

อิทธิพลของ clay ที่มีต่อสมบัติทางกลและความว่องไวต่อความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ

โดย

นายรัฐพร สุรพัฒน์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-11-6253-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

INFLUENCE OF CLAY ON MECHANICAL PROPERTIES AND MOISTURE SENSITIVITY
OF THERMOPLASTIC STARCH

By

Natthaporn Suraphat

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Material Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2006

ISBN 974-11-6253-7

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “อิทธิพลของ clay ที่มีต่อสมบัติทางกลและความว่องไวต่อความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์” เสนอโดย นายณัฐพร สุรพัฒน์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ เดือน พ.ศ.

ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส
2. อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทช์ตระกูล

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์
คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.อรัญญา วสันตกรณ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทช์ตระกูล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวดี ชัยยุตต์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มณิสรา ปีสาร)

...../...../.....

K 47402205 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช, Clay, Cationic starch

นัฐพร สุรพัฒน์ : อิทธิพลของ clay ที่มีต่อสมบัติทางกลและความไวต่อความชื้นของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (INFLUENCE OF CLAY ON MECHANICAL PROPERTIES AND MOISTURE SENSITIVITY OF THERMOPLASTIC STARCH) อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อ.ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล. 107 หน้า. ISBN 974-11-6253-7

แป้งจัดเป็นหนึ่งในวัตถุดิบตามธรรมชาติที่มีอยู่จำนวนมาก มีราคาถูกและสามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ง่าย แป้งสามารถนำไปเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) ซึ่งมีศักยภาพนำไปใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทปิโตรเลียมได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของ TPS ที่ขึ้นรูปแบบ melt mixing และเตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ด้วยการเติม clay ชนิดต่างๆ คือ bentonite clay, bentonite clay ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วย cationic glucose (CCG) และ cationic dextrin20 (CCD20) และ cloisite30B (C30B) เป็นสารเสริมแรง เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนและชนิดของ clay ต่อการเสริมแรง และทำการขึ้นรูป TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่างๆ แบบ solution mixing เพื่อเปรียบเทียบความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ TPS และเฟสของ clay กับการขึ้นรูปแบบ melt mixing ในการขึ้นรูปแบบ melt mixing นั้นจะใช้เครื่องผสมภายใน โดยใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วย้อน 50 รอบ ต่อ นาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำ TPS ที่ได้ไปบด และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง compression moulding ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ส่วนการขึ้นรูปแบบ solution mixing จะใช้น้ำเป็นตัวกลางและใช้ อุณหภูมิในการผสม 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำ TPS ที่ได้มาระเหยนํ้าออกให้เป็นแผ่นฟิล์ม จากการทดลองพบว่าคุณสมบัติ TPS ที่ขึ้นรูปแบบ melt mixing และเตรียมจากแป้งข้าวเหนียวผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดย น้ำหนัก จะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเชิงกลดีที่สุด การผสม bentonite clay ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกดีที่สุด และการผสม C30B clay จะทำให้ชิ้นงานมีค่าคุณสมบัติเชิงกลดีที่สุดและมีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ TPS และเฟสของ clay ดีที่สุด รองลงมาคือ CCD20 และ CCG ตามลำดับ ส่วนการขึ้นรูปแบบ solution mixing นั้นจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ TPS กับเฟสของ clay ดีกว่าการขึ้นรูปแบบ melt mixing ในการทดสอบการดูดความชื้นพบว่า เมื่อเก็บชิ้นงานในตู้ควบคุมความชื้นนานขึ้นจะทำให้ค่าความทนทานต่อการดึงยึดลดลงและค่าการทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และการผสม glycerol มากขึ้นจะทำให้ชิ้นงาน TPS มีการดูดความชื้นมากขึ้น ส่วนสัดส่วนและชนิดของ clay ไม่แสดงผลที่เด่นชัดต่อสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ 1. 2.

K 47402205 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD : THERMOPLASTIC STARCH, CLAY, CATIONIC STARCH

NATTHAPORN SURAPHAT : INFLUENCE OF CLAY ON MECHANICAL PROPERTIES AND MOISTURE SENSITIVITY OF THERMOPLASTIC STARCH. THESIS ADVISORS : WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D. , AND AMNARD SITTATTRAKUL, Ph.D. 107 pp. ISBN 974-11-6253-7.

Starch is one of the most abundant renewable and low cost resources. Starch can be converted to thermoplastic starch (TPS), which has high potential to replace the petroleum based plastics. In the present work, mechanical properties of TPS derived from glutinous rice flour which was plasticized by glycerol was improved by melt mixing method. The influence of adding the bentonite clay, bentonite clay which was modified by cationic glucose (CCG), cationic dextrin20 (CCD20) and cloisite30B clay was investigated in term of the amount of clay loading and the types of clay. The miscibility of TPS and clay prepared by melt mixing method and solution mixing method was compared. For melt mixing method, the internal mixer was used and operated at 140 °C and screw speed of 50 rpm for 5 minutes. The composites were grinded and compressed by compression moulding machine to give specimens for next testings. For solution mixing method, water was used as a medium and the mixing temperature in this method was 90 °C. Then water was evaporated in vacuum oven to form film sample. From the experiment, adding of 25% w/w of glycerol in glutinous rice flour gives the best mechanical properties and adding of 10% w/w bentonite clay yields the best impact strength. The mechanical properties of the composites and the compatibility between TPS and clay are best improved with C30B clay, followed by CCD20 and CCG respectively. The compatibility between TPS and clay in solution mixing method is better than that in melt mixing method. The moisture adsorption testing indicated that the tensile strength decreases and impact strength increases with increasing the storage time in 53% RH chamber. As the amount of glycerol increased, the moisture adsorption increased. Both the amount and types of clay show no clear effect on moisture adsorption property of TPS.

Department of Materials science and Engineering, Graduate school, Silpakorn University, Academic Year 2006

Student's signature

Thesis Advisor's signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้มีส่วนร่วมดังต่อไปนี้ อ.ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล และ อ.ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส อาจารย์ที่คอยควบคุมดูแล และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดการดำเนินงานวิจัย คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ผู้ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและวิธีใช้เครื่องมือต่าง ๆ คณาจารย์ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัย ขอขอบคุณ โรงงานเส้นไหมโซเฮงที่ให้ความอนุเคราะห์แบ่งข้าวเหนียวที่ใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การอุปการะ เป็นกำลังใจ และสนับสนุน การศึกษาผู้วิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
แนวคิดของงานวิจัย	3
ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย	4
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ต้นกำเนิดของแป้ง	6
การเตรียม thermoplastic starch	10
ประเภทและลักษณะทางโครงสร้างของ clay	12
คุณสมบัติและโครงสร้างของกลูโคส	19
คุณสมบัติและโครงสร้างของ dextrin	19
Dextrose Equivalent (DE)	20
คุณสมบัติและการสังเคราะห์ cationic starch	21
การปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay	22
การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch โดยการ เติม clay เป็นสารเสริมแรง	23
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	25
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
สารเคมี	25

บทที่	หน้า
ดัชนีอักษรย่อ	26
วิธีดำเนินงานวิจัย	28
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	39
ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20 และหาปริมาณที่สังเคราะห์ได้	39
ตอนที่ 2 การปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 เป็นสาร modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยน ไอออนบวกกับไฮดรอกซิลไอออนในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้	42
ตอนที่ 3 การขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing เพื่อนำไป เปรียบเทียบลักษณะทาง morphology ของ composite ที่เตรียมได้กับการขึ้นรูป TPS แบบ melt mixing	46
ตอนที่ 4 การหาปริมาณของ glycerol ที่ทำให้ขึ้นงาน TPS ที่ใช้ การผสมแบบ melt mixing มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด.....	53
ตอนที่ 5 การหาสัดส่วนและชนิดของ clay ที่เติมลงไปในการขึ้นงาน TPS แล้วทำให้ขึ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด	57
ตอนที่ 6 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้นของ ขึ้นงาน TPS	76
ตอนที่ 7 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	81
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	88
สรุปผลการทดลอง	88
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	92
ภาคผนวก ก การคำนวณต่าง ๆ และน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ ในการขึ้นรูป TPS	93

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข เทคนิคการทดสอบต่าง ๆ	101
ประวัติผู้วิจัย	107

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณ amylose และ ปริมาณ amylopectin ที่พบในแป้งแต่ละชนิด	9
2	แสดงสูตร โมเลกุลและค่าเฉพาะตัวของ 2 : 1 phyllosilicates	15
3	อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว glycerol และ clay ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ ในการขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing	30
4	อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวและ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป ชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing	31
5	อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว bentonite clay และ glycerol ที่ใช้ในการ ขึ้นรูปชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing	35
6	อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว clay ชนิดต่าง ๆ และ glycerol ที่ใช้ในการ ขึ้นรูปชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing	36
7	ปริมาตรของ 0.1M AgNO ₃ ที่ใช้ในการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ ไอออน (Cl ⁻) ในสารละลายตัวอย่าง	41
8	ปริมาณ cationic glucose และ cationic dextrin ²⁰ ในสารละลายที่ สังเคราะห์ได้	42
9	ค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay, CD, CCG และ CCD20	44
10	ค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ในชิ้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ melt mixing และ solution mixing	48
11	การเปรียบเทียบลักษณะ composite ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธี melt mixing และ solution mixing	51
12	ค่าคุณสมบัติในการดึงยืด (Tensile properties) ของ TPS ที่เตรียมจาก แป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก	53
13	ค่าคุณสมบัติในการทนต่อแรงกระแทก (impact properties) ของ TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35%	56

ตารางที่	หน้า
14	ค่าคุณสมบัติในการดึงยึด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก 58
15	ค่าคุณสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ ผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน 62
16	ค่าคุณสมบัติในการดึงยึด (tensile properties) และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 65
17	ค่าคุณสมบัติทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties) และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่างๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 73
18	การเปรียบเทียบ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก 76
19	การเปรียบเทียบ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก 78
20	การเปรียบเทียบ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay , CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 2% โดยน้ำหนัก 80
21	อุณหภูมิ onset และ inflection point ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมขึ้นรูป TPS และวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลาย cationic 82
22	อุณหภูมิ onset และ inflection point ของ clay ชนิดต่าง ๆ 83
23	อุณหภูมิ onset และ inflection point ของชิ้นงานสูตร MGly25-Be-10-0 85

ตารางที่	หน้า
24	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> อุณหภูมิ onset และ inflection point ของชั้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปในชั้นงาน </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">86</div> </div>
25	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> ปริมาณของ 0.1M AgNO₃ ที่ใช้ในการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ (Cl⁻) ในสารละลายตัวอย่าง </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">95</div> </div>
26	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว glycerol และ clay ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 3 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">99</div> </div>
27	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวและ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 3 . </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">99</div> </div>
28	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว bentonite clay และ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 5 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">100</div> </div>
29	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว clay ชนิดต่าง ๆ และ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 5 </div> <div style="width: 15%; text-align: right;">100</div> </div>

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงการต่อของกลูโคสใน amylose	7
2	แสดงการต่อของกลูโคสใน amylopectin	8
3	ลักษณะของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดเมื่อใช้เอทานอลามีน (a,b) และกลีเซอรอลเป็น (c,d) พลาสติไซเซอร์	11
4	แสดงการจำแนกประเภทของสารพวก silicate	14
5	แสดงโครงสร้างของ 2 : 1 phyllosilicates	15
6	แสดงโครงสร้างของผลึกและ chemistry ของ smectite-group clay minerals	16
7	แสดงชนิดของ polymer / layered silicate nanocomposite	18
8	โครงสร้างของ glucose	19
9	โครงสร้างของ dextrin	20
10	แสดงการสังเคราะห์ cationic starch	22
11	การผสมแป้งกับ glycerol ในถุง polyethylene	31
12	การใส่ compound ลงใน internal mixer	32
13	การนำ TPS ที่ผ่านการบดแล้วมาใส่ในแม่พิมพ์	33
14	การปิดประกบแม่พิมพ์	33
15	การอัดเข้าแม่พิมพ์โดยใช้เครื่อง compression molding	34
16	แม่พิมพ์แผ่นที่ 2 หลังจากแกะออกจากแม่พิมพ์แผ่นที่ 1 และ แม่พิมพ์แผ่นที่ 3	34
17	การเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53%	38
18	(a) สารละลายของ glucose ที่ผสมกับน้ำ deionize water (b) สารละลายของ dextrin 20 ที่ผสมกับน้ำ deionize water	39
19	สารละลายของ CHPTAC ที่ผสมกับ 1M NaOH	40
20	สารละลาย cationic glucose	40
21	สารละลาย cationic dextrin20	40
22	CCG ที่ทำการบดแล้ว	43
23	CCD20 ที่ทำการบดแล้ว	43

