

90% PP / 10% GTN 5 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	26.37	13.11	391.92
2	26.34	13.03	353.11
3	25.97	13.41	353.63
4	26.18	13.53	327.53
5	25.36	11.60	307.80
Average	26.04 ± 0.41	12.94 ± 0.78	346.80 ± 31.68

90% PP / 10% GTN 10 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	23.20	12.59	367.34
2	22.56	11.95	370.37
3	24.15	10.36	417.54
4	23.55	12.93	357.82
5	24.28	13.14	383.43
Average	23.55 ± 0.71	12.19 ± 1.12	379.30 ± 23.25

90% PP / 10% GTN 15 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	20.87	11.07	389.08
2	21.52	12.03	392.00
3	20.87	11.35	373.94
4	21.99	12.68	389.37
5	21.88	12.19	400.83
Average	21.42 ± 0.54	11.86 ± 0.65	389.04 ± 9.70

90% PP / 10% GTN 20 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	21.60	10.59	391.92
2	21.35	11.33	353.11
3	21.41	11.69	353.63
4	19.49	12.37	327.53
5	20.85	12.12	307.80
Average	20.94 ± 0.86	11.62 ± 0.70	346.80 ± 31.68

80% PP / 20% GTN 0 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	23.78	15.34	279.70
2	22.99	16.72	327.79
3	23.76	16.56	298.45
4	22.17	13.98	337.42
5	24.07	14.02	293.81
Average	23.35 ± 0.77	15.32 ± 1.32	307.44 ± 24.23

80% PP / 20% GTN 5 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	20.01	15.07	317.21
2	22.04	13.80	357.56
3	21.33	11.61	324.01
4	21.95	10.45	322.45
5	20.74	15.91	355.15
Average	21.21 ± 0.85	13.37 ± 2.30	335.28 ± 19.43

80% PP / 20% GTN 10 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	19.05	13.03	359.36
2	19.31	10.94	358.43
3	18.55	12.10	312.65
4	19.29	12.43	340.73
5	19.56	14.86	309.58
Average	19.15 ± 0.38	12.67 ± 1.44	336.15 ± 24.05

80% PP / 20% GTN 15 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	17.93	7.76	357.84
2	19.07	11.60	353.83
3	17.64	13.45	316.12
4	18.85	9.43	374.99
5	18.86	11.54	320.92
Average	18.47 ± 0.64	10.76 ± 2.20	344.74 ± 25.28

80% PP / 20% GTN 20 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	14.14	11.06	391.73
2	15.22	11.99	413.42
3	14.22	10.38	416.12
4	15.48	10.04	427.43
5	15.58	10.71	327.43
Average	14.93 ± 0.70	10.84 ± 0.75	395.23 ± 40.04

70% PP / 30% GTN 0 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	18.63	9.67	322.61
2	18.11	13.42	260.44
3	18.19	14.40	337.47
4	18.99	12.41	296.69
5	18.96	9.45	327.69
Average	18.58 ± 0.41	11.87 ± 2.23	308.98 ± 31.04

70% PP / 30% GTN 5 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	18.51	8.85	410.10
2	18.05	8.79	356.14
3	18.45	8.14	411.25
4	19.46	9.38	388.01
5	18.16	8.39	368.56
Average	18.53 ± 0.56	8.71 ± 0.47	386.81 ± 24.57

70% PP / 30% GTN 10 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	13.27	10.80	326.77
2	14.79	8.68	417.35
3	15.13	10.20	359.40
4	14.24	8.82	379.11
5	14.34	10.96	407.22
Average	14.35 ± 0.71	9.89 ± 1.08	377.97 ± 36.66

70% PP / 30% GTN 15 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	15.24	7.69	375.17
2	15.66	7.76	421.79
3	15.83	7.90	368.06
4	14.70	9.34	421.57
5	15.75	7.42	373.26
Average	15.44 ± 0.47	8.02 ± 0.76	391.97 ± 27.25

70% PP / 30% GTN 20 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	11.83	9.86	443.56
2	11.70	10.02	444.94
3	10.99	6.56	425.78
4	12.21	6.81	372.68
5	12.91	6.86	376.88
Average	11.91 ± 0.73	8.02 ± 1.76	412.77 ± 35.52

60% PP / 40% GTN 0 phr MGTN	Tensile strength (Mpa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	14.97	12.05	300.17
2	13.93	12.19	349.82
3	13.24	10.72	357.58
4	14.09	11.14	289.62
5	13.61	10.86	354.85
Average	13.97 ± 0.65	11.39 ± 0.68	330.41 ± 32.75

60% PP / 40% GTN 5 phr MGTN	Tensile strength (Mpa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	13.11	8.69	368.07
2	11.74	7.20	349.07
3	12.63	6.83	348.55
4	13.06	7.80	402.86
5	12.91	7.13	319.96
Average	12.69 ± 0.56	7.53 ± 0.74	357.70 ± 30.53

60% PP / 40% GTN 10 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (Mpa)
1	11.95	9.07	331.19
2	11.22	8.55	394.33
3	10.46	8.08	301.04
4	11.91	6.56	323.29
5	10.63	7.08	379.22
Average	11.23 ± 0.70	7.87 ± 1.04	345.82 ± 39.36

60% PP / 40% GTN 15 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (Mpa)
1	10.92	7.49	365.46
2	11.56	8.65	337.98
3	11.68	6.01	394.38
4	12.41	6.94	320.64
5	10.76	6.51	287.37
Average	11.47 ± 0.66	7.12 ± 1.01	341.16 ± 41.07

60% PP / 40% GTN 20 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	12.01	5.55	364.01
2	13.30	8.05	409.24
3	12.89	5.40	374.83
4	12.00	4.90	380.58
5	11.88	6.72	413.07
Average	12.41 ± 0.64	6.13 ± 1.27	388.35 ± 21.70

50% PP / 50% GTN 0 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	8.36	8.40	395.26
2	9.20	8.58	385.25
3	10.01	9.49	395.73
4	9.38	8.37	359.84
5	9.05	6.83	366.31
Average	9.20 ± 0.60	8.33 ± 0.96	380.48 ± 16.59

50% PP / 50% GTN 5 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	9.02	5.80	380.85
2	10.09	6.64	397.35
3	9.44	5.33	376.99
4	8.61	4.89	457.43
5	10.93	6.09	476.58
Average	9.62 ± 0.92	5.75 ± 0.67	417.84 ± 46.03

50% PP / 50% GTN 10 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	9.35	6.66	391.21
2	10.22	5.94	401.92
3	11.27	6.55	465.22
4	11.57	5.65	418.39
5	10.23	7.62	376.12
Average	10.53 ± 0.89	6.48 ± 0.76	410.57 ± 34.22

50% PP / 50% GTN 15 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	11.24	5.34	384.25
2	11.96	5.43	446.75
3	10.48	6.64	422.37
4	11.38	6.04	404.75
5	10.05	5.93	399.89
Average	11.02 ± 0.76	5.88 ± 0.53	411.60 ± 23.89

50% PP / 50% GTN 20 phr MGTN	Tensile strength (MPa)	% Elongation at maximum load	Young's modulus (MPa)
1	9.37	5.44	421.04
2	9.22	4.67	484.49
3	11.43	5.29	458.61
4	9.96	4.85	504.77
5	9.00	5.22	511.17
Average	9.80 ± 0.98	5.10 ± 0.32	476.02 ± 36.95

ก.1.2 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง

ก.1.2.1 พอลิโพรพิลีน

PP	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	10.26	10.26	1832
2	10.60	10.60	1891
3	9.88	9.88	1873
4	9.67	9.67	1916
5	10.30	10.30	1865
Average	10.14 ± 0.37	10.14 ± 0.37	1875.40 ± 31.18

ก.1.2.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

90% PP / 10% CSV 0 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	52.50	9.58	1847
2	52.39	10.00	1763
3	52.14	9.58	1733
4	49.67	9.65	1707
5	51.57	10.03	1810
Average	51.65 ± 1.17	9.77 ± 0.23	1772 .00± 56.78

90% PP / 10% CSV 5 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	47.54	9.73	1820
2	46.48	9.77	1891
3	42.64	9.88	1773
4	42.65	9.23	1786
5	46.79	9.61	1762
Average	45.22 ± 2.38	9.64 ± 0.25	1806.40 ± 52.07

90% PP / 10% CSV 10 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	48.77	9.50	1864
2	49.85	9.65	1901
3	46.86	8.70	1859
4	54.89	10.11	1969
5	46.80	9.46	1755
Average	49.43 ± 3.31	9.48 ± 0.51	1869.60 ± 77.69

90% PP / 10% CSV 15 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	44.00	9.16	1898
2	38.72	5.80	1917
3	49.72	9.58	1906
4	43.86	8.01	1872
5	45.53	8.43	1924
Average	44.37 ± 3.95	8.19 ± 1.47	1903.4 ± 20.19

90% PP / 10% CSV 20 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	44.45	8.24	1976
2	47.81	6.79	1918
3	42.13	8.51	1899
4	45.26	7.29	2058
5	40.16	7.32	1831
Average	49.96 ± 2.94	7.63 ± 0.72	1936.40 ± 85.44

80% PP / 20% CSV 0 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	46.03	9.61	1738
2	44.19	9.31	1777
3	47.23	9.27	1900
4	44.78	9.80	1819
5	45.49	9.61	1859
Average	45.54 ± 1.17	9.52 ± 0.23	1818.60 ± 64.20

80% PP / 20% CSV 5 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	42.63	9.80	1817
2	49.11	9.16	1932
3	46.79	8.74	1863
4	45.82	9.01	1854
5	42.17	8.24	1872
Average	45.304 ± 2.91	8.99 ± 0.57	1867.60 ± 41.63

80% PP / 20% CSV 10 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	46.58	8.58	1853
2	41.15	8.66	1888
3	44.78	9.00	1956
4	42.13	8.47	1852
5	42.22	8.77	1931
Average	43.372 ± 2.24	8.70 ± 0.20	1896 ± 46.57

80% PP / 20% CSV 15 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	38.56	7.48	1958
2	39.37	8.85	1990
3	39.03	7.63	1987
4	36.57	7.97	1858
5	38.55	7.36	2008
Average	38.42 ± 1.09	7.86 ± 0.60	1960.20 ± 59.88

80% PP / 20% CSV 20 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	37.92	6.75	2120
2	37.14	7.10	2091
3	35.48	6.75	2073
4	35.81	5.84	2186
5	37.98	6.07	2062
Average	36.87 ± 1.17	6.50 ± 0.53	2106.40 ± 49.61

70% PP / 30% CSV 0 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	37.15	6.07	2025
2	44.08	6.29	2017
3	38.26	7.44	2035
4	39.51	6.68	1969
5	44.80	7.63	1961
Average	40.76 ± 3.47	6.82 ± 0.69	2001.40 ±

70% PP / 30% CSV 5 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	34.26	4.46	2038
2	40.01	6.64	2009
3	37.98	5.80	1973
4	35.05	5.76	2028
5	38.43	6.68	2087
Average	37.15 ± 2.41	5.87 ± 0.90	2027 ± 41.72

70% PP / 30% CSV 10 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	35.05	6.49	2248
2	34.09	6.87	2080
3	33.31	6.79	2126
4	34.90	6.26	2185
5	33.96	4.88	2187
Average	34.26 ± 0.72	6.26 ± 0.81	2165.20 ± 64.26

70% PP / 30% CSV 15 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	34.10	6.22	2246
2	34.90	6.14	2357
3	30.63	5.31	2300
4	34.32	5.39	2225
5	36.07	5.04	2349
Average	34.00 ± 2.03	5.62 ± 0.53	2295.40 ± 59.34

70% PP / 30% CSV 20 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	33.25	6.49	2277
2	34.60	6.49	2294
3	34.05	5.83	2239
4	29.33	4.50	2127
5	29.83	4.04	2112
Average	32.21 ± 2.46	5.47 ± 1.14	2209.80 ± 84.97

60% PP / 40% CSV 0 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	33.22	6.98	2156
2	32.64	5.80	2198
3	34.23	6.74	2072
4	34.98	6.63	2107
5	34.46	6.55	2186
Average	33.91 ± 0.95	6.54 ± 0.45	2143.80 ± 53.33

60% PP / 40% CSV 5 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	30.52	3.93	2528
2	31.39	4.85	2412
3	34.72	4.23	2428
4	36.82	6.29	2351
5	33.23	4.12	2410
Average	33.34 ± 2.54	4.68 ± 0.96	2425.80 ± 64.20

60% PP / 40% CSV 10 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	33.30	5.80	2264
2	30.46	4.54	2199
3	29.09	4.43	2142
4	30.90	5.00	2258
5	29.43	5.88	2068
Average	30.64 ± 1.66	5.13 ± 0.68	2186.20 ±82.61

60% PP / 40% CSV 15 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	26.40	4.08	2270
2	32.96	5.19	2462
3	29.75	5.42	2274
4	29.33	4.43	2305
5	29.16	4.31	2341
Average	29.52 ± 2.33	4.68 ± 0.58	2330.40 ± 78.91

60% PP / 40% CSV 20 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	29.06	3.93	2393
2	26.07	3.28	2277
3	26.86	3.01	2385
4	28.60	5.00	2417
5	29.63	3.78	2408
Average	28.04 ± 1.51	3.80 ± 0.76	2376 ± 56.74

50% PP / 50% CSV 0 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	25.34	3.43	2267
2	26.14	3.20	2318
3	23.80	2.40	2406
4	24.78	3.13	2286
5	24.34	2.98	2195
Average	24.88 ± 0.90	3.03 ± 0.39	2294.40 ±77.00

50% PP / 50% CSV 5 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	25.24	3.55	2334
2	24.50	3.01	2374
3	27.53	4.04	2362
4	25.37	3.82	2233
5	22.75	2.79	2332
Average	25.08 ± 1.72	3.44 ± 0.53	2327 ± 55.55

50% PP / 50% CSV 10 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	25.90	3.59	2374
2	26.18	3.55	2514
3	26.46	3.32	2500
4	25.86	3.05	2488
5	24.19	3.05	2401
Average	25.72 ± 0.89	3.31 ± 0.26	2455.40 ± 63.39

50% PP / 50% CSV 15 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	24.20	2.67	2722
2	25.90	3.24	2687
3	24.49	2.82	2570
4	26.99	3.47	2746
5	24.83	2.90	2640
Average	25.28 ± 1.15	3.02 ± 0.33	2673 ± 70.04

50% PP / 50% CSV 20 phr MCSV	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	23.83	2.40	2857
2	22.82	2.40	2778
3	23.75	2.56	2803
4	24.31	2.48	2803
5	25.20	2.63	2955
Average	23.98 ± 0.87	2.49 ± 0.10	2839.20 ± 70.87

ก.1.2.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

90% PP / 10% GTN 0 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	49.79	9.65	1782
2	52.79	9.16	1814
3	49.84	9.80	1801
4	49.76	9.69	1797
5	50.21	9.46	1750
Average	50.48 ± 1.31	9.55 ± 0.25	1788.80 ± 24.51

90% PP / 10% GTN 5 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	46.00	9.12	1798
2	46.15	9.47	1729
3	48.54	9.36	1872
4	47.44	9.41	1845
5	48.98	9.20	1912
Average	47.42 ± 1.35	9.31 ± 0.15	1831.20 ± 70.59

90% PP / 10% GTN 10 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	46.03	9.61	1876
2	46.76	9.35	1864
3	42.80	8.66	1814
4	46.48	8.81	1797
5	49.17	9.65	1873
Average	46.25 ± 2.28	9.22 ± 0.46	1844.80 ± 36.64

90% PP / 10% GTN 15 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	43.16	8.81	1833
2	43.86	7.52	1923
3	43.12	9.77	1889
4	46.49	8.85	1831
5	43.18	9.00	1864
Average	43.96 ± 1.45	8.79 ± 0.81	1868 ± 38.97

90% PP / 10% GTN 20 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	42.43	7.06	1895
2	39.86	6.37	1922
3	43.67	7.36	2086
4	38.88	5.53	1943
5	41.82	7.48	1943
Average	41.33 ± 1.94	6.76 ± 0.81	1957.80 ± 74.33

80% PP / 20% GTN 0 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	46.42	9.61	1886
2	44.58	8.93	1797
3	45.63	9.08	1821
4	45.69	8.45	1826
5	46.53	9.12	1837
Average	45.77 ± 0.78	9.04 ± 0.42	1833.40 ± 32.84

80% PP / 20% GTN 5 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	41.43	6.87	2020
2	43.74	9.00	1756
3	45.19	8.20	2091
4	41.62	6.79	1924
5	42.82	8.89	1797
Average	42.96 ± 1.56	7.95 ± 1.07	1917.60 ± 142.52

80% PP / 20% GTN 10 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	46.36	6.10	2227
2	46.11	5.91	2419
3	44.85	6.94	2243
4	44.96	5.61	2121
5	38.90	4.27	2395
Average	44.24 ± 3.06	5.77 ± 0.97	2281 ± 124.50

80% PP / 20% GTN 15 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	42.11	6.68	1983
2	42.26	5.88	2061
3	39.68	5.80	2027
4	42.65	5.15	2466
5	51.16	5.99	2272
Average	43.57 ± 4.40	5.90 ± 0.54	2161.80 ± 203.09

80% PP / 20% GTN 20 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	36.88	4.54	2368
2	39.88	4.96	2294
3	45.50	5.99	2572
4	38.21	4.96	2039
5	39.87	4.73	2538
Average	40.07 ± 3.29	5.04 ± 0.56	2362.20 ± 214.51

70% PP / 30% GTN 0 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	38.58	7.97	1742
2	39.12	7.36	1854
3	38.91	6.79	1820
4	40.54	5.91	2113
5	40.60	7.06	2005
Average	39.55 ± 0.95	7.02 ± 0.76	1906.8 ± 149.70

70% PP / 30% GTN 5 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	34.32	6.14	1910
2	36.74	7.71	1909
3	36.64	5.84	1945
4	35.56	5.57	1905
5	38.05	5.84	2094
Average	36.26 ± 1.40	6.22 ± 0.86	1952.6 ± 80.67

70% PP / 30% GTN 10 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	38.19	5.34	2390
2	35.01	5.15	2187
3	39.70	4.31	2150
4	38.18	4.81	2109
5	36.11	5.46	2267
Average	37.44 ± 1.86	5.01 ± 0.46	2220.60 ± 111.15

70% PP / 30% GTN 15 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	37.44	5.42	1937
2	35.91	4.35	2212
3	36.04	4.58	2195
4	35.92	4.01	2324
5	34.75	3.85	2389
Average	36.01 ± 0.96	4.44 ± 0.62	2211.40 ± 173.05

70% PP / 30% GTN 20 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	31.53	4.43	1936
2	34.97	4.35	2202
3	31.28	3.70	2141
4	29.53	3.59	2025
5	32.13	4.69	1960
Average	31.89 ± 1.98	4.15 ± 0.48	2052.80 ± 115.18

60% PP / 40% GTN 0 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	33.14	3.66	2379
2	34.15	4.16	2107
3	35.17	4.62	2306
4	34.81	4.23	2207
5	37.16	4.96	2070
Average	34.89 ± 1.49	4.33 ± 0.49	2213.80 ± 130.31

60% PP / 40% GTN 5 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	35.90	4.62	2355
2	33.16	3.51	2601
3	33.17	3.66	2717
4	29.14	3.63	2015
5	30.57	3.78	1994
Average	32.39 ± 2.62	3.84 ± 0.45	2336.40± 330.06