ภาพที่	หน้า
24 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ bentonite clay, CD, CCG และ CCD20.....	44
25 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ (a) ชิ้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ melt mixing (b) ชิ้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ solution mixing	47
26 โครงสร้างของ MT2EtOH	50
27 ค่า young's modulus ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก	54
28 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็น พลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก	54
29 ค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก	55
30 ค่า young's modulus ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก	58
31 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก	59
32 ค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก	59
33 ค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ ผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน.....	63
34 ค่า young's modulus ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่างๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน	66

ภาพที่	หน้า
35	ค่า young's modulus และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 66
36	ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 67
37	ค่า tensile strength และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 67
38	ค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 68
39	ค่า percentage strain at break และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 68
40	ค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน 74

ภาพที่	หน้า
41	ค่า impact strength และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บ ชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และ ไม่มีการเก็บชิ้นงาน 74
42	%moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม glycerol เป็น พลาสติกไซเซออร์ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก 77
43	%moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก 79
44	%moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 2% โดยน้ำหนัก 80
45	TGA thermogram ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมขึ้นรูป TPS และการ สังเคราะห์สารละลาย cationic 81
46	TGA thermogram ของ bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B 83
47	TGA thermogram ของชิ้นงานสูตร MGly25-Be-10-0 84
48	TGA thermogram ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก 86
49	แสดงแผนภาพการทำงานของ XRD 104

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันพลาสติกที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมสูงมากจึงมีการผลิตพลาสติกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากในช่วงที่ผ่านมา พอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้เกือบทั้งหมด เป็นผลผลิตจากน้ำมันดิบ (crude oil) และแก๊สธรรมชาติ (natural gas) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดสิ้นไปไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ในระยะเวลาอันสั้นได้ อีกทั้งในกระบวนการผลิตและกระบวนการทำลายหรือย่อยสลายพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดมลพิษในหลาย ๆ ด้าน ในระยะหลังจึงได้มีการค้นคว้าวิจัย เพื่อหาแหล่งวัตถุดิบใหม่มาทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์แบบดั้งเดิม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) เป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความสนใจใน

การนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์แบบดั้งเดิม

พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดคือ พอลิเมอร์จากพืช เพราะพืชเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มาก สามารถปลูกขึ้นทดแทนได้ง่ายและมีราคาถูก พอลิเมอร์จากพืชที่สำคัญมี 2 ประเภทคือ เซลลูโลส (cellulose) และแป้ง (starch) ทั้งเซลลูโลสและแป้งต่างเป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีมอนอเมอร์เหมือนกันคือ กลูโคส แต่มีการเชื่อมต่อ (linkage) ที่แตกต่างกัน โดยแป้งจะมีการเชื่อมต่อของกลูโคส ด้วยพันธะ α -1,4- glucosidic bonds และ α -1,6- glucosidic bonds ส่วนเซลลูโลสจะมีการเชื่อมต่อของ glucose ด้วยพันธะ β -1,4- glucosidic bonds ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน เซลลูโลสจะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างค่อนข้างเป็นเส้นตรงทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวชิดกันได้มาก เซลลูโลสจึงมีสมบัติที่แข็งซึ่งนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ค่อนข้างยาก ส่วนแป้งจะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างขดกันเป็นเกลียว (helix) ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยกว่าในเซลลูโลส โดยโมเลกุลจะรวมกันอยู่ในลักษณะเป็นเม็ด (granules) ดังนั้นแป้งจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้แทนพลาสติกสังเคราะห์

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น เมล็ด หัว ราก พืชที่มีแป้งในปริมาณมากได้แก่ ข้าว มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี หรือพวกธัญพืชนั่นเอง ซึ่งผลผลิตเหล่านี้มีปริมาณค่อนข้างมาก หาง่าย สามารถปลูกทดแทนได้ในเวลาที่รวดเร็วทำให้ผลผลิต

เหล่านี้มีราคาถูก และสามารถสร้างชิ้นใหม่ได้โดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม อีกทั้งแป้งยังสามารถย่อยสลายทางธรรมชาติได้เกือบ 100% ทำให้ไม่เกิดเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อแป้งกลายเป็นขยะ แต่โดยธรรมชาติของแป้งจะมีคุณสมบัติคล้ายกับพลาสติกพวก thermoset คือเมื่อให้ความร้อนแป้งจะเกิดการสลายตัวก่อนที่จะเกิดการหลอมเนื่องจากภายในสายโซ่โมเลกุลของแป้งและระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งจะมีพันธะไฮโดรเจนอยู่จำนวนมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่จำกัดการนำไปใช้งานและการขึ้นรูปของแป้ง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงแป้งให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก โดยวิธีการหนึ่งที่สามารถปรับปรุงแป้งให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้คือการนำแป้งผสมกับ plasticizer และน้ำ และทำการให้ความร้อนซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกจากแป้งหรือ thermoplastic starch (TPS)

ข้อจำกัดที่สำคัญของการนำผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกจากแป้ง (TPS) มาใช้ประโยชน์คือชิ้นงานจะมีคุณสมบัติทางกลที่ไม่ดีนักและชิ้นงานจะดูความชื้นและว่องไวต่อน้ำมากเนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของ TPS นั้น มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริงจึงต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อแก้ไขข้อจำกัดทั้งสองก่อน งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการเตรียม TPS รวมถึงกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงานด้านสมบัติทางกลและความว่องไวต่อความชื้นด้วยการเติมสารเสริมแรง (filler) ลงไปใน TPS

โดยในปัจจุบันนี้สารเสริมแรงที่นิยมนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติกมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่ในจำนวนสารเสริมแรงเหล่านี้ clay จัดว่าเป็นสารเสริมแรงที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากชนิดหนึ่ง เนื่องจาก clay เป็นสารเสริมแรงธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่าย มีศักยภาพเพียงพอในการที่จะนำไปดัดแปลงเป็นสารเสริมแรงที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน เพราะว่าโครงสร้างโดยธรรมชาติของ clay นั้นจะมีลักษณะเป็น silicate layer ที่มีรูปทรงเป็นรูปเหลี่ยมวางซ้อนทับกัน ซึ่งความหนาของรูปทรงเหลี่ยม ในแต่ละชั้นจะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเท่านั้น อีกทั้ง clay ยังเป็นสารเสริมแรงที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic filler) ทำให้มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับ TPS จึงมีแนวโน้มที่จะมีความเข้ากันได้กับ TPS และยังวิธีเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง clay กับ TPS ได้โดยการนำ clay มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสาร modifier หรือ surfactant ทำให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออนที่มีอยู่ในชั้น silicate ของ clay ตามธรรมชาติกับไอออนของสาร modifier ทำให้โมเลกุลของ modifier เข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay และปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล modifier จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วสูง เช่น หมู่ไฮดรอกซิล อยู่ เมื่อนำ clay ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติแล้วไปเติมลงใน TPS หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วสูงในโมเลกุลของ modifier ที่อยู่ชั้น silicate ของ clay จะช่วยให้โมเลกุลของ TPS ที่ทำหน้าที่เป็น matrix อยู่รอบๆ มีความเข้ากันได้กับ clay มากขึ้น เมื่อโมเลกุลของ modifier เข้าไปอยู่ในชั้น

silicate ของ clay จะทำให้ชั้น silicate ของ clay ขยายออกจากกันเกิดโครงสร้าง intercalate และอาจเหนียวนำไปเกิดเป็น morphology แบบ exfoliate ได้ เป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการเป็นสารเสริมแรงของ clay ได้อีกด้วย เพราะฉะนั้น TPS ที่มีการเติม clay จึงเป็นระบบที่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติเกือบ 100% ทำให้เป็นวัสดุที่ย่อยสลายทางธรรมชาติได้ค่อนข้างดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติม clay และ clay ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเป็นสารเสริมแรงลงใน TPS เพื่อดูผลของสมบัติทางกลและความว่องไวต่อความชื้นของชิ้นงานว่าสามารถที่จะปรับปรุงได้หรือไม่

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin ที่สังเคราะห์ได้เป็น modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออน (Na^+) ในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้
2. เพื่อศึกษาการเตรียม thermoplastic starch (TPS) จากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็น plasticizer ด้วยวิธีการ melt mixing และวิธีการ solution mixing
3. เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของ clay ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความชื้นของ TPS ที่เตรียมได้

แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ที่ได้จากการผสมแป้งข้าวเหนียว กับ พลาสติกไซเซออร์ คือ glycerol และมีการเติมสารเติมแต่งประเภทเสริมแรงคือ clay ชนิดต่าง ๆ 4 ชนิด ได้แก่ bentonite, bentonite ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติโดย cationic glucose (CCG), bentonite ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติโดย cationic dextrin20 (CCD20) และ cloisite30B (commercial grade) โดยใช้วิธีการผสมแบบ melt mixing และ solution mixing ซึ่งในส่วนของ melt mixing จะทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ clay ที่ใช้ในการผสมเพื่อหาทางปรับปรุงข้อด้อยในเรื่องของความแข็งแรงของ TPS

โดยงานวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 : สังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20

ส่วนที่ 2 : ปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 เป็นสาร modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับ

โซเดียมไอออนในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้

ส่วนที่ 3 : เปรียบเทียบลักษณะทาง morphology ของ composite ที่เตรียมได้จากการผสมแบบ melt mixing กับ solution mixing

ส่วนที่ 4 : หาปริมาณของ glycerol ที่ทำให้ชิ้นงาน TPS ที่ใช้การผสมแบบ melt mixing มีคุณสมบัติเชิงกลดีที่สุด

ส่วนที่ 5 : ปรับปรุงความแข็งแรงของ TPS โดยการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ด้วยการผสมแบบ melt mixing แล้วนำ TPS ที่เตรียมได้มาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ส่วนที่ 6 : เปรียบเทียบปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่ใช้การผสมแบบ melt mixing

ส่วนที่ 7 : เปรียบเทียบการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน TPS ที่ใช้การผสมแบบ melt mixing

ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

1. แป้งที่ใช้ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว
2. พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ได้แก่ glycerol
3. สารเติมแต่งประเภทเสริมแรง (filler) ที่ใช้ได้แก่ clay 4 ชนิด คือ bentonite, bentonite ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติโดย cationic glucose (CCG), bentonite ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติโดย cationic dextrin20 (CCD20) และ cloisite30B (commercial grade)
4. ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล โดยใช้ tensile tester, impact tester
5. ตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay โดยใช้เครื่องมือ XRD
6. ตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่องมือ TGA

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
3. สังเคราะห์สารละลาย cationic glucose และ cationic dextrin20 จากนั้นนำมาหาปริมาณ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลายโดยใช้วิธีการหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl) ในสารละลายด้วยวิธีของ Mohr
4. นำ bentonite clay มาปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 3 จากนั้นนำไปศึกษาระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay โดยใช้เครื่องมือ XRD

5. เตรียม TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ 4 ชนิด คือ bentonite, CCG, CCD20 และ cloisite30B (commercial grade) ด้วยวิธีการผสมแบบ melt mixing และ solution mixing แล้วศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ใน TPS โดยใช้เครื่องมือ XRD
6. เตรียม TPS จากแป้งข้าวเหนียวด้วยวิธีการผสมแบบ melt mixing โดยทำการเปลี่ยนปริมาณ glycerol แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล
7. นำ TPS ที่มีปริมาณ glycerol ที่เหมาะสมที่เตรียมด้วยวิธีผสมแบบ melt mixing มาเติม clay ชนิดต่าง ๆ 4 ชนิด คือ bentonite, CCG, CCD20 และ cloisite30B (commercial grade) แล้วศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ใน TPS
8. นำชิ้นงาน TPS ที่ได้จากการผสมแบบ melt mixing ไปตรวจสอบค่า % moisture adsorption
9. นำชิ้นงาน TPS ที่ได้มาวิเคราะห์หาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA
10. วิเคราะห์ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง
11. สรุปผลการวิจัย
12. เสนองานวิจัยในรูปแบบของรายงาน

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวนลิขสิทธิ์

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20 ได้
2. สามารถทำการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 เป็นสาร modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออนในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้
3. สามารถเตรียม TPS จากแป้งข้าวเหนียว, glycerol และ clay ชนิดต่าง ๆ ได้
4. สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งข้าวเหนียว, พลาสติกไซเซอร์ (glycerol) และ clay ชนิดต่าง ๆ ได้
5. TPS ที่เตรียมได้มีความแข็งแรงดีขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