60% PP / 40% GTN 10 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	31.81	3.59	2603
2	29.80	3.51	2355
3	30.70	3.51	2870
4	30.41	3.62	2441
5	30.52	3.62	2463
Average	30.65 ± 0.73	3.57 ± 0.06	2546.40 ± 201.63

60% PP / 40% GTN 15 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	28.95	2.67	2747
2	29.13	3.13	2487
3	30.60	3.28	2592
4	27.44	3.17	2564
5	29.19	3.28	2562
Average	29.06 ± 1.12	3.11 ± 0.25	2590.40 ± 95.81

60% PP / 40% GTN 20 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	29.74	3.32	2692
2	29.88	3.24	2760
3	26.51	2.75	2461
4	26.12	2.44	2560
5	26.94	2.94	2382
Average	27.84 ± 1.82	2.94 ± 0.36	2571 ± 156.77

50% PP / 50% GTN 0 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	25.98	2.40	2438
2	27.64	2.98	2197
3	28.60	2.90	2216
4	28.97	2.48	2642
5	26.82	3.05	2308
Average	27.60 ± 1.24	2.76 ± 0.30	2360.20 ± 184.13

50% PP / 50% GTN 5 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	25.13	2.40	2525
2	25.46	2.59	2405
3	25.11	2.52	2256
4	25.40	2.52	2436
5	25.92	2.37	2454
Average	25.40 ± 0.33	2.48 ± 0.09	2415.20 ± 99.30

50% PP / 50% GTN 10 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	21.90	2.21	2595
2	25.61	2.44	2430
3	25.56	2.44	2434
4	24.61	2.67	2599
5	21.43	2.25	2544
Average	23.82 ± 2.02	2.40 ± 0.18	2520.40 ± 83.57

50% PP / 50% GTN 15 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	25.07	2.17	2675
2	24.01	2.17	2452
3	26.33	2.44	3053
4	23.98	1.83	2879
5	24.43	2.21	2670
Average	24.76 ± 0.98	2.17 ± 0.22	2745.80 ± 228.69

50% PP / 50% GTN 20 phr MGTN	Flexural strength (MPa)	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Modulus (MPa)
1	23.25	2.25	2608
2	22.64	2.10	2563
3	23.29	2.17	2515
4	24.94	2.40	2642
5	22.69	2.02	2431
Average	23.36 ± 0.93	2.19 ± 0.15	2551.80 ± 82.71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1.3 ความทนแรงกระแทก

ก.1.3.1 พอลิโพรพิลีน

PP	Impact Strength (KJ/m^2)
1	2.06
2	2.15
3	2.13
4	2.11
5	2.10
Average	2.11 ± 0.03

ก.1.3.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

90% PP / 10% CSV 0 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.35
2	1.35
3	1.35
4	1.37
5	1.39
Average	1.36 ± 0.02

90% PP / 10% CSV 5 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.32
2	1.39
3	1.45
4	1.44
5	1.47
Average	1.41 ± 0.06

90% PP / 10% CSV 10 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.35
2	1.35
3	1.36
4	1.41
5	1.38
Average	1.37 ± 0.03

90% PP / 10% CSV 15 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.35
2	1.30
3	1.32
4	1.33
5	1.33
Average	1.33 ± 0.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

90% PP / 10% CSV 20 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.64
2	1.06
3	0.66
4	0.64
5	0.65
Average	0.73 ± 0.18

80% PP / 20% CSV 0 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.37
2	1.42
3	0.71
4	0.72
5	1.40
Average	1.12 ± 0.37

80% PP / 20% CSV 5 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.69
2	0.99
3	0.66
4	0.96
5	1.63
Average	1.19 ± 0.45

80% PP / 20% CSV 10 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.01
2	1.67
3	1.38
4	1.68
5	1.02
Average	1.35 ±

80% PP / 20% CSV 15 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.01
2	1.03
3	1.64
4	0.99
5	0.98
Average	1.13 ± 0.29

80% PP / 20% CSV 20 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.95
2	0.97
3	0.96
4	0.97
5	0.94
Average	0.96 ± 0.01

70% PP / 30% CSV 0 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.89
2	0.78
3	0.89
4	0.83
5	0.81
Average	0.84 ± 0.05

70% PP / 30% CSV 5 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.99
2	0.97
3	0.97
4	1.00
5	0.63
Average	0.91 ± 0.16

70% PP / 30% CSV 10 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.97
2	0.95
3	0.96
4	0.95
5	0.94
Average	0.95 ± 0.01

70% PP / 30% CSV 15 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.25
2	1.25
3	0.93
4	0.92
5	0.96
Average	1.06 ± 0.17

70% PP / 30% CSV 20 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.95
2	0.95
3	0.95
4	0.95
5	0.92
Average	0.94 ± 0.01

60% PP / 40% CSV 0 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.67
2	0.66
3	0.91
4	0.97
5	0.70
Average	0.78 ± 0.15

60% PP / 40% CSV 5 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.90
2	0.90
3	0.88
4	0.88
5	0.88
Average	0.89 ± 0.01

60% PP / 40% CSV 10 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.95
2	0.91
3	0.91
4	0.93
5	0.94
Average	0.93 ± 0.02

60% PP / 40% CSV 15 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.90
2	0.95
3	0.91
4	0.92
5	0.92
Average	0.92 ± 0.02

60% PP / 40% CSV 20 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.92
2	0.90
3	0.90
4	0.86
5	0.93
Average	0.90 ± 0.03

50% PP / 50% CSV 0 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.64
2	0.62
3	0.64
4	0.64
5	0.64
Average	0.64 ± 0.01

50% PP / 50% CSV 5 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.62
2	0.64
3	0.62
4	0.62
5	0.65
Average	0.63 ± 0.01

50% PP / 50% CSV 10 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.60
2	0.67
3	0.59
4	0.58
5	0.57
Average	0.60 ± 0.04

50% PP / 50% CSV 15 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.59
2	0.60
3	0.59
4	0.58
5	0.59
Average	0.59 ± 0.01

50% PP / 50% CSV 20 phr MCSV	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.58
2	0.58
3	0.58
4	0.86
5	0.58
Average	0.64 ± 0.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1.3.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

90% PP / 10% GTN 0 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.39
2	1.36
3	1.03
4	1.42
5	1.43
Average	1.33 ± 0.17

90% PP / 10% GTN 5 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.42
2	1.38
3	1.38
4	1.44
5	1.41
Average	1.41 ± 0.03

90% PP / 10% GTN 10 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.64
2	1.70
3	1.38
4	1.60
5	1.71
Average	1.61 ± 0.13

90% PP / 10% GTN 15 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.34
2	1.68
3	1.31
4	1.30
5	1.63
Average	1.45 ± 0.19

90% PP / 10% GTN 20 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.66
2	0.66
3	0.62
4	0.63
5	0.64
Average	0.64 ± 0.02

80% PP / 20% GTN 0 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	1.30
2	1.00
3	1.38
4	1.05
5	1.30
Average	1.21 ± 0.17

80% PP / 20% GTN 5 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.65
2	0.65
3	1.59
4	1.66
5	1.28
Average	1.17 ± 0.49

80% PP / 20% GTN 10 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.96
2	1.55
3	0.94
4	1.27
5	0.95
Average	1.13 ± 0.27

80% PP / 20% GTN 15 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.64
2	0.93
3	0.98
4	1.30
5	1.36
Average	1.04 ± 0.29

80% PP / 20% GTN 20 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.92
2	0.90
3	0.93
4	0.94
5	0.94
Average	0.93 ± 0.02

70% PP / 30% GTN 0 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.95
2	0.87
3	0.85
4	0.86
5	0.93
Average	0.89 ± 0.04

70% PP / 30% GTN 5 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.92
2	0.95
3	0.92
4	0.96
5	0.93
Average	0.94 ± 0.02

70% PP / 30% GTN 10 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.76
2	0.96
3	0.94
4	0.94
5	1.00
Average	0.92 ± 0.09

70% PP / 30% GTN 15 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.95
2	0.64
3	0.92
4	0.96
5	0.93
Average	0.88 ± 0.14

70% PP / 30% GTN 20 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.70
2	0.94
3	0.93
4	0.95
5	0.92
Average	0.89 ± 0.11

60% PP / 40% GTN 0 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.97
2	0.93
3	0.95
4	0.94
5	0.65
Average	0.89 ± 0.13

60% PP / 40% GTN 5 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.92
2	0.92
3	0.92
4	0.91
5	0.91
Average	0.92 ± 0.01

60% PP / 40% GTN 10 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.87
2	0.93
3	0.90
4	0.86
5	0.89
Average	0.89 ± 0.03

60% PP / 40% GTN 15 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.71
2	0.84
3	0.80
4	0.90
5	0.72
Average	0.79 ± 0.08

60% PP / 40% GTN 20 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.85
2	0.75
3	0.81
4	0.86
5	0.70
Average	0.79 ± 0.07

50% PP / 50% GTN 0 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.65
2	0.63
3	0.64
4	0.64
5	0.63
Average	0.64 ± 0.01

50% PP / 50% GTN 5 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.63
2	0.64
3	0.63
4	0.63
5	0.64
Average	0.63 ± 0.01

50% PP / 50% GTN 10 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.62
2	0.90
3	0.61
4	0.91
5	0.91
Average	0.79 ± 0.16

50% PP / 50% GTN 15 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.58
2	0.87
3	0.59
4	0.58
5	0.59
Average	0.64 ± 0.13

50% PP / 50% GTN 20 phr MGTN	Impact Strength (KJ/m^2)
1	0.56
2	0.55
3	0.57
4	0.59
5	0.56
Average	0.57 ± 0.02

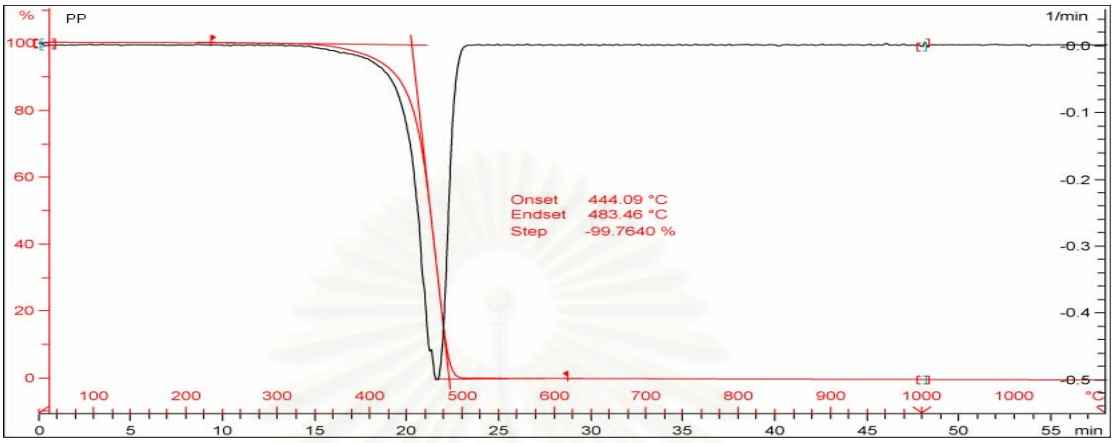
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

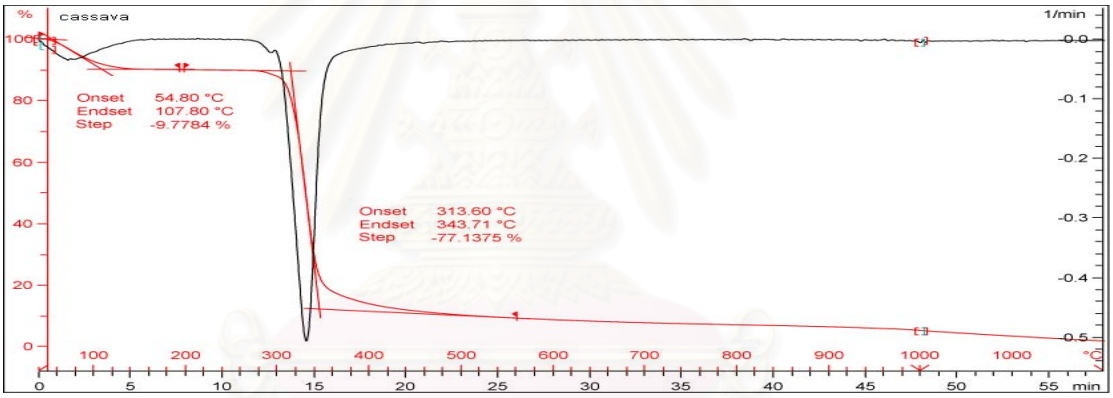
ข.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมจากพอลิโพรพิลีน แป้ง และแป้งที่อัตราส่วนต่างๆ

ข.1.1 เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิส

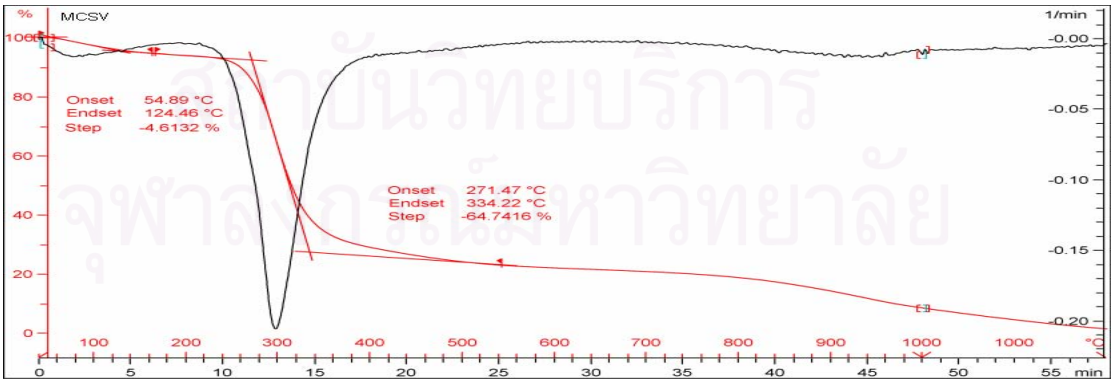
ข.1.1.1 พอลิโพรพิลีน



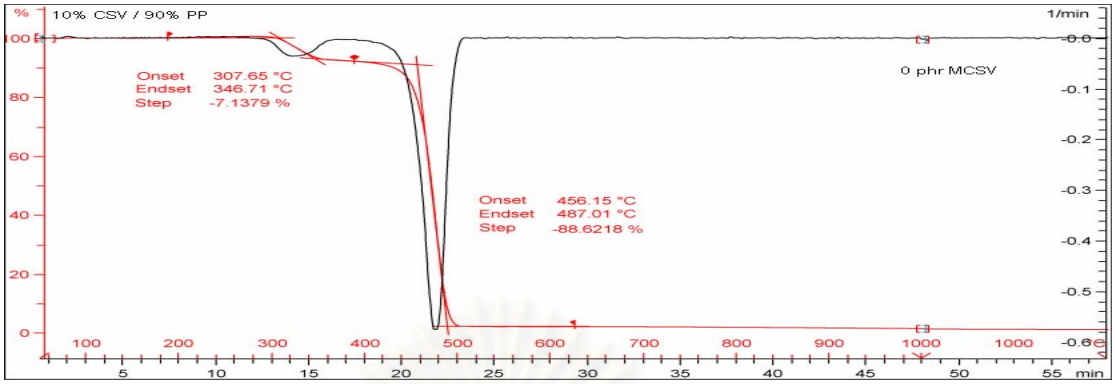
ข.1.1.2 แป้งมันสำปะหลัง

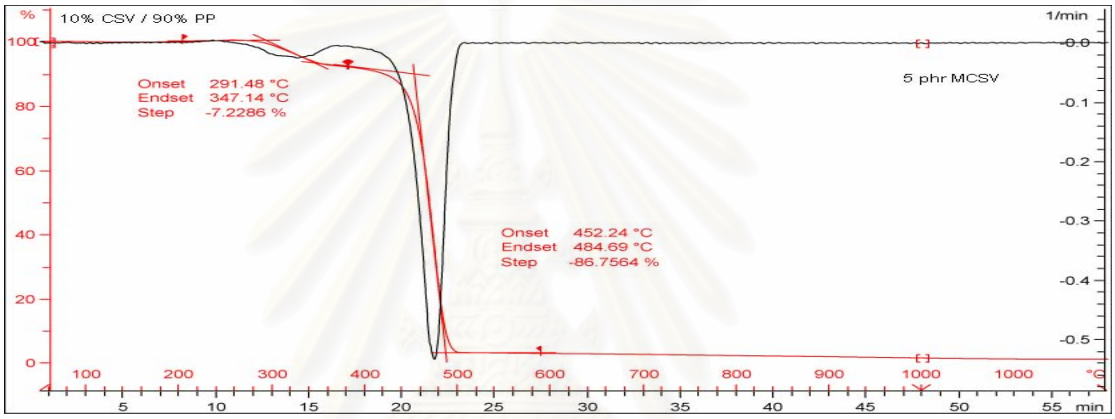


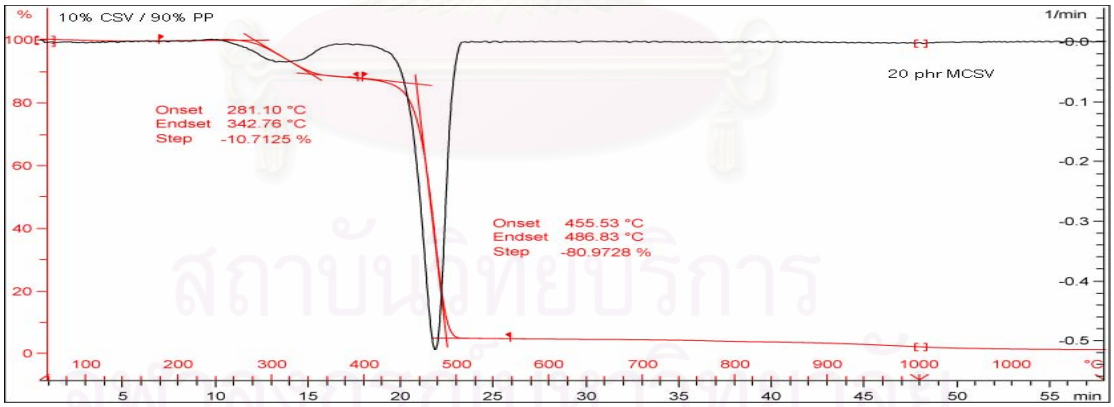
ข.1.1.3 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร

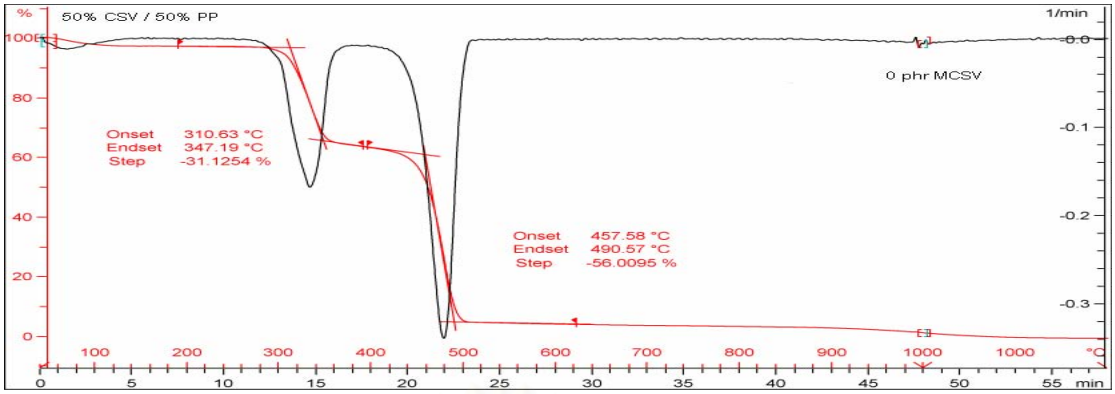


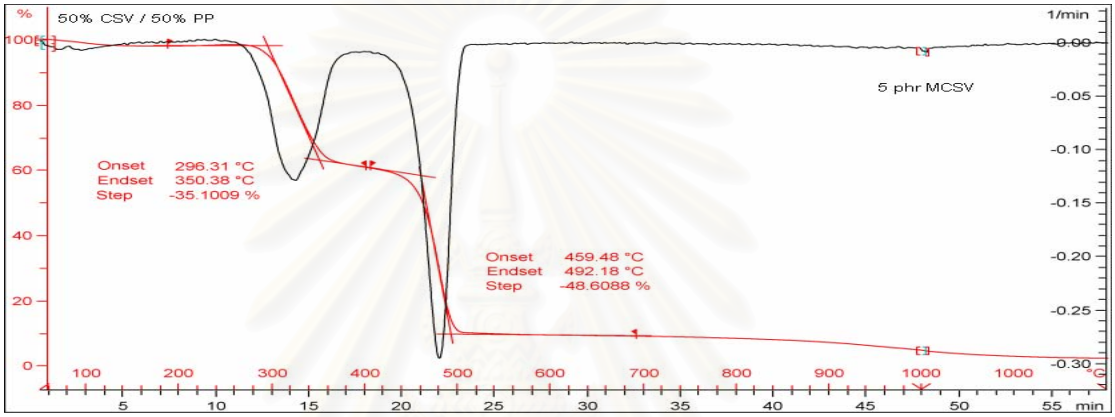
ข.1.3.4 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสำปะหลังดัดแปร