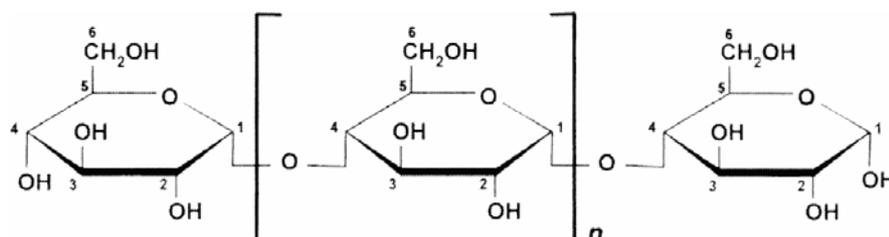
ต้นกำเนิดของแป้ง [1]

แป้งเป็น homopolysaccharide ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช และเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้นและผล โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (starch granule) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่างและบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกันและเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน แป้ง ในการผลิตนั้นหมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปนเช่น โปรตีน ไขมันและเกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า flour เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวเจ้า แต่เมื่อสิ่งเจือปนอื่น ๆ ถูกสกัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ เรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช แป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีโดยนำไปทำปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ มากมาย แป้งที่มีการนำมาใช้มากที่สุดในโลก คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวสาลีและแป้งมันฝรั่ง

1. ลักษณะโครงสร้างภายในโมเลกุลและคุณสมบัติของแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ซึ่งแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (amylopectin) วางตัวในแนวรัศมี amylose ประกอบด้วยกลูโคส 250-300 โมเลกุล ซึ่งต่อกันเป็นโซ่ยาวแบบไม่มีกิ่งแต่โซ่จะมีลักษณะขดเป็นเกลียว (helix) amylose มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500,000 Da เป็นโมเลกุลเส้นยาว ส่วนใหญ่ประกอบด้วย α -1,4- glucosidic bonds และส่วนน้อยเป็น α -1,6- glucosidic bonds แป้งจากธัญพืชเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณ amylose สูงประมาณ 28 % แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาขามีปริมาณ amylose ต่ำ ประมาณ 20 % waxy starch ไม่มีปริมาณ amylose เลย และแป้งจาก amylo maize มี amylose สูงมากถึง 80 %

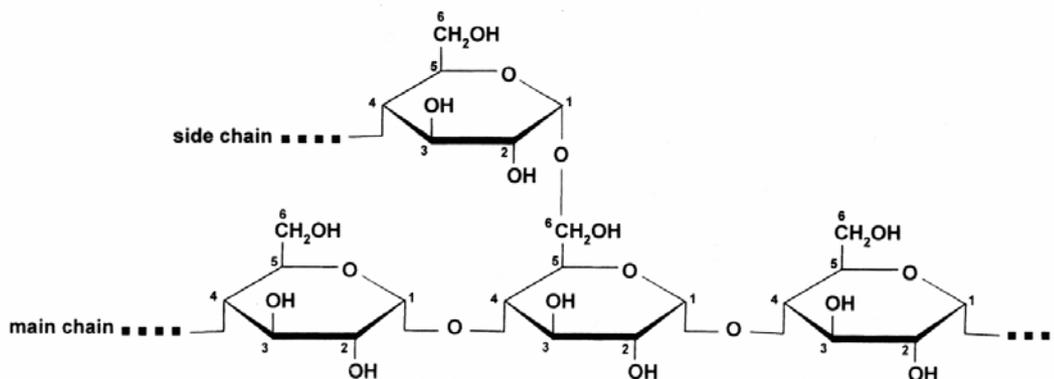
ตำแหน่งของ amylose ภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง amylose บางส่วนอยู่ในกลุ่มของ amylopectin บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วน amorphous และส่วนผลึก crystalline amylose ไม่ละลายน้ำแต่เมื่อเติมน้ำลงไป amylose จะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย และเนื่องจาก โมเลกุลของ amylose เป็นสายยาวจึงมีโอกาสที่จะจับคู่กับ amylose อีกโมเลกุลหนึ่ง เป็นสายยาว คู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการ อุ่นน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า retrogradation แต่ waxy starch ซึ่งไม่มี amylose เลยหรือมี amylose เป็นองค์ประกอบน้อยมากจะไม่เกิด retrogradation



รูปที่ 1 แสดงการต่อของกลูโคสใน amylose [1]

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวนิลขลิทธิ์

amylopectin เป็นโฮโมโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเม็ดสตาร์ช ประมาณ 70-100 % มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีสายแขนงแยกออกมาซึ่งแต่ละแขนงจะมีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 20-35 หน่วย ดังนั้นในโมเลกุลของ amylopectin จึงมีทั้งพันธะ $\alpha(1 \rightarrow 4)$ และ $\alpha(1 \rightarrow 6)$ โดยปกติ amylopectin มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า amylose มาก มีน้ำหนักโมเลกุลขั้นต่ำประมาณ 1 ล้าน amylopectin มีพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่า amylose และมีความคงตัวมากกว่า ยังคงสภาพเหลว มีความหนืด ยืดหยุ่น สำหรับ amylopectin ของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลังและมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90 % ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20 % จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของ amylopectin ทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) การเกิดเกลียวคู่ของ amylopectin ต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน ทั้ง amylopectin ภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งที่อยู่ที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มเดียวกันหรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2 แสดงการต่อของกลูโคสใน amylopectin [1]

โครงสร้างเม็ดแป้ง เม็ดแป้งนอกจากจะประกอบด้วย α -glucan สองส่วนใหญ่ๆ ที่เรียกว่า amylose และ amylopectin คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 85-90 % โดยน้ำหนัก น้ำประมาณ 10-15 % ไขมันประมาณ 1 % และโปรตีนในระดับที่ต่ำ (<0.5 %) น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูป bound water และน้ำในรูปอิสระ โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ น้ำสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ เม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งทำหน้าที่เป็น molecular sieve แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (gelatinization temperature) เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันหรือ water bridges แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่า อุณหภูมิเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้สมบัติการละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของ amylose ขนาดเล็กจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุล amylose ที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซึมน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิด retrogradation เมื่อทำให้อุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมา

2. วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณ amylose ที่สำคัญ

2.1 วิธีการทำให้เกิดสี (colorimetric method) วิธีนี้อาศัยคุณสมบัติ ในการจับตัวกันระหว่าง amylose กับไอโอดีน แล้วได้สารประกอบสีน้ำเงิน วัตสีที่เกิดขึ้นได้ด้วย spectrophotometer เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด แต่วิธีนี้จะใช้เวลาและต้องเตรียมกราฟมาตรฐาน นอกจากนี้ amylopectin ที่มีกิ่งแขนงเป็นจำนวนมาก จะจับกับไอโอดีนได้น้อยให้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีม่วงแดงซึ่งสามารถบวกรวมการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารเชิงซ้อนระหว่างไอโอดีนกับ amylose ได้

2.2 การใช้ Differential Scanning Calorimeter วิธีนี้จะคำนวณค่าปริมาณ amylose จากพลังงานที่ใช้ในการละลายสารประกอบเชิงซ้อนของ amylose และไขมัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายน้ำแข็งถูกให้ความร้อนในสภาพที่มีไขมันมากเกินไปให้ amylose ในแป้งทั้งหมดจับกับไขมัน พลังงานที่ใช้ในการละลายจะได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ peak ที่เกิดขึ้น วิธีนี้จะสะดวกและรวดเร็วให้ผลการทดลองที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ amylose สูง

2.3 การใช้ High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC) วิธีนี้อาศัยความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของโมเลกุลของตัวอย่าง โดยโมเลกุลที่มีขนาดต่างกัน เมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยวัสดุที่มีรูพรุนจะมีความสามารถในการแพร่ผ่านแตกต่างกัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ทำให้ถูกชะออกมาได้ช้าที่สุดส่วนโมเลกุลที่มีขนาดกึ่งกลาง ไม่ใหญ่มากนักจะแพร่ผ่านได้เฉพาะบางส่วนของรูพรุนและจะถูกกักจากรูที่เล็กมาก ๆ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ จึงถูกชะออกมาจากคอลัมน์เป็นอันดับแรก

ตารางที่ 1 ปริมาณ amylose และ ปริมาณ amylopectin ที่พบในแป้งแต่ละชนิด

ชนิดของแป้ง	% amylose	% amylopectin
แป้งข้าวเจ้า	17	83
แป้งข้าวเหนียว	0-2	98-100
แป้งมันสำปะหลัง	17	83

3. การนำแป้ง (starch) มาทำเป็น thermoplastic starch (TPS)

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาทดแทนได้ง่ายมีอยู่มากในธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มเนื้อ (filler) ใน polyolefins ต่อมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีดกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ low density polyethylene [2]

โดยทั่วไปเราไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูป thermoplastic ทั่ว ๆ ไป เพราะแป้งจะไม่เกิดการไหลขึ้นเมื่อเราให้ความร้อน ในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็น thermoplastic starch จำเป็นที่จะต้องเติม plasticizer เช่น glycerol [3], ethanolamine, ฟออร์มาไมด์ [4], ยูเรีย [4] และซอร์บิทอลลงไป ซึ่งภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอจะทำให้แป้งสามารถหลอมและไหลได้ สามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้ เช่น single screw extrusion [4], twin screw extrusion [5], compression molding [6]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

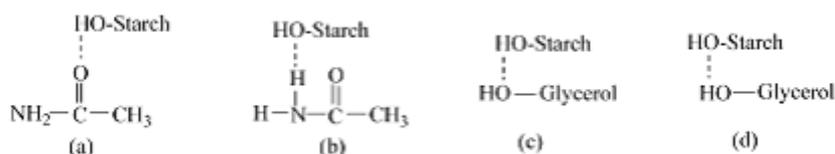
การเตรียม thermoplastic starch

แป้งที่ใช้ทำ thermoplastic starch ที่นิยมใช้มีหลายชนิด ซึ่งจะเป็นแป้งที่ได้จากพืช เช่น แป้งข้าวบาเลย์ [3], ข้าวโพด [7] และแป้งสาลี [5] เป็นต้น โดยจากงานวิจัยของ Mingfu Huang, Jingao Yu และ Xiaofei Ma [7] ได้ใช้เอทานอลามีน และ กลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับการเตรียมพลาสติกที่ได้จากแป้งข้าวโพด โดยใช้เครื่องผสม คือ G-11-100 และใช้เครื่องอัดรีด คือ single screw extruder SJ-25 โดยใช้ความเร็วรอบของสกรูคือ 20 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 110 - 120°C และจากงานวิจัยสรุปได้ว่า thermoplastic starch ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดที่ใช้เอทานอลามีน เป็นพลาสติกไซเซอร์ มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและมีการเกิด re-crystallization น้อยกว่ากรณีที่ใช้ กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

และจากงานวิจัยของ F.J. Rodriguez-Gonzalez, B.A. Ramsay และ B.D. Favis [5] ได้ทำการวิจัย blend ของ PE และ TPS โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งใช้สัดส่วนที่แตกต่างกันคือ 29, 33, 36 และ 40 % ตามลำดับ และใช้เครื่อง 10-rotating twin screw extruder (TSE) ใช้ความเร็วสกรู 150 รอบต่อนาที จากการวิจัยสรุปได้ว่า ค่า glass transition temperature (T_g) ของ thermoplastic starch ขึ้นอยู่กับปริมาณของกลีเซอรอลเป็นอย่างมาก โดยปริมาณสูงสุดของกลีเซอรอลที่เติมลงไปเติมได้สูงสุดคือ 30%

ในการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปในการเตรียม thermoplastic starch นั้น พลาสติกไซเซอร์จะไปช่วยให้ glass transition temperature (Tg) ลดต่ำลง ช่วยไม่ให้แป้งเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน [5] และแรงเฉือน นอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์ยังช่วยปรับคุณสมบัติของ thermoplastic starch ที่เตรียมได้อีกด้วย คือ ช่วยลดการเกิด re-crystallization ลง [4] และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้สามารถใช้งานได้จริงอีกด้วย [7] โดยพลาสติกไซเซอร์จะเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งโดยจะไปเกิดกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลของแป้ง ซึ่งจะช่วยให้แป้งสามารถทำเป็นพลาสติกได้ ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้กันมาก คือ พวก polyol plasticizer เช่น กลีเซอรอล เป็นต้น [8]

ปัญหาที่พบโดยทั่วไปของ thermoplastic ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ คือ มันมีโอกาสนในการเกิด re-crystallization หลังจากการเก็บรักษาไว้ หรือ ขณะใช้งาน เป็นผลทำให้ thermoplastic starch แข็งและเปราะ ดังนั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาให้ได้พลาสติกไซเซอร์ที่มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุด เพื่อให้ thermoplastic starch มีความยืดหยุ่นที่ดี (flexibility) และลดการเกิด re-crystallization หรือ retrogradation ขณะเก็บรักษาได้ โดยจากการวิจัยของ Xiaofei Ma และ Jingao Yu [8] ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้แป้งข้าวโพดที่มีความชื้น 11% และใช้พลาสติกไซเซอร์ คือ กลีเซอรอล, ยูเรีย, อะเซทาไมด์, พอร์มาไมด์ และพอร์มาไมด์-อะเซทาไมด์ โดยใช้เครื่อง single screw extruder SJ-25 โดยมีค่า L/D = 25 : 1 และมีความเร็วรอบของสกรูเป็น 20 รอบต่อนาที โดยให้อุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของเครื่องอัดรีด (extruder) จาก feed zone จนถึงบริเวณ die ลักษณะการเกิดพันธะไฮโดรเจนของแป้งกับกลีเซอรอล และอะเซทาไมด์ แสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดเมื่อใช้อะเซทาไมด์ (a,b) และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ (c,d) [8]

และเนื่องจากว่าไนโตรเจน (N) ในอะเซททาไมด์ให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าออกซิเจน (O) ในกลีเซอรอล ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนของ a มากกว่า c และ b มากกว่า d และฟอร์มาไมด์เกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกว่าอะเซททาไมด์ ทั้งนี้เนื่องจากหมู่แทนที่ของอะเซททาไมด์ คือ หมู่เมทิล ทำให้เกิดความเกะกะมากกว่า จึงมีความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนต่ำกว่านั่นเอง จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถบอกความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นได้ตามชนิดของ พลาสติกไซเซออร์ ดังนี้ ยูเรีย > ฟอร์มาไมด์ > อะเซททาไมด์ > พอลิออล (เช่น กลีเซอรอล, ไกลคอล, ซอบินอล และ น้ำตาล เป็นต้น) และจากการวิเคราะห์โดยใช้ FT-IR ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีแป้งปริมาณเล็กน้อยสามารถเกิดปฏิกิริยา กับยูเรียได้ตามสมการ



การเกิด re-crystallization หรือ retrogradation ของ thermoplastic starch นั้นจะขึ้นอยู่กับ การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างพลาสติกไซเซออร์และโมเลกุลของแป้ง ถ้าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่าง พลาสติกไซเซออร์กับโมเลกุลของแป้งค่อนข้างแข็งแรง ก็จะทำให้เกิด re-crystallization ของแป้งได้ยากขึ้น ซึ่งพลาสติกไซเซออร์พวกเอไมด์ค่อนข้างให้ผลที่ดี

นอกจากนี้การเตรียมเทอร์โมพลาสติกในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้ ซึ่งตามวิธีของ A.J.F. Carvalho และคณะ [6] ได้ใช้แป้งผสมกับ glycerol ในถุง polyethylene ทิ้งไว้หนึ่งคืน เพื่อให้ glycerol กระจายตัวได้อย่างเต็มที่ จากนั้นจึงนำสารผสมดังกล่าวเข้าผสมในเครื่อง Haake Rheomix 600 batch mixer ที่ต่อกับ roller rotors ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 50 rpm ที่อุณหภูมิ 150-160 °C เป็นเวลา 6 นาที ก็จะได้ thermoplastic starch ซึ่งนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการกดอัด (compression) ที่อุณหภูมิ 160°C เพื่อเตรียมชิ้นงานไปทดสอบต่อไป

ประเภทและลักษณะทางโครงสร้างของ clay [9]

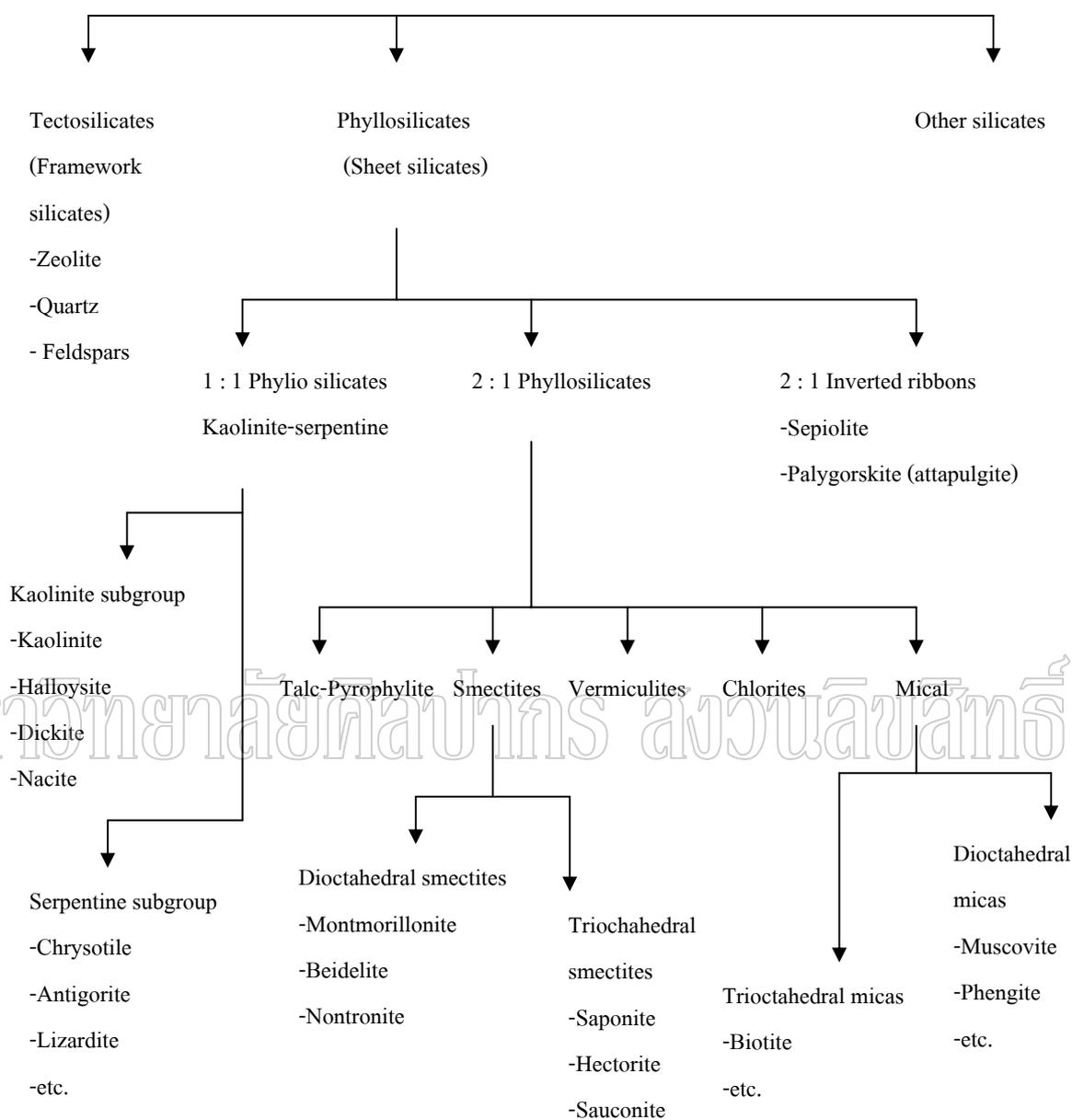
Clay เป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งมี silicates เป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งในปัจจุบันนี้ clay ได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ อย่างมากมาย โดยในทางธรณีวิทยานั้น clay มีความหมายที่กว้างและมีความหมายได้หลายความหมาย เช่น เป็นกลุ่มของเม็ดแร่ที่มีความละเอียดหรือเป็นหินชนิดหนึ่ง ส่วนความหมายที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ เป็นสารที่เป็นเม็ดเล็กละเอียดที่เกิดจากการสะสมของตะกอนจำพวก non - aluminosilicates เช่น พวกหิน shale หรือพวก argillaceous soils

โดย clay หรือสารจำพวก silicates ในปัจจุบันนี้จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 4) คือ [10]

1. Tectosilicates (Framework silicates) เป็น clay ประเภทที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างและมีรูพรุนอยู่จำนวนมาก
2. Phyllosilicates (sheet silicates) เป็น clay ประเภทที่มี silicate ต่อกันเป็นชั้น ๆ ในโครงสร้างซึ่งแต่ละชั้นของ silicate จะมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม
3. Other silicates เป็น clay ประเภทอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างต่างจาก clay 2 ประเภทข้างต้น

ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกหรือผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนใหญ่จะใช้ clay เติมลงไปผสมกับผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นสารเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์พลาสติกหรือ ผลิตภัณฑ์ เพราะ clay นั้นมีโครงสร้างเป็น silicate ที่แข็งแรงจึงทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ได้ ส่วนประเภทของ clay ที่นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงนั้นจะเป็นประเภท sheet silicates หรือที่นิยมเรียกว่า layered silicates ชนิด 2 : 1 phyllosilicates ซึ่งภายในโครงสร้างของ clay ประเภทนี้จะประกอบไปด้วยชั้นของ tetrahedrally coordinated silicon atom 2 ชั้น ที่ต่ออยู่กับส่วนปลายของชั้น octahedral sheet ของ aluminium หรือ magnesium hydride โดยมีความหนาของชั้นประมาณ 1 nm และมีขนาดของชั้นประมาณ 30 nm จนถึง microns หรือใหญ่กว่า ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะในแต่ละชนิดของ layered silicates ในการที่แต่ละชั้นนั้นมาอยู่ใกล้กันทำให้เกิดแรง van der Waals ขึ้นระหว่างชั้น ซึ่งเรียกว่า interlayer หรือ gallery การแทนที่ภายในชั้นของ silicates ของประจุบวก เช่น Al^{3+} ถูกแทนที่โดย Mg^{2+} หรือ Mg^{2+} ถูกแทนที่โดย Li^{1+} ก่อให้เกิด ประจุลบขึ้นเพื่อทำให้ประจุในระบบสมดุลโดยพวก alkali และ alkali earth cations ที่อยู่ภายใน galleries ซึ่ง layered silicates ประเภทนี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธี cation exchange capacity (CEC) ซึ่งจะแสดงเป็นหน่วย mequiv / 100 gm ค่าประจุนี้จะไม่คงที่แต่จะขึ้นอยู่กับชั้นต่อชั้นและมักจะนิยมใช้เป็นค่าเฉลี่ย

SILICATES



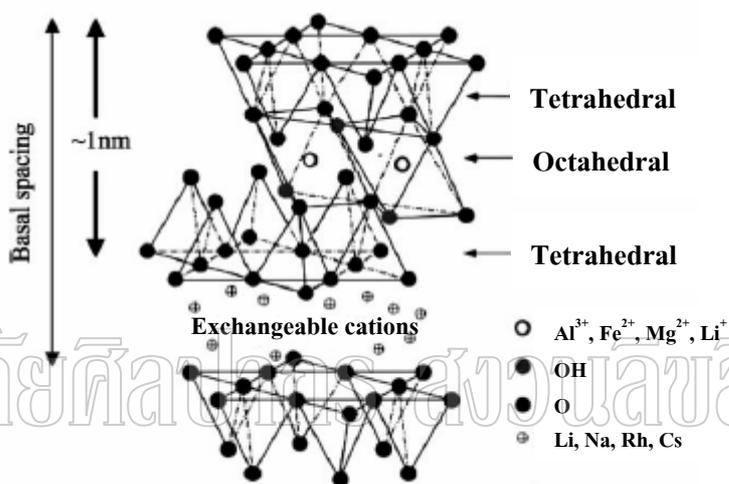
รูปที่ 4 แสดงการจำแนกประเภทของสารพวก silicate [9]

สารพวก layered silicates จะมีโครงสร้างอยู่ 2 ประเภท คือ tetrahedral – substituted และ octahedral – substituted ในกรณีของ tetrahedral – substituted นั้น ประจุลบ จะอยู่บนผิวหน้าของ ชั้น silicates ดังนั้น จึงทำให้สารพวกพอลิเมอร์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีและว่องไวกว่า octahedral – substituted layered silicated โดยลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางเคมีของ layered silicated ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงสูตรโมเลกุลและค่าเฉพาะตัวของ 2 : 1 phyllosilicates

2 : 1 phyllosilicates	Chemical formula	CEC (mequiv/100 g)	Particle length (nm)
montmorillonite	$M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	110	100 – 150
Hectonite	$M_x(Mg_{6-x}Li_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	120	200 – 300
saponite	$M_xMg_6(Si_{8-x}Al_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	86.6	50 - 60

M, monovalent cation; x, degree of isomorphous substitution (between 0.5 and 1.3)



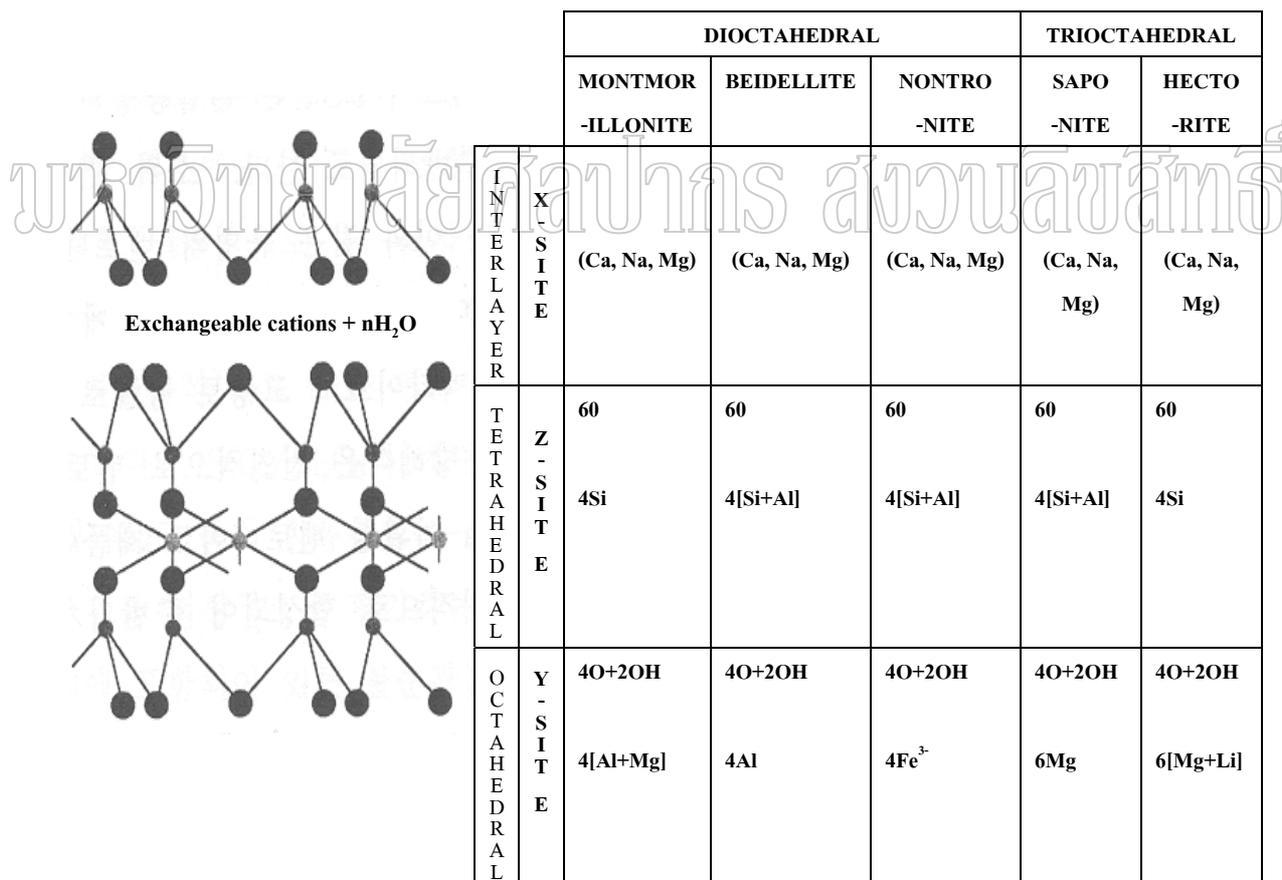
รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของ 2 : 1 phyllosilicates [10]

1. ประเภทของ clay ที่นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์

1.1 Montmorillonite เป็น clay ที่อยู่ในประเภท 2 : 1 phyllosilicates มีสูตรโมเลกุลคือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดย M_x คือ monovalent cation และ x เป็น degree of isomorphous substitution (ส่วนมากอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.3) มีความยาวของอนุภาคประมาณ 100-150 nm ปริมาณของน้ำในโครงสร้างสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ เพราะในความเป็นจริงแล้วเมื่อน้ำถูกดูดซึมโดยผลึกของ montmorillonite จะทำให้เกิดการพองตัวขึ้น มีปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้จุดนี้เองสามารถนำ montmorillonite ไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โครงสร้างผลึกพื้นฐานของ montmorillonite เป็นแบบ smectites คือ มีชั้น octahedral alumina อยู่ระหว่างชั้น tetrahedral silicates อะตอมในชั้นทั้งสองนี้จะเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยส่วนที่เป็นชั้น 3 ชั้น จะติดอยู่กับอีกหน่วยหนึ่งข้างบนโดยออกซิเจนในชั้นใกล้เคียงที่อยู่ติดกัน ซึ่งตรงส่วนนี้เองที่ทำให้เกิดพันธะที่อ่อนแอ ทำให้น้ำหรือโครงสร้างของ mineral เกิดการขยายตัวใน tetrahedral coordination นั้น

silicon อาจถูกแทนที่ได้โดย aluminium หรือ phosphorus ส่วนใน octahedral coordination aluminium นั้นอาจจะถูกแทนที่ได้โดย magnesium, iron, lithium, chromium, zinc หรือ nickel ความแตกต่างในการแทนที่กันภายใน lattice ในส่วนของตำแหน่งและชนิดของธาตุนี้เอง ทำให้ montmorillonite เป็น clay ที่มีความหลากหลายมาก

1.2 Saponite เป็น clay ที่อยู่ในประเภท 2 : 1 phyllosilicates เช่นเดียวกับ montmorillonite แต่ต่างกันคือ saponite จะอยู่ในประเภท trioctahedral smectites ส่วน montmorillonite จะอยู่ในประเภท dioctahedral smectites โดยความแตกต่างทางโครงสร้างของผลึกนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 นอกจากนี้ขนาดของ saponites จะเล็กกว่าขนาด montmorillonite คือมีขนาดความกว้างของอนุภาค ประมาณ 50 - 60 nm โดย saponite มีสูตรโมเลกุลคือ $M_x Mg_6(Si_{8-x} Al_x)Si_8 O_{20} (OH)_4$ ซึ่ง M_x คือ monovalent cation และ x เป็น degree of isomorphous substitution (ส่วนมากอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.3)



รูปที่ 6 แสดง โครงสร้างของผลึกและ chemistry ของ smectite-group clay minerals [10]

2. การเตรียม polymer / layered silicate nanocomposite

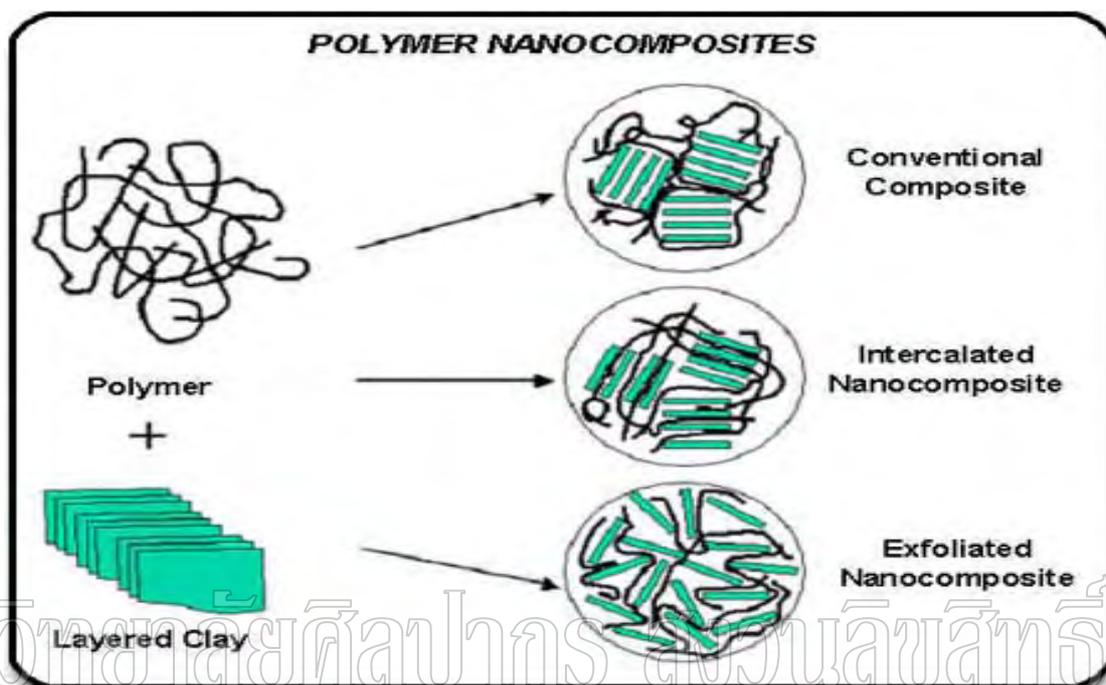
เมื่อไม่นานมานี้ polymer / layered silicate (PLS) nanocomposites ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและในการทำวิจัยในสถานศึกษาต่าง ๆ เพราะวัสดุชนิดนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้นได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพอลิเมอร์ บริสุทธิ์หรือพวก composite ชนิดอื่น ๆ [10] ซึ่งคุณสมบัติที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้แก่ การมี modulus สูงขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีความต้านทานต่อความร้อนสูงขึ้น สามารถลดการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดีขึ้น และสามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายทางธรรมชาติของวัสดุพอลิเมอร์ได้มากขึ้น [19] จากสมบัติที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้ทำให้วัสดุชนิดนี้ได้รับความสนใจทั้งในส่วนของทฤษฎีและการผลิต รวมถึงคุณสมบัติ ต่าง ๆ ของวัสดุชนิดนี้และยังได้รับความสนใจในเรื่องของลักษณะเฉพาะของโมเดลในระบบต่าง ๆ อีกด้วย

ถึงแม้ว่าความรู้เกี่ยวกับการผสมพอลิเมอร์กับ modified layered silicate และวิธีการสังเคราะห์มีมานานแล้ว แต่ในส่วนของ PLS nanocomposite นั้นเพิ่งจะมีการศึกษามาไม่นาน โดยชนิดของ nanocomposite ที่ได้มี 3 ประเภทด้วยกัน (ดังแสดงในรูปที่ 7) คือ

1. Conventional composite เป็น composites ที่ชั้นของ clay จะไม่เกิดการแตกออกจากกันและในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ก็จะมีไม่มีการแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของ clay
2. Intercalated nanocomposite เป็น nanocomposites ที่เกิดการแทรกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปในโครงสร้างของ layered silicates โดยการเกิดนั้นจะไม่ขึ้นกับสัดส่วนของ clay ต่อพอลิเมอร์และคุณสมบัติของ intercalated nanocomposite นี้จะมีคุณสมบัติคล้ายกับวัสดุพวกเซรามิก ส่วนพวก Flocculated nanocomposites จะเป็น nanocomposites ที่มีลักษณะคล้ายกับชนิด intercalated nanocomposites แต่จะต่างกันตรงที่บางเวลา ชั้นของ silicates จะเกิดแรงกระทำแบบ hydroxylated ตรงส่วนปลายทำให้เกิดการต่อกันเป็นสายยาว
3. Exfoliated nanocomposite เป็น nanocomposites ที่ชั้นของ clay แยกออกจากกันโดยเด็ดขาดกระจายตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โดยระยะทางเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของ clay ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณของ exfoliated nanocomposites จะมีน้อยกว่าพวก intercalated nanocomposites

สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ layered silicate นั้นมีมากมายหลายชนิด เช่น vinyl polymers หรือ condensation (step) polymers แต่ที่นิยมใช้กันมากคือพวก polyolefins เช่นพวก polypropylene (PP) polyethylene (PE) พวก copolymer เช่น poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) ethylene propylene diene methylene linking rubber (EPDM) และ poly (1- butene) ซึ่งจากการที่พบว่าพอลิเมอร์ประเภท polyolefins นิยมใช้ layered silicates เป็นสารเสริมแรงนี้เองทำให้ ใน

งานวิจัยนี้เกิดแนวความคิดที่จะนำ thermoplastic starch มาผสมกับ layered silicates เพื่อใช้เป็นสารเสริมแรง ส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของ thermoplastic starch ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้



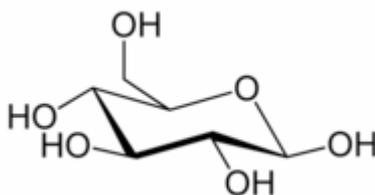
รูปที่ 7 แสดงชนิดของ polymer / layered silicate nanocomposite [10]

ปกติเทคนิค XRD สามารถใช้บ่งชี้ลักษณะโครงสร้างของ intercalated โดยสามารถบอกระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตได้ โดยปกติถ้าระยะห่างระหว่างชั้นมากขึ้น diffraction peak ก็จะเลื่อนไปที่มุมต่ำลงตามความสัมพันธ์ของ Bragg's relation ดังสมการ $\text{length of wave} = 2d \cdot \sin \alpha$ โดย d คือระยะห่างระหว่างชั้น clay ถ้า nanocomposite ที่ได้มีโครงสร้างแบบ exfoliated structure เมื่อนำไปทดสอบ XRD จะไม่ปรากฏ peak เพราะระยะห่างระหว่างชั้น clay มากเกินไปที่จะเกิด diffraction ซึ่งกรณีนี้มักใช้ TEM ในการศึกษาคู morphology โดย TEM micrography สามารถให้ข้อมูลภาพได้ทั้งลักษณะการเกิด intercalated และ exfoliated แต่ปกติแล้วทั้งสองโครงสร้างอาจปรากฏร่วมกัน ซึ่งถ้าเกิดเป็นเช่นนี้เมื่อทดสอบด้วย XRD จะได้ peak ที่ค่อนข้างกว้างและเลื่อนไปที่มุมที่ต่ำลงด้วย

คุณสมบัติและโครงสร้างของกลูโคส

กลูโคสเป็นสารประเภท monosaccharide หรือ simple sugar เป็นหนึ่งในสารประเภท carbohydrates ที่สำคัญในทางชีววิทยา ซึ่งเราสามารถพบกลูโคสในธรรมชาติได้จากหลาย ๆ ที่เช่น ในเซลล์ของเม็ดเลือด ในพืชสีเขียวที่เกิดจากการสังเคราะห์แสง โดยใช้แก๊ส carbon dioxide น้ำ และแสงแดดและมี chlorophyll ส่วนในด้านทางเคมี glucose สามารถสังเคราะห์ได้จากการนำแป้งมาย่อยด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้กรด เป็นต้น [11]

โครงสร้างของ glucose จะประกอบไปด้วย carbon atom ทั้งหมด 6 ตัวและหมู่ aldehyde รวมเรียกว่า aldohexose มี chemical formula คือ $C_6H_{12}O_6$ สามารถมีโครงสร้างได้ทั้งแบบ open chain (acyclic) และ ring (cyclic) form โดย ring form จะเป็นผลมาจากการเกิด intramolecular reaction ขึ้นระหว่าง carbon atom ใน หมู่ aldehyde กับ carbon atom ตัวที่ 5 ของหมู่ hydroxyl ดังรูปที่ 8 ใน water solution เราจะพบโครงสร้างของ glucose ทั้ง 2 รูปแบบอยู่ในสถานะสมดุลกัน ในน้ำตาลพวก aldohexose จะมี 4 optical centers ทำให้เกิด $2^4 = 16$ optical stereoisomers ซึ่งจะแบ่งเป็นกลุ่มได้ 2 กลุ่มคือ L และ D อย่างละ 8 isomers ซึ่งมี isomer ที่พบมากในชีวิตประจำวันคือ D-glucose (Glu), D-galactose (Gal) และ D-mannose (Man) โดยในส่วนของ D isomers เมื่อพิจารณาใน carbon atom ตัวที่ 1 พบว่าเมื่อเกิดเป็น cyclic form จะทำให้เกิดรูปแบบของวงแหวน 2 ชนิดซึ่งเรียกว่า anomers แบ่งเป็น α -D-glucose และ β -D-glucose ทั้งสองโครงสร้างนี้มีความแตกต่างกันตรงการจัดเรียงตัวของหมู่ hydroxyl ที่ต่อกับ carbon atom ตัวที่ 1 ในวงแหวน



รูปที่ 8 โครงสร้างของ glucose [11]

คุณสมบัติและโครงสร้างของ dextrin

Dextrin เป็นกลุ่มของ low molecular weight carbohydrate เกิดจากปฏิกิริยา hydrolysis ของแป้ง dextrin มี general formula เหมือนกับ carbohydrates แต่มีความยาวของสายโซ่ที่สั้นกว่า [12] โดย dextrin มีโครงสร้างดังรูปที่ 9 ในการผลิต dextrin ในทางอุตสาหกรรมที่นิยมใช้กันมากคือ การใช้กระบวนการ acidic hydrolysis ของแป้งชนิดต่าง ๆ dextrin สามารถละลายในน้ำได้และมีสีขาว

หรือสีเหลืองอ่อนมีลักษณะเป็นของแข็ง ในทางการวิเคราะห์ dextrin สามารถตรวจสอบโดยใช้ iodine solution โดยจะเปลี่ยนสี iodine เป็นสีแดง โดย dextrin ที่มีลักษณะเป็นวงแหวนเราจะเรียกว่า cyclodextrin เกิดจากการทำ enzymatic degradation ของแป้งโดยมีแบคทีเรียเป็นตัวช่วย เช่น Bacillus macerans สารพวก cyclodextrin นี้จะประกอบไปด้วยโมเลกุลกลูโคส 6-8 โมเลกุล

Dextrin ถูกนำไปใช้แพร่หลาย ในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นสารที่ไม่มีพิษ และราคาถูก โดย dextrin ถูกนำไปใช้เป็น กาว, thickening agent ในกระบวนการผลิตอาหารและอื่น ๆ อีกมากมาย



รูปที่ 9 โครงสร้างของ dextrin [12]

Dextrose Equivalent (DE)

คำว่า DE ย่อมาจาก Dextrose Equivalent หมายถึง ร้อยละ โดยน้ำหนักของน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง เมื่อใช้วิธีตรวจวัดโดยวิธีรีดักชัน (reduction) [1] ในการบัญญัติศัพท์ภาษาไทย กำหนดให้เรียก DE ว่าสมมูลเดกซ์โทรส (มอก. 268-2521) ในอุตสาหกรรมน้ำเชื่อมกลูโคสนิยมใช้วิธีรีดักชันเป็นตัวตรวจวัดความสามารถในการย่อย เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสมีความสามารถในการทำปฏิกิริยารีดักชันได้ที่คาร์บอนตัวที่ 1 ซึ่งเป็นหมู่แอลดีไฮด์ ในทางเคมีเรียกน้ำตาลพวกนี้ว่า น้ำตาลรีดิวซิง และสารที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่สุดคือ สารละลายเกลือ copper (Cu) โดยเฉพาะเกลือ CuSO_4 ซึ่งจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงิน (Cu^{++}) เป็นสีแดง (Cu^+) เมื่อถูกน้ำตาลกลูโคสรีดิวซ์ (การที่ประจุ Cu^{++} (สองบวก) กลายเป็น Cu^+ (หนึ่งบวก) คือการถูกลดประจุหรือถูกรีดิวซ์ ตามกระบวนการรีดักชันหรือเกิดกิจกรรมรีดักชัน) โดยมีสูตรในการหาค่า DE ดังนี้

จาก $DP = \text{total AGU} / \text{reducing Ends}$

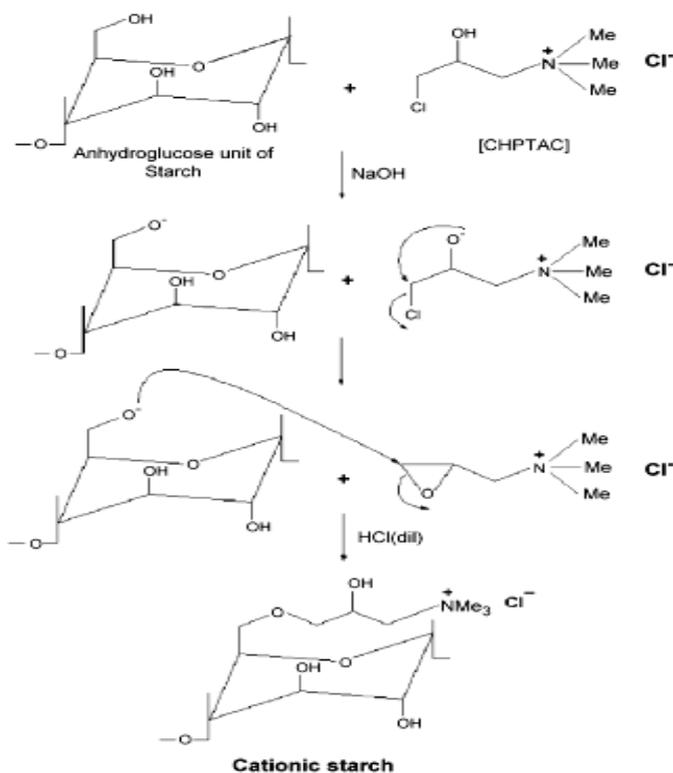
เมื่อ $DP =$ ระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization)
 $AGU =$ หน่วยน้ำตาลกลูโคสทั้งหมด (Anhydrous glucose unit)

จะได้ $DE = 100 / DP$

คุณสมบัติและการสังเคราะห์ cationic starch

Cationic polysaccharide สามารถเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง polysaccharide กับ สาร reagent ที่มีหมู่ที่เป็นประจุบวกชนิดต่าง ๆ เช่น amino, imino, ammonium, sulfonium หรือ phosponium เป็นต้น cationic polysaccharide เป็นสาร flocculant agent ที่มีประสิทธิภาพ ในช่วง pH ที่กว้าง และยังเป็นสารที่ไม่เป็นพิษและย่อยสลายทางธรรมชาติได้ง่าย cationic polysaccharide เริ่มถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการนำมาปรับปรุงสารประเภทอินทรีย์และอนินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำเสีย โดยการนำไปคู่กับสารที่มีประจุลบ และต่อมา cationic polysaccharide ได้ถูกนำไปใช้ อย่างแพร่หลายมากในการนำไปเป็นสารพวก wet-end addition ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ โดยใช้ เพื่อควบคุมกระบวนการ flocculation, retention และความแข็งแรงของกระดาษ

จากงานวิจัยของ S.Pal, D.Mal และ R.P. Singh [13] ได้ทำการสังเคราะห์ cationic starch ขึ้นโดยใช้ cationic monomer คือ N-(3-chloro-2-hydroxypropyl) trimethyl ammonium chloride (CHPTAC) ให้ติดอยู่บนสายโซ่ของ starch ในสถานะที่มี NaOH อยู่ดังรูปที่ 10 สาร cationic starch ที่ได้จะถูกวิเคราะห์โดยใช้ FTIR spectroscopy และการวัด intrinsic viscosity ซึ่งการวิเคราะห์ Flocculation ของ cationic starch ที่ได้จะหาค่าใน 0.25 wt% silica ที่แขวนลอยอยู่ในกระบวนการ Jar test จากการทดลองพบว่าในจำนวน cationic starch 4 ชนิดนั้น ตัวที่มีสายโซ่ CHPTAC ที่ยาวที่สุดจะสามารถนำไปพัฒนาในการใช้เป็นสารบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด



รูปที่ 10 แสดงการสังเคราะห์ cationic starch [13.]

การปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay

จากรูปแบบของ composite ที่ได้จากการผสมระหว่างสาร polymer กับ clay จะมีอยู่ 3 แบบ คือ conventional composite, intercalated nanocomposite และ exfoliated nanocomposite ซึ่งรูปแบบที่จะทำให้ composite มีคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุดคือ exfoliated nanocomposite เพราะ composite รูปแบบนี้ชั้นของ clay จะแตกออกทำให้ชั้นของ clay กระจายตัวอยู่ในสาร polymer ได้ดีที่สุด ส่วน intercalated composite นั้นจะให้สมบัติเชิงกลที่รองลงมาเพราะชั้นของ clay แคบขยายออกกว้างขึ้นทำให้ polymer สามารถเข้ามาแทรกได้บางส่วนแต่ชั้นของ clay ไม่ถึงกับแตกออก สำหรับ conventional composite นั้นจะให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำที่สุดเพราะ clay ยังคงรวมตัวกันเป็น phase ที่แยกกับ phase ของ polymer อยู่จึงทำให้การกระจายตัวของ clay ไม่ดี ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของ clay ขึ้นเพื่อทำให้ composite ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยการนำ clay มาทำการปรับปรุงด้วย modifier หรือ surfactant ชนิดต่าง ๆ

จากงานวิจัยของ S.Limpanart และคณะ [14] ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของ Na-bentonite clay โดยใช้ surfactant ที่เป็นการผสมกันระหว่าง dioctadecyl ammonium chloride

salts กับ tallow alkyl ammonium ซึ่งเรียก surfactant ชนิดนี้ว่า D18 โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณ surfactant คือ D18 ที่มีผลต่อการเตรียม polystyrene-clay nanocomposites โดยใช้วิธี melt intercalation จากการทดลองพบว่า ปริมาณของ surfactant จะมีผลทำให้เกิด รูปแบบของ composite ที่ได้ขึ้น 2 รูปแบบ คือ conventional composite และ intercalated nanocomposite ซึ่งจากการทดลองที่ได้พบว่า polystyrene จะมีความเข้ากันได้กับ clay ที่ดีเมื่อมีปริมาณของ surfactant น้อย โดยจะได้รูปแบบของ intercalated nanocomposite ส่วน clay ที่มีปริมาณ surfactant ที่มากกว่าจะพบว่าเป็น conventional composite เพราะตัว surfactant ที่มากเกินไปจะทำให้ความเข้ากันได้ของ polystyrene กับ clay มีค่าต่ำลง ทำให้เกิดการแยก phase ขึ้น

การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch โดยการเติม clay เป็นสารเสริมแรง

จากงานวิจัยของ A. J. F. de Carvalho , A. A. S. Curvelo และ J. A. M. Agnelli ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch โดยการนำดินขาว (kaolin) ซึ่งเป็นสารเสริมแรงเข้ามาผสมใน thermoplastic starch [15] โดยดินขาวเป็น aluminosilicate ที่มีกรเอาน้ำออกนียมนำมาทำเป็น filler ในยาง พลาสติกและสี ซึ่งมันจะมีความเป็นขั้วและมีพื้นที่ผิวมากจึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับ matrix ที่มีความเป็นขั้วได้

การเตรียม thermoplastic starch จะเตรียมโดยใช้ แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลส 28% โดยใช้ glycerin เป็น plasticizer และใช้ดินขาวเป็นสารเสริมแรง โดยดินขาวที่ใช้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $0.5 \mu\text{m}$ และประกอบไปด้วย Al_2O_3 37%, SiO_2 42%, Fe_2O_3 1%, H_2O 15% และธาตุอื่น ๆ ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้คือ 50 phr ซึ่งจะให้ค่า modulus และ tensile strength ที่ดีที่สุด โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulus, ultimate tensile strength และ elongation สำหรับ thermoplastic starch ที่มีการเติมดินขาวในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยค่า modulus และ tensile strength จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีปริมาณดินขาว 50 phr ซึ่งเมื่อเลยจุดนี้ไปแล้วทั้งค่า modulus และ tensile strength จะลดลง ส่วนค่า elongation จะลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยของ Ming-Fu Huang, Jiu-Gao Yu และ Xiao-Fei Ma ได้ทำการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งเสริมแรงด้วยแรมมอนต์มอริลโลไนต์ [16] โดยเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยการพลาสติกไซส์ด้วยกลีเซอรอลนั้น จะนำมาทำการเสริมแรงโดยการผสมกับแรมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) โดยวิธีการอัดรีด (melt extrusion) ซึ่งผลจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของ MMT

ในเฟสของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสัญญาณของ C-O group ในแป้ง ไปที่ wave number ที่สูงขึ้น ในขณะที่ reactive -OH group ของ MMT มีการเปลี่ยนแปลงไปที่ wave number ที่ต่ำลง ซึ่งให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้งและ MMT ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงในระดับไมครอนช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งให้ดีขึ้น โดยจะมีค่า tensile strength, young's modulus และ breaking energy ของวัสดุเสริมองค์ประกอบนี้เป็น 27.34, 206.74 MPa และ 1.723 Nm เมื่อเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 39% นาน 14 วัน อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลด้วยเช่นกัน ในส่วนการศึกษารศมผลึกของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งเสริมแรงด้วย MMT ในช่วงเวลาต่าง ๆ ด้วย X-ray diffraction พบว่า MMT จะช่วยยับยั้งการตกผลึกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้ว MMT ยังช่วยเพิ่มสมบัติความทนทานต่อความร้อนให้สูงขึ้น และลดการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งให้ลดลงได้

และจากงานวิจัยของ Ming-Fu Huang, Jiu-Gao Yu และ Xiao-Fei Ma and Peng Jin ได้ทำการศึกษาวัสดุนาโนพลาสติกที่เตรียมได้จากแป้งที่ถูกพลาสติกไซส์ด้วย พอร์มาไมด์และเอทานอลามีน (FETPS) เสริมแรงด้วยแรมมอนด์มอร์ไลโลไนต์ที่ถูกกระตุ้นแล้วด้วยเอทานอลามีน (EMMT) [17] ซึ่งผลจากการศึกษาด้วย X-ray diffraction, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) แสดงให้เห็นว่า FETPS สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของ EMMT และเกิดเป็นวัสดุนาโนพลาสติกได้จริง เมื่อปริมาณ EMMT เท่ากับ 5 wt% พบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุนาโนพลาสติกที่ได้มีค่าสูงขึ้นคือ ค่า tensile stress เท่ากับ 7.5 MPa, tensile strain เท่ากับ 85.2%, young's modulus เพิ่มขึ้นจาก 47.2 MPa เมื่ออยู่ในรูป FETPS ไปเป็น 145.1 MPa เมื่ออยู่ในรูปวัสดุนาโนพลาสติก และค่า breaking energy เพิ่มขึ้นจาก 1.34 ไปเป็น 1.81 Nm เมื่อเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 25% นาน 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับ FETPS พบว่าวัสดุนาโนพลาสติกมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการตกผลึกของแป้งมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นทนทานต่อความร้อนสูงขึ้นและลดการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. เครื่องอบสุญญากาศ (vacuum oven) [EYELA, VOS-301SD]
2. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression moulding) [CARVER, 2518]
3. เครื่องผสมภายใน (internal mixer) [BRABENDER, 30/50 EHT]

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึงยึดอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) [LLOYD Instruments UK, LR 50 K]
2. เครื่องทดสอบสมบัติแรงกระแทก (Impact Tester) [Zwick, B5102.202 Charpy Pendulum 4 J]
3. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนของสาร (Thermogravimetric analysis, TGA) [Perkin elmer, TGA7]
4. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X – ray diffractometer, XRD) [Bruker, D8]

สารเคมี

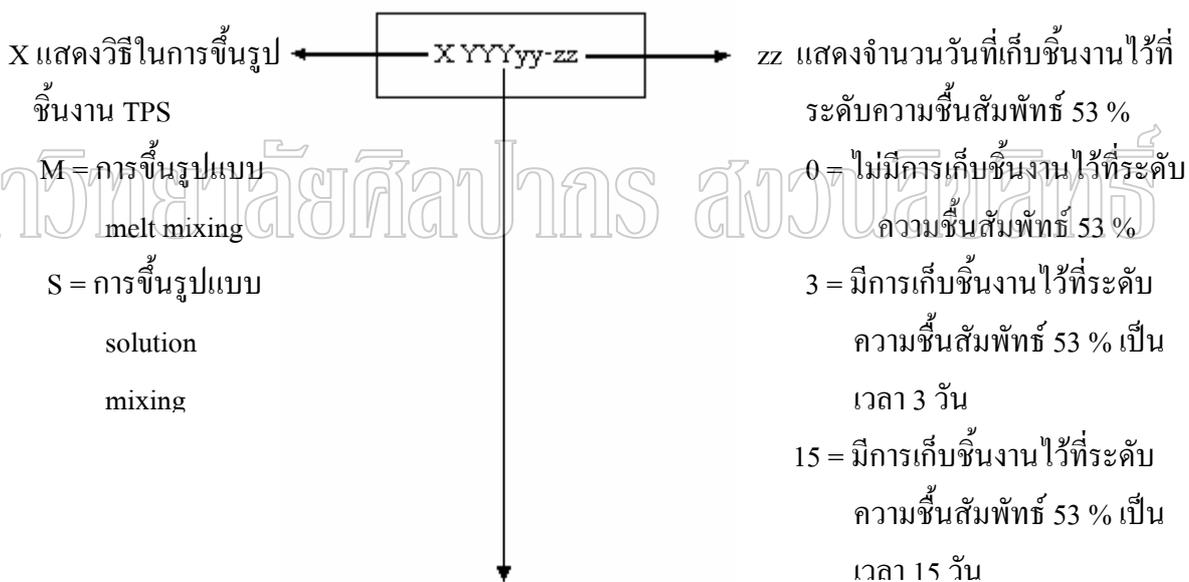
1. Glucose [Univar, reagent grade]
2. Dextrin 20 [Fluka, reagent grade]
3. N-(3-chloro-2-hydroxypropyl)trimethylammonium chloride (CHPTAC) [Fluka, purum grade]
4. Deionized water
5. 1 M NaOH [LAB-SCAN, reagent grade]
6. 1 M HCl [LAB-SCAN, reagent grade]
7. 0.1 M Silver nitrate (AgNO_3) [BDH, reagent grade]
8. 5% Potassium chromate (K_2CrO_4) [Fluka, purum grade]
9. Sodium hydrogen carbonate (NaHCO_3) [Fluka, reagent grade]

10. Glutinous rice flour
11. Glycerol [Scharlau, reagent grade]
12. Na-bentonite (Bentolite H.) [Southern Clay Product, commercial grade]
13. Cloisite30B clay [Southern Clay Product, commercial grade]
14. Magnesium nitrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) [Scharlau, reagent grade]

ดัชนีอักษรย่อ

เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้มีการใช้อักษรย่อเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อให้สามารถเข้าใจเนื้อหาในงานวิจัยได้ง่ายยิ่งขึ้นจึงจำเป็นต้องกล่าวถึงหลักการ โดยทั่วไปในการใช้อักษรย่อไว้ดังนี้

1. ชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงในชิ้นงาน



YYYyy แสดงชนิดและสัดส่วน โดยน้ำหนักของ

พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ในชิ้นงาน

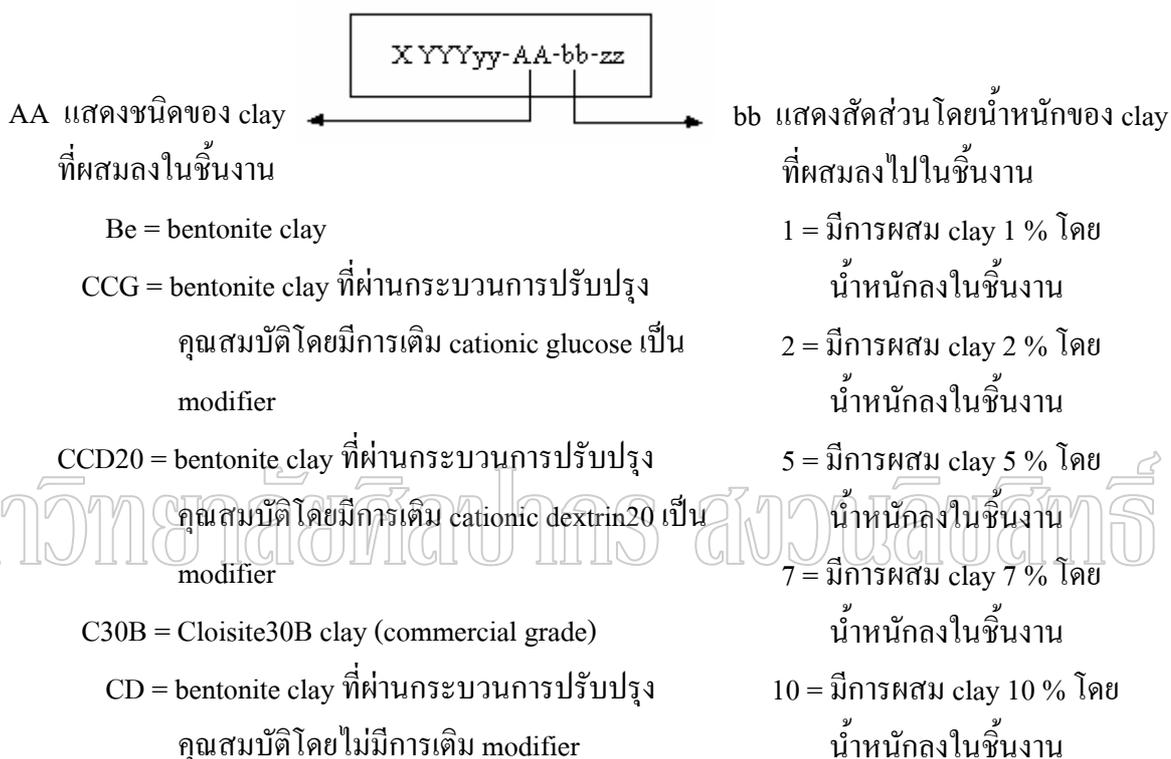
Gly25 = มี glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์
ในสัดส่วน 25 % โดยน้ำหนัก

Gly30 = มี glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์
ในสัดส่วน 30 % โดยน้ำหนัก

Gly35 = มี glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์
ในสัดส่วน 35 % โดยน้ำหนัก

เช่น MGly25-15 หมายถึง TPS ที่เตรียมจากกระบวนการ melt mixing โดยใช้แป้งข้าวเหนียว และมี glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และเก็บในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

2. ชินงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงในชินงาน



หมายเหตุ อักษรย่อตัว X, YYYyy และ zz ใช้แทนความหมายเช่นเดียวกับชินงาน TPS ที่ไม่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงในชินงาน

เช่น MGly25-Be-10-15 หมายถึง TPS ที่เตรียมจากกระบวนการ melt mixing โดยใช้แป้งข้าวเหนียวและมี glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการปรับปรุงคุณสมบัติของ TPS โดยการเติม bentonite clay ลงในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก และเก็บในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

SGly25-C30B-10 หมายถึง TPS ที่เตรียมจากกระบวนการ solution mixing โดยใช้แป้งข้าวเหนียวและมี glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการปรับปรุงคุณสมบัติของ TPS โดยการเติม Cloisite30B clay (commercial grade) ลงในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก

วิธีดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20 และหาปริมาณที่สังเคราะห์ได้

1. วิธีการสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20

1.1 อบ glucose และ dextrin20 ใน vacuum oven ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน

1.2 นำ glucose หรือ dextrin20 ที่ผ่านการอบแล้วปริมาณ 1.5 g ใส่ลงใน deionized water ปริมาตร 15 ml ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส

1.3 นำ CHPTAC ปริมาตร 1.35 ml สำหรับ glucose หรือ 0.30 ml สำหรับ dextrin20 (ดูภาคผนวก ก) ผสมกับ 1M NaOH ปริมาตร 15 ml ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที

1.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 1.3 เติมนลงในสารละลายที่ได้ในข้อ 1.2 แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

1.5 นำสารละลายที่ได้เติม 1M HCl จนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7 จากนั้นลดอุณหภูมิของสารละลายมาที่อุณหภูมิห้องแล้วเก็บสารละลายใส่ในบีกเกอร์ไว้เพื่อนำไปใช้ต่อไป

2. การหาปริมาณของ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้วิธีการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl) ในสารละลายโดยใช้วิธีของ Mohr

2.1 การเตรียมสารละลาย

2.1.1 ชั่ง AgNO_3 จำนวน 1.7000 g ละลายด้วย deionized water แล้วปรับปริมาตรในขวด volumetric flask ขนาด 100 ml ทำให้มีความเข้มข้น 0.1M (น้ำหนักโมเลกุลของ $\text{AgNO}_3 = 169.87 \text{ g/mol}$)

2.1.2 ชั่ง K_2CrO_4 จำนวน 5.000 g ละลายด้วย deionized water และปรับปริมาตรในขวด volumetric flask ขนาด 100 ml ทำให้เป็น 5% K_2CrO_4 (m/v)

2.2 วิธีการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl) ในสารตัวอย่าง

2.2.1 นำสารตัวอย่าง 5 ml เติม deionized water ให้มีปริมาตร 25 ml ในขวด Erlenmeyer flask ขนาด 250 ml

2.2.2 เติม sodium hydrogen carbonate (NaHCO_3) ในสารตัวอย่างจนไม่เกิดฟองเพื่อทำให้สารละลายไม่เป็นกรด (pH 7-10)

2.2.3 เติม 5% K_2CrO_4 ปริมาตร 1 ml ลงในสารตัวอย่าง เขย่าให้เข้ากัน

2.2.4 ไเตรตด้วย 0.1M AgNO_3 จนกระทั่งสีเหลืองของสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีแดงของ AgCrO_4 บันทึกปริมาตรที่ใช้

2.2.5 คำนวณหาปริมาณ cationic glucose และ cationic dextrin20 ในสารละลาย

ตอนที่ 2 การปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้เป็น modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออนในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้

วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay ด้วยสาร modifier

1. นำ 2 % w/w ของ Na-bentonite clay ใน deionized water และ 10.0 mmol ของ cationic glucose หรือ cationic dextrin20 ที่เติม deionized water จนมีปริมาตร 55 ml ทั้ง 2 ส่วนไปให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2. นำสารละลาย cationic glucose หรือ cationic dextrin20 ค่อย ๆ เทลงในสารละลาย 2% w/w ของ Na-bentonite clay ใน deionized water อย่างช้า ๆ และทำการกวนอย่างต่อเนื่องโดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทิ้งสารไว้ 1 คืน

3. นำสารละลายที่ได้ผ่านการเข้าเครื่อง centrifuge เพื่อให้ตะกอนที่แขวนลอยอยู่รวมตัวกัน

4. นำสารละลายที่ได้ผ่านการเข้าเครื่อง centrifuge แล้วนำมากรองเพื่อให้ได้ตะกอนของ clay

5. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

6. นำตะกอนที่อบแล้วมาบดโดยครกบดสาร

ตอนที่ 3 การขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing เพื่อนำไปเปรียบเทียบลักษณะทาง morphology ของ composite ที่เตรียมได้กับการขึ้นรูป TPS แบบ melt mixing

1. การขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing

1.1 อบแป้งข้าวเหนียวใน vacuum oven ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน

1.2 นำ deionized water ปริมาตร 98 ml มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

1.3 เติม clay ชนิดต่าง ๆ ตามตารางที่ 3 ปริมาณ 0.31 g ลงใน deionized water ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำการกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว glycerol และ clay ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing

สูตร	Clay's types	ปริมาณ clay (% w/w)	ปริมาณ glycerol (%w/w)
SGly25-Be-10	Bentonite	10	25
SGly25-CCG-10	CCG	10	25
SGly25- CCD20 -10	CCD20	10	25
SGly25-C30B-10	Cloisite30B	10	25

1.4 เติมแป้งข้าวเหนียวที่อบแล้วลงไป 1 g ในสารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำการกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.5 เติมแป้งข้าวเหนียวที่อบแล้วลงไปอีก 1 g ในสารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำการกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.6 เติม glycerol ปริมาณ 0.77 g ลงในสารละลาย ทำการกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

1.7 นำสารละลายที่ได้เทลงถาดที่เคลือบด้วยเทฟลอนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนได้ชิ้นงานเป็นฟิล์มของ TPS

2. การวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ด้วยเทคนิค X – ray diffraction (XRD)

นำ clay ชนิดต่าง ๆ ชิ้นงาน TPS ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี melt mixing และวิธี solution mixing มาศึกษาวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ด้วยเทคนิค X-ray diffraction ที่มีแหล่งกำเนิดแสง X-ray คือ Cu K α ความยาวคลื่น 1.5406 Å ใช้กำลังไฟฟ้า 40 mV และกระแสไฟฟ้า 40 mA และใช้มุม 2 θ ตั้งแต่ 2° ถึง 12° โดยใช้อัตราเร็ว 0.45° ต่อ นาที

ตอนที่ 4 การหาปริมาณของ glycerol ที่ทำให้ชิ้นงาน TPS ที่ใช้การผสมแบบ melt mixing มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

1. การผสม และการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing

1.1 การผสม compound

1.1.1 อบแห้งใน vacuum oven ทิ้งไว้ 1 คืน ที่อุณหภูมิ 60 °C

1.1.2 ผสม compound ตามสูตรดังตารางที่ 4 โดยนำแป้งที่อบแล้วมาผสมกับ glycerol ในถุง polyethylene ตามรูปที่ 11 เข้าให้ glycerol กระจายตัว ประมาณ 30 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ใน desiccator เป็น เวลา 1 วัน

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวและ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing

สูตร	ชนิดแป้ง	ปริมาณ glycerol (%w/w)	เนื้อสัมผัส
MGly25	Glutinous Rice Flour	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly30	Glutinous Rice Flour	30	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly35	Glutinous Rice Flour	35	ร่วนเนื้อหยาบ



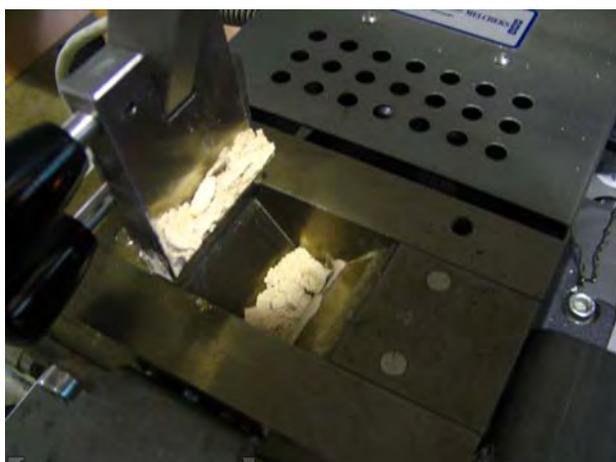
รูปที่ 11 การผสมแป้งกับ glycerol ในถุง polyethylene

1.2 การผสมแป้งที่เตรียมได้ใน internal mixer

1.2.1 ชั่งน้ำหนัก compound ที่เตรียมไว้ 50 กรัม

1.2.2 จากนั้นใส่ compound ลงใน internal mixer ดังรูปที่ 12 โดยใช้อุณหภูมิในการผสมคือ 140°C และใช้แรงบิด (torque) ที่ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

1.2.3 นำ compound ที่ผ่านการผสมใน internal mixer แล้วออกมาเพื่อขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 12 การใส่ compound ลงใน internal mixer

1.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน TPS เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

1.3.1 นำ compound ที่ผ่านการผสมใน internal mixer มาบดด้วยเครื่องบด

1.3.2 นำ TPS ที่ผ่านการบดแล้วมาใส่ในแม่พิมพ์จนเต็มและปิดประกบแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 13 และ 14 โดยก่อนการเติม TPS ที่ผ่านการบดแล้ว ให้นำแผ่นไสชนิดทนความร้อนมาวางระหว่างแม่พิมพ์แผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 เพื่อให้แก๊สขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นทำการเติม TPS ที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์จนเต็ม และใช้แผ่นไสชนิดทนความร้อนวางระหว่างแม่พิมพ์แผ่นที่ 2 และแผ่นที่ 3 เช่นกัน แล้วทำการปิดประกบแม่พิมพ์



รูปที่ 13 การนำ TPS ที่ผ่านการบดแล้วมาใส่ในแม่พิมพ์



รูปที่ 14 การปิดประกบแม่พิมพ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

1.3.3 ใช้เครื่อง compression moulding ในการอัดเข้าแม่พิมพ์ดังรูปที่ 15 โดยในการอัดเข้าแม่พิมพ์มี 3 stage คือ

Stage 1 : อุณหภูมิ 160°C แรงอัด 0 pounds เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อทำให้ TPS ในแม่พิมพ์เกิดการหลอมอย่างทั่วถึง

Stage 2 : อุณหภูมิ 160°C แรงอัด 25,000 pounds เป็นเวลา 3 นาทีเพื่อให้ TPS ที่หลอมเหลวแล้วเกิดการไหลทั่วแม่พิมพ์และไล่ความชื้นและอากาศออกจากแม่พิมพ์

Stage 3 : อุณหภูมิ 160°C แรงอัด 35,000 pounds เป็นเวลา 2 นาทีเพื่อให้ TPS ที่หลอมเหลวและเกิดการไหลทั่วแม่พิมพ์แล้วคงรูปร่างมากขึ้น

1.3.4 นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่อง compression moulding และแกะแม่พิมพ์แผ่นที่ 2 ออกจากแม่พิมพ์แผ่นที่ 1 และแม่พิมพ์แผ่นที่ 3 ดังรูปที่ 16 จากนั้นแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 15 การอัดเข้าแม่พิมพ์โดยใช้เครื่อง compression moulding



รูปที่ 16 แม่พิมพ์แผ่นที่ 2 หลังจากแกะออกจากแม่พิมพ์แผ่นที่ 1 และแม่พิมพ์แผ่นที่ 3

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตอนที่ 5 การหาคัดส่วนและชนิดของ clay ที่เติมลงในชิ้นงาน TPS แล้วทำให้ชิ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

1. การหาคัดส่วนของ bentonite clay ที่เติมลงใน TPS แล้วทำให้ชิ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

1.1 การเติม bentonite clay ลงไปใน TPS

1.1.1 อบแป้งข้าวเหนียวใน vacuum oven ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน

1.1.2 ผสม compound ตามสูตรดังตารางที่ 5 โดยนำแป้งที่อบแล้วมาผสมกับ bentonite clay ให้เข้ากันในถุง polyethylene จากนั้นเติม glycerol ลงไป เขย่าให้ glycerol กระจายตัว 30 นาทีแล้วนำไปเก็บไว้ใน desiccator เป็นเวลา 1 วัน

ตารางที่ 5 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว bentonite clay และ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing

สูตร	ปริมาณ bentonite clay (%w/w)	ปริมาณ glycerol (%w/w)	เนื้อสัมผัส
MGly25-Be-1	1	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-Be-2	2	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-Be-5	5	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-Be-7	7	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-Be-10	10	25	ร่วนเนื้อหยาบ

2