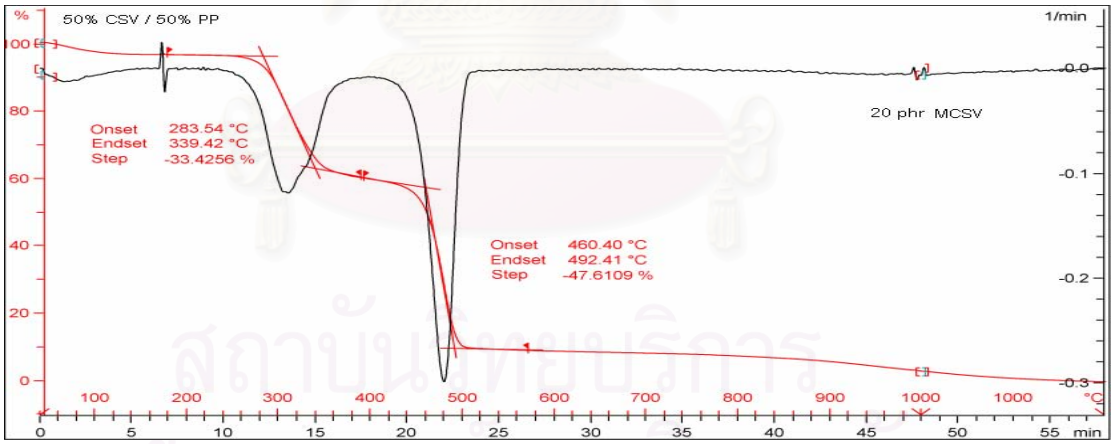






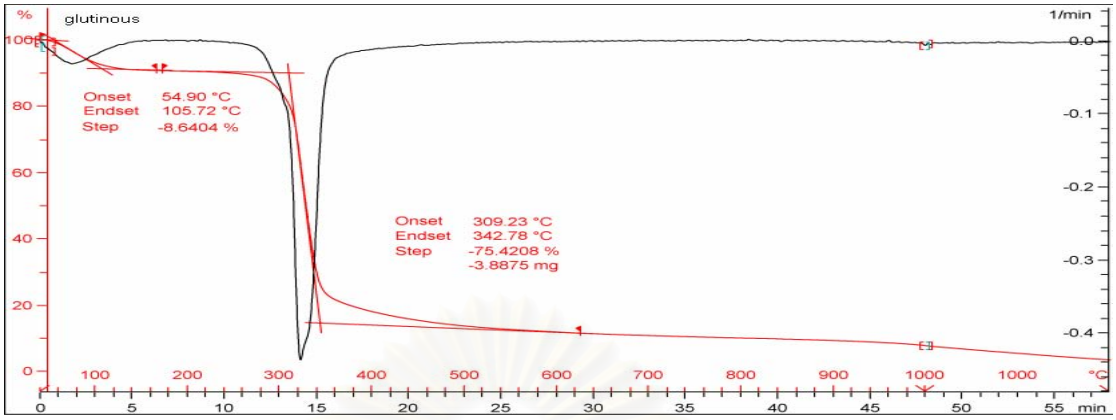




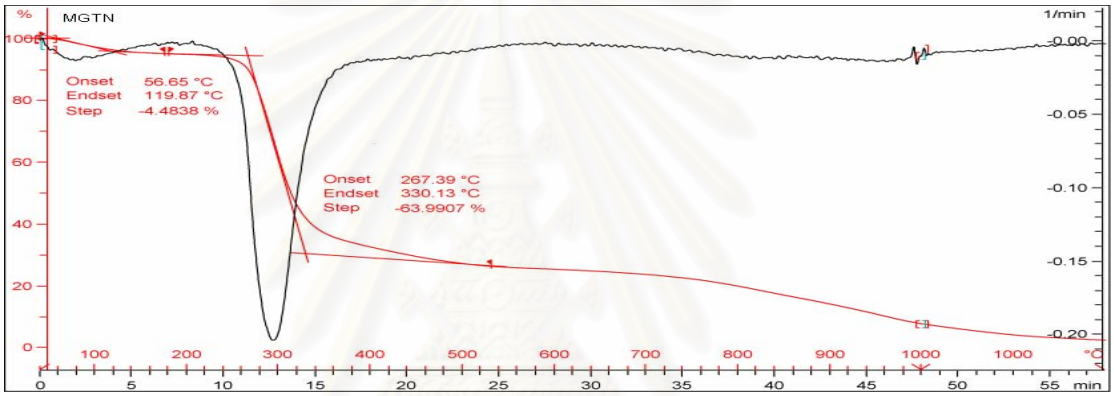


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

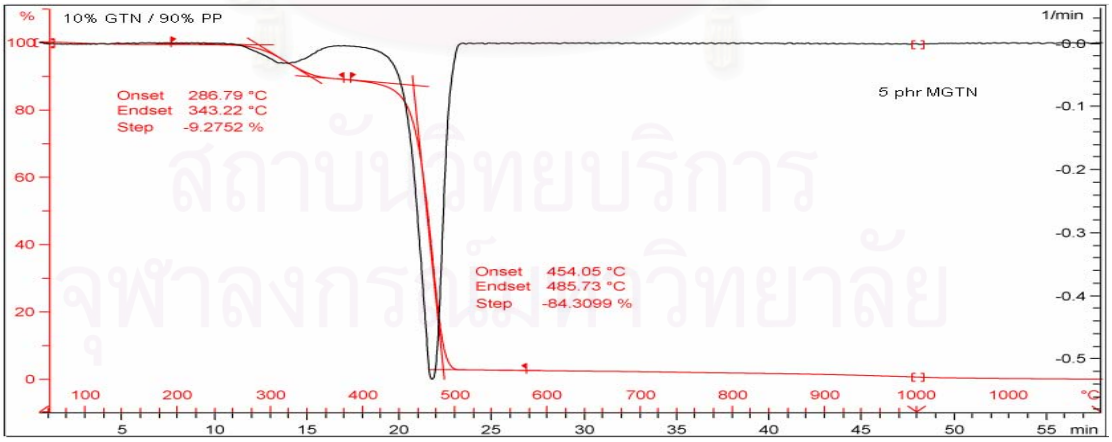
ข.1.3.5 แป้งข้าวเหนียว

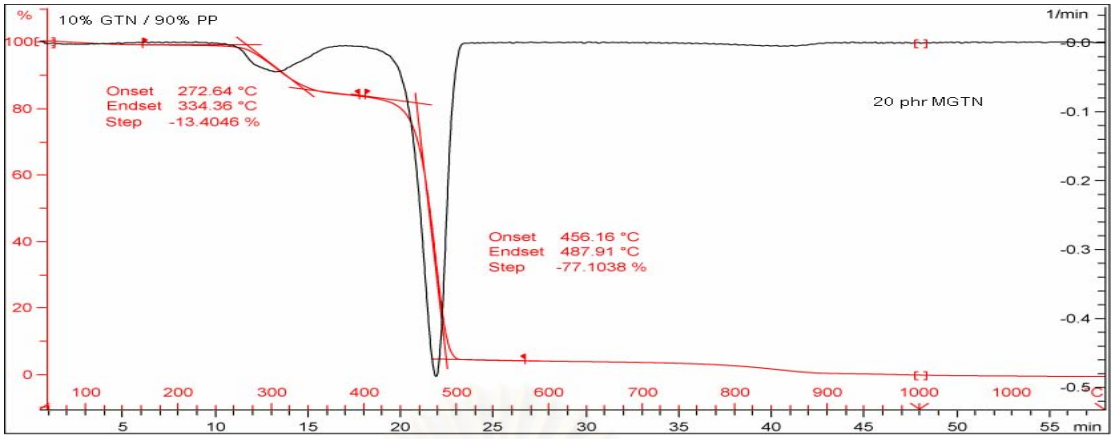


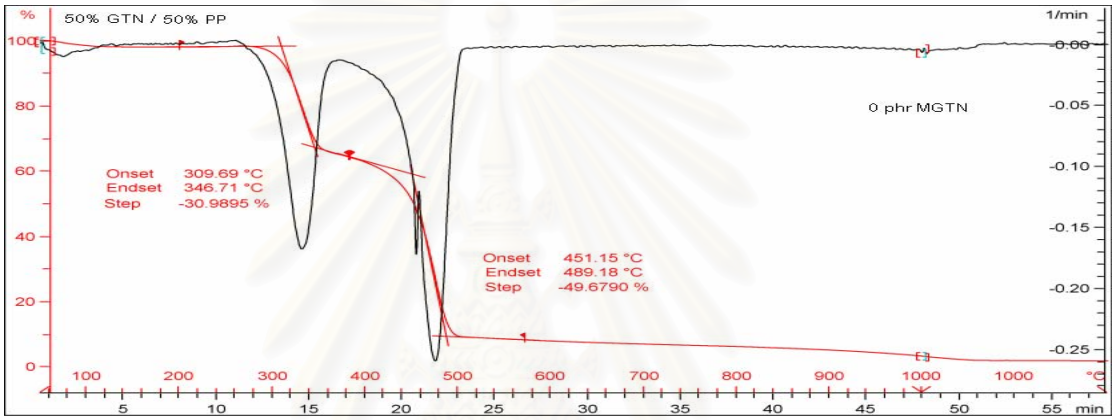
ข.1.3.6 แป้งข้าวเหนียวดัดแปร

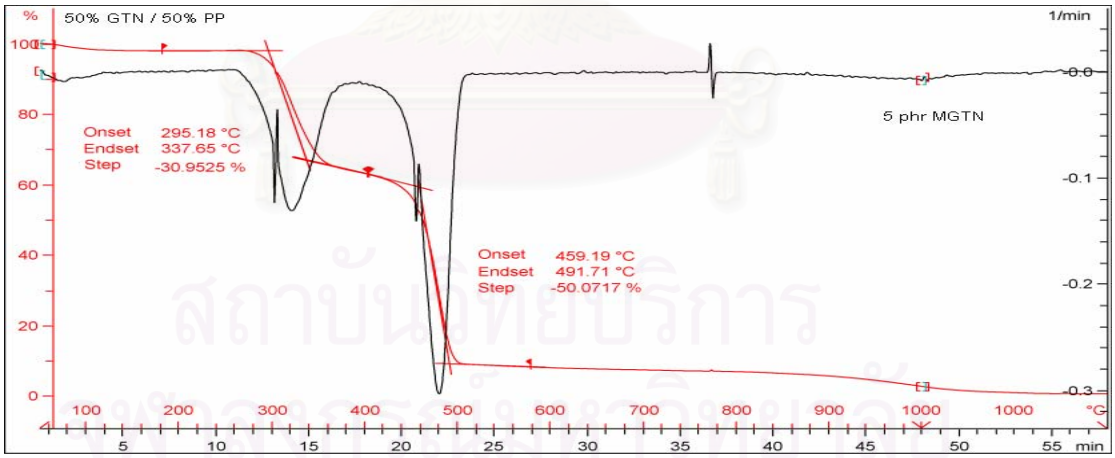


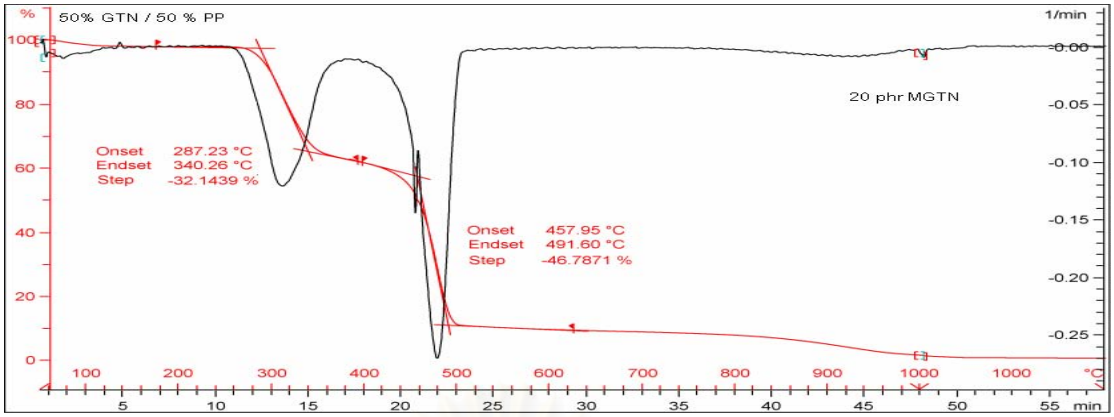
ข.1.3.7 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และ โดยแป้งข้าวเหนียวดัดแปร




10% GTN / 90% PP
20 phr MGTN
Onset 272.64 °C
Endset 334.36 °C
Step -13.4046 %
Onset 456.16 °C
Endset 487.91 °C
Step -77.1038 %
%
1/min
°C
min


50% GTN / 50% PP
0 phr MGTN
Onset 309.69 °C
Endset 346.71 °C
Step -30.9895 %
Onset 451.15 °C
Endset 489.18 °C
Step -49.6790 %
%
1/min
°C
min


50% GTN / 50% PP
5 phr MGTN
Onset 295.18 °C
Endset 337.65 °C
Step -30.9525 %
Onset 459.19 °C
Endset 491.71 °C
Step -50.0717 %
%
1/min
°C
min



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ค.1 ผลการทดสอบสมบัติการดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสม

ค.1.1 พอลิโพรพิลีน

PP	% Moisture Absorption
1	0.0000
2	0.0331
3	0.0316
4	0.0000
5	0.0336
Average	0.0197 ± 0.0180

ค.1.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

90% PP / 10% CSV 0 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.0715
2	0.1013
3	0.0882
4	0.1053
5	0.0857
Average	0.0904 ± 0.0135

90% PP / 10% CSV 5 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.1147
2	0.1446
3	0.1297
4	0.1356
5	0.1351
Average	0.1319 ± 0.0110

90% PP / 10% CSV 10 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.2096
2	0.2482
3	0.1451
4	0.1494
5	0.2185
Average	0.1941 ± 0.0452

90% PP / 10% CSV 15 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.1903
2	0.3369
3	0.2108
4	0.2445
5	0.3718
Average	0.2709 ± 0.079613

90% PP / 10% CSV 20 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.3914
2	0.4640
3	0.2978
4	0.3134
5	0.4693
Average	0.3872 ± 0.0808

80% PP / 20% CSV 0 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.1785
2	0.1371
3	0.1232
4	0.1318
5	0.1449
Average	0.1431 ± 0.0212

80% PP / 20% CSV 5 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.1746
2	0.1658
3	0.1721
4	0.2779
5	0.2005
Average	0.1982 ± 0.0465

80% PP / 20% CSV 10 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.2072
2	0.1918
3	0.1991
4	0.3986
5	0.2679
Average	0.2529 ± 0.0868

80% PP / 20% CSV 15 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.3973
2	0.2575
3	0.4417
4	0.4910
5	0.2887
Average	0.3753 ± 0.0996

80% PP / 20% CSV 20 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.3448
2	0.4661
3	0.4551
4	0.4357
5	0.5016
Average	0.4407 ± 0.0587

70% PP / 30% CSV 0 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.3098
2	0.3198
3	0.2552
4	0.2634
5	0.2722
Average	0.2841 ± 0.0289

70% PP / 30% CSV 5 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.4328
2	0.3703
3	0.3359
4	0.4452
5	0.3883
Average	0.3945 ± 0.0450

70% PP / 30% CSV 10 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.6146
2	0.4764
3	0.4021
4	0.7399
5	0.4792
Average	0.5424 ± 0.1344

70% PP / 30% CSV 15 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.6130
2	0.5776
3	0.6892
4	0.8008
5	0.5886
Average	0.6539 ± 0.0930

70% PP / 30% CSV 20 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.7687
2	0.7548
3	0.7258
4	0.7738
5	0.7520
Average	0.7550 ± 0.0187

60% PP / 40% CSV 0 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.4788
2	0.4406
3	0.4559
4	0.4190
5	0.4865
Average	0.4561 ± 0.0277

60% PP / 40% CSV 5 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.6111
2	0.6163
3	0.6408
4	0.6454
5	0.6399
Average	0.6307 ± 0.0157

60% PP / 40% CSV 10 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.6321
2	0.8148
3	0.7510
4	0.5264
5	0.6699
Average	0.6788 ± 0.1109

60% PP / 40% CSV 15 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.8587
2	0.7351
3	0.6769
4	0.9885
5	0.6331
Average	0.7784 ± 0.1448

60% PP / 40% CSV 20 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	0.8207
2	1.0332
3	1.1779
4	1.0103
5	0.9255
Average	0.9935 ± 0.1326

50% PP / 50% CSV 0 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	1.1602
2	1.0360
3	1.1169
4	1.1193
5	0.9273
Average	1.0720 ± 0.0926

50% PP / 50% CSV 5 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	1.0109
2	1.1811
3	1.2009
4	1.0070
5	0.9743
Average	1.0748 ± 0.1072

50% PP / 50% CSV 10 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	1.1200
2	1.1538
3	1.0932
4	1.0740
5	1.0195
Average	1.0921 ± 0.0505

50% PP / 50% CSV 15 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	1.1587
2	1.0022
3	1.0510
4	1.3020
5	1.2426
Average	1.1513 ± 0.1259

50% PP / 50% CSV 20 phr MCSV	% Moisture Absorption
1	1.3454
2	1.4978
3	1.4459
4	1.3260
5	1.2839
Average	1.3798 ± 0.0889

ค.1.2.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

90% PP / 10% GTN 0 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.0330
2	0.0457
3	0.0706
4	0.0720
5	0.0858
Average	0.0614 ± 0.0215

90% PP / 10% GTN 5 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.1153
2	0.1343
3	0.1313
4	0.1878
5	0.1345
Average	0.1406 ± 0.0275

90% PP / 10% GTN 10 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.1843
2	0.2049
3	0.1794
4	0.2348
5	0.1778
Average	0.1963 ± 0.0241

90% PP / 10% GTN 15 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.2526
2	0.2566
3	0.2416
4	0.2419
5	0.2654
Average	0.2516 ± 0.0101

90% PP / 10% GTN 20 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.4261
2	0.4238
3	0.3702
4	0.3965
5	0.3921
Average	0.4017 ± 0.0234

80% PP / 20% GTN 0 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.2089
2	0.1857
3	0.1829
4	0.2098
5	0.1915
Average	0.1957 ± 0.0128

80% PP / 20% GTN 5 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.2309
2	0.2393
3	0.2444
4	0.2563
5	0.2193
Average	0.2380 ± 0.0140

80% PP / 20% GTN 10 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.2614
2	0.2533
3	0.2780
4	0.2729
5	0.2874
Average	0.2706 ± 0.0135

80% PP / 20% GTN 15 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.3938
2	0.3517
3	0.3133
4	0.3522
5	0.3071
Average	0.3436 ± 0.0350

80% PP / 20% GTN 20 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.4852
2	0.4735
3	0.4454
4	0.4490
5	0.4971
Average	0.4700 ± 0.0225

70% PP / 30% GTN 0 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.2821
2	0.3350
3	0.3233
4	0.2862
5	0.3111
Average	0.3075 ± 0.0230

70% PP / 30% GTN 5 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.5027
2	0.5075
3	0.4498
4	0.4629
5	0.4486
Average	0.4742 ± 0.0287

70% PP / 30% GTN 10 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.5165
2	0.6153
3	0.5965
4	0.5345
5	0.5454
Average	0.5617 ± 0.0422

70% PP / 30% GTN 15 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.6239
2	0.6540
3	0.6074
4	0.6659
5	0.6795
Average	0.6461 ± 0.0298

70% PP / 30% GTN 20 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.2477
2	1.1996
3	1.1914
4	1.2537
5	1.3054
Average	1.2396 ± 0.0462

60% PP / 40% GTN 0 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.6526
2	0.6981
3	0.5872
4	0.6614
5	0.6142
Average	0.6427 ± 0.0431

60% PP / 40% GTN 5 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	0.7369
2	0.8278
3	0.7033
4	0.8885
5	0.7150
Average	0.7743 ± 0.0804

60% PP / 40% GTN 10 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.0007
2	0.9597
3	0.9805
4	0.9028
5	0.9069
Average	0.9501 ± 0.0438

60% PP / 40% GTN 15 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.2859
2	1.3323
3	1.0825
4	1.2591
5	1.0284
Average	1.1976 ± 0.1338

60% PP / 40% GTN 20 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.3380
2	1.3699
3	1.5055
4	1.4196
5	1.5948
Average	1.4456 ± 0.1047

50% PP / 50% GTN 0 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.1146
2	1.0221
3	1.0214
4	0.9333
5	1.1867
Average	1.0556 ± 0.0974

50% PP / 50% GTN 5 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.2064
2	1.2765
3	1.2611
4	1.3004
5	1.2320
Average	1.2553 ± 0.0369

50% PP / 50% GTN 10 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.6060
2	1.7679
3	1.7306
4	1.6766
5	1.8031
Average	1.7169 ± 0.0777

50% PP / 50% GTN 15 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	1.9110
2	1.8640
3	1.8892
4	1.8562
5	1.8161
Average	1.8673 ± 0.0359

50% PP / 50% GTN 20 phr MGTN	% Moisture Absorption
1	2.3119
2	2.0406
3	2.0712
4	2.0112
5	1.9924
Average	2.0855 ± 0.1301

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ง.1 ผลการทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม เมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 30 วัน

ง.1.1 พอลิโพรพิลีน

PP	% Biodegradable
1	0.0136
2	0.0138
3	0.0131
4	0.0000
5	0.0000
Average	0.0081 ± 0.0074

ง.1.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

90% PP / 10% CSV 0 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.0420
2	0.0569
3	0.0626
4	0.0304
5	0.0679
Average	0.0520 ± 0.0155

90% PP / 10% CSV 5 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.4082
2	0.4321
3	0.3871
4	0.3523
5	0.4739
Average	0.4107 ± 0.0459

90% PP / 10% CSV 10 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.4485
2	0.8077
3	0.9290
4	0.3219
5	0.4080
Average	0.5831 ± 0.2681

90% PP / 10% CSV 15 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.8602
2	1.2994
3	0.7414
4	1.0665
5	0.9253
Average	0.9786 ± 0.2143

90% PP / 10% CSV 20 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.7532
2	1.9844
3	1.7928
4	1.8289
5	1.6012
Average	1.7921 ± 0.1381

80% PP / 20% CSV 0 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.0703
2	0.0693
3	0.0058
4	0.0707
5	0.0717
Average	0.0575 ± 0.0290

80% PP / 20% CSV 5 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.2383
2	0.2255
3	0.2506
4	0.2339
5	0.2881
Average	0.2473 ± 0.0245

80% PP / 20% CSV 10 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.4973
2	0.5644
3	0.4283
4	0.5400
5	0.4739
Average	0.5008 ± 0.0538

80% PP / 20% CSV 15 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.4380
2	1.3754
3	1.4725
4	1.1670
5	1.3155
Average	1.3537 ± 0.1204

80% PP / 20% CSV 20 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.8212
2	1.8798
3	1.8522
4	2.2258
5	1.8788
Average	1.9315 ± 0.1662

70% PP / 30% CSV 0 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.3012
2	0.3128
3	0.3148
4	0.2903
5	0.2821
Average	0.3002 ± 0.0141

70% PP / 30% CSV 5 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.3138
2	1.1504
3	1.1442
4	1.0912
5	0.9363
Average	1.1272 ± 0.1354

70% PP / 30% CSV 10 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.2406
2	1.4872
3	1.2046
4	1.3213
5	1.3181
Average	1.3144 ± 0.1089

70% PP / 30% CSV 15 phr MCSV	% Biodegradable
1	2.5651
2	2.5902
3	2.0949
4	2.4425
5	2.3866
Average	2.4159 ± 0.1982

70% PP / 30% CSV 20 phr MCSV	% Biodegradable
1	2.5948
2	2.4232
3	2.4168
4	2.8977
5	2.4635
Average	2.5592 ± 0.2023

60% PP / 40% CSV 0 phr MCSV	% Biodegradable
1	0.5396
2	0.5624
3	0.5449
4	0.5851
5	0.5656
Average	0.5595 ± 0.0181

60% PP / 40% CSV 5 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.5410
2	0.1709
3	2.1069
4	0.0051
5	1.9702
Average	1.1588 ± 1.0013

60% PP / 40% CSV 10 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.0636
2	1.0948
3	0.7583
4	3.2908
5	1.2551
Average	1.4925 ± 1.0212

60% PP / 40% CSV 15 phr MCSV	% Biodegradable
1	2.0185
2	2.6146
3	2.9209
4	2.7099
5	2.7198
Average	2.5967 ± 0.3419

60% PP / 40% CSV 20 phr MCSV	% Biodegradable
1	2.9802
2	2.9220
3	3.0195
4	3.1008
5	2.9449
Average	2.9935 ± 0.0704

50% PP / 50% CSV 0 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.7024
2	1.7285
3	1.6667
4	1.6275
5	1.5765
Average	1.6603 ± 0.0603

50% PP / 50% CSV 5 phr MCSV	% Biodegradable
1	1.9867
2	1.9647
3	1.8809
4	1.9307
5	2.0826
Average	1.9691 ± 0.075

50% PP / 50% CSV 10 phr MCSV	% Biodegradable
1	3.6457
2	3.4114
3	3.8349
4	3.8084
5	3.5307
Average	3.6462 ± 0.1805

50% PP / 50% CSV 15 phr MCSV	% Biodegradable
1	4.5348
2	3.9653
3	4.0453
4	4.2104
5	4.2426
Average	4.1997 ± 0.2197

50% PP / 50% CSV 20 phr MCSV	% Biodegradable
1	4.4523
2	4.5979
3	4.9607
4	4.9794
5	4.9991
Average	4.7979 ± 0.2546

ง.1.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

90% PP / 10% GTN 0 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.0000
2	0.2070
3	0.018
4	0.0184
5	0.0239
Average	0.053 ± 0.0863

90% PP / 10% GTN 5 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.1311
2	0.1287
3	0.2285
4	0.2173
5	0.2759
Average	0.1963 ± 0.0645

90% PP / 10% GTN 10 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.3740
2	0.3590
3	0.5115
4	0.5573
5	0.5509
Average	0.4700 ± 0.0967

90% PP / 10% GTN 15 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.5806
2	0.5429
3	0.5129
4	0.4324
5	0.5836
Average	0.5305 ± 0.0621

90% PP / 10% GTN 20 phr MGTN	% Biodegradable
1	2.3218
2	2.0794
3	2.3917
4	2.1031
5	2.6519
Average	2.3096 ± 0.2343

80% PP / 20% GTN 0 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.0999
2	0.1893
3	0.1847
4	0.1707
5	0.111
Average	0.1512 ± 0.0424

80% PP / 20% GTN 5 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.3289
2	0.4299
3	0.3752
4	0.5806
5	0.4864
Average	0.4402 ± 0.0982

80% PP / 20% GTN 10 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.3656
2	0.5623
3	0.4493
4	0.4166
5	0.7351
Average	0.5058 ± 0.1471

80% PP / 20% GTN 15 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.6307
2	1.1083
3	1.4206
4	1.2200
5	1.1076
Average	1.0978 ± 0.2907

80% PP / 20% GTN 20 phr MGTN	% Biodegradable
1	2.8146
2	1.3912
3	1.9975
4	2.6560
5	2.0840
Average	2.1888 ± 0.5686

70% PP / 30% GTN 0 phr MGTN	% Biodegradable
1	0.3594
2	0.4908
3	0.3354
4	0.3907
5	0.4828
Average	0.4118 ± 0.0713

70% PP / 30% GTN 5 phr MGTN	% Biodegradable
1	2.4959
2	1.6069
3	2.3569
4	2.8712
5	1.4873
Average	2.1636 ± 0.5949

70% PP / 30% GTN 10 phr MGTN	% Biodegradable
1	2.700
2	2.1924
3	2.8958
4	3.1422
5	3.3561
Average	2.8573 ± 0.4467

70% PP / 30% GTN 15 phr MGTN	% Biodegradable
1	5.3706
2	4.8891
3	4.7719
4	4.9848
5	5.5595
Average	5.1152 ± 0.3349

70% PP / 30% GTN 20 phr MGTN	% Biodegradable
1	10.856
2	9.8472
3	10.3800
4	8.4938
5	9.4359
Average	9.8045 ± 0.9088

60% PP / 40% GTN 0 phr MGTN	% Biodegradable
1	2.5864
2	2.0199
3	1.8603
4	1.8812
5	2.0535
Average	2.0803 ± 0.2952

60% PP / 40% GTN 5 phr MGTN	% Biodegradable
1	7.5249
2	5.5235
3	6.3455
4	6.8769
5	5.4044
Average	6.3350 ± 0.8992

60% PP / 40% GTN 10 phr MGTN	% Biodegradable
1	8.6423
2	9.4865
3	10.848
4	9.2514
5	8.9361
Average	9.4329 ± 0.8531

60% PP / 40% GTN 15 phr MGTN	% Biodegradable
1	12.4300
2	12.2060
3	13.9130
4	13.4740
5	13.5230
Average	13.1090 ± 0.7461

60% PP / 40% GTN 20 phr MGTN	% Biodegradable
1	17.0280
2	16.3200
3	15.7520
4	17.3650
5	16.2830
Average	16.5500 ± 0.6429

50% PP / 50% GTN 0 phr MGTN	% Biodegradable
1	14.4950
2	14.1230
3	14.4850
4	12.2890
5	13.3120
Average	13.7410 ± 0.9433

50% PP / 50% GTN 5 phr MGTN	% Biodegradable
1	19.1890
2	18.8760
3	17.2740
4	17.7940
5	18.4090
Average	18.3080 ± 0.7815

50% PP / 50% GTN 10 phr MGTN	% Biodegradable
1	25.3430
2	25.0210
3	24.5430
4	25.8490
5	25.8090
Average	25.3130 ± 0.5505

50% PP / 50% GTN 15 phr MGTN	% Biodegradable
1	31.9130
2	28.0750
3	28.2620
4	30.1030
5	27.7760
Average	29.2260 ± 1.7566

50% PP / 50% GTN 20 phr MGTN	% Biodegradable
1	33.8750
2	34.3270
3	35.4640
4	34.4410
5	35.4040
Average	34.7020 ± 0.70110

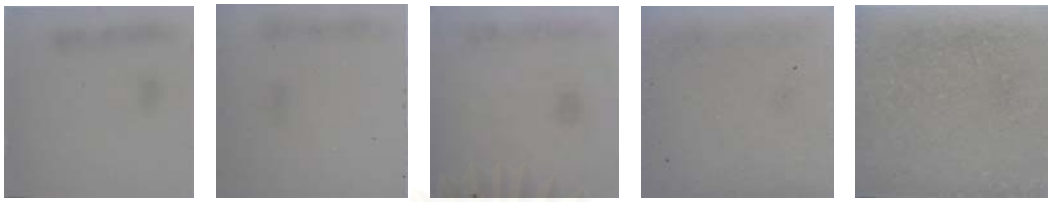
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2 รูปแสดงลักษณะของพอลิเมอร์ผสมก่อนการทดสอบสมบัติการย่อยทางชีวภาพ

ง.2.1 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

90% PP / 10 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV



80% PP / 20 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

70% PP / 30 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

60% PP / 40 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

50% PP / 50 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

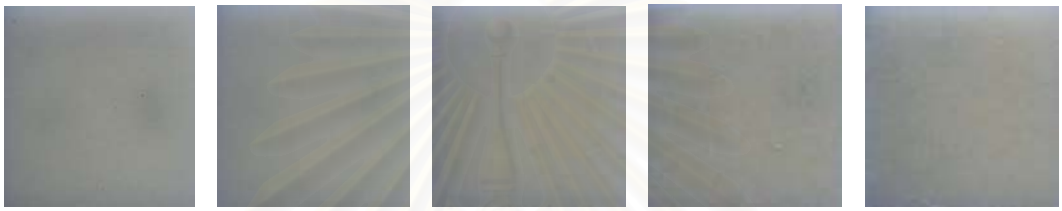
ง.2.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

90% PP / 10 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN

80% PP / 20 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN



70% PP / 30 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN

60% PP / 40 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN

50% PP / 50 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN

ง.3 รูปแสดงลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการทดสอบสมบัติการย่อยทางชีวภาพเป็นระยะเวลา 30 วัน

ง.3.1 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

90% PP / 10 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

80% PP / 20 % CSV

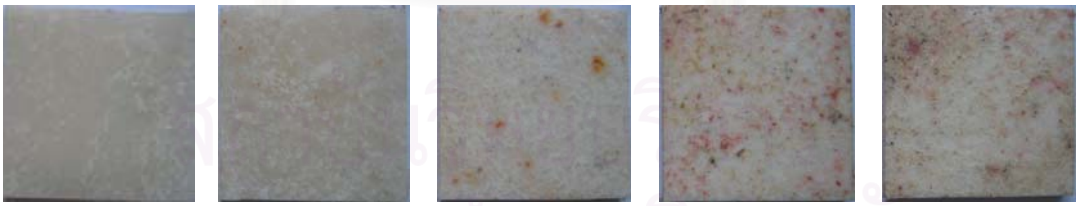
0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

70% PP / 30 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV

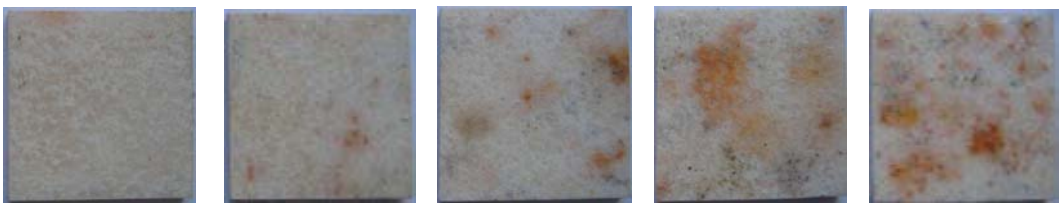
60% PP / 40 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV



50% PP / 50 % CSV

0 phr MCSV 5 phr MCSV 10 phr MCSV 15 phr MCSV 20 phr MCSV



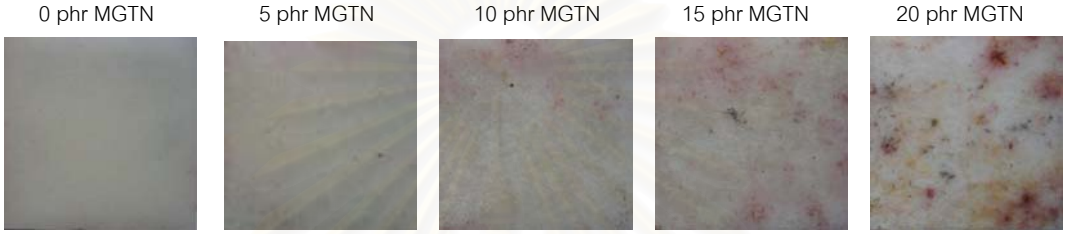
ง.3.2 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่อัตราส่วนต่างๆ

90% PP / 10 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN

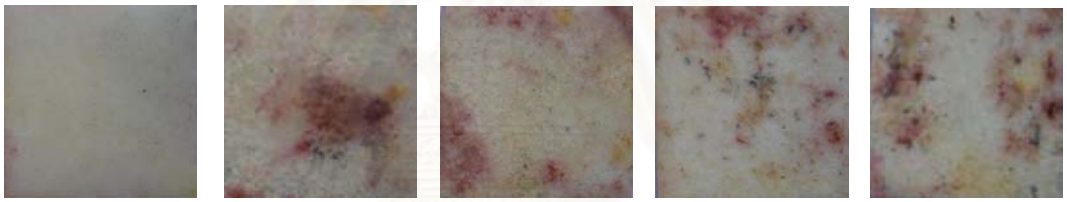
80% PP / 20 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN



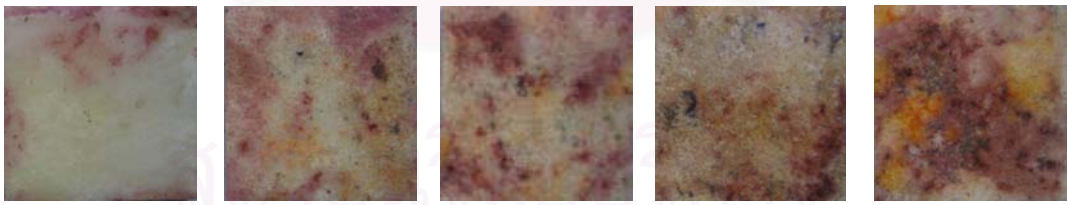
70% PP / 30 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN



60% PP / 40 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN



50% PP / 50 % GTN

0 phr MGTN 5 phr MGTN 10 phr MGTN 15 phr MGTN 20 phr MGTN

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชาริณี วิโนทพรรษ์ เกิดวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2524 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2546 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2548

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชาริณี วิโนทพรรษ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2524 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2546 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2548

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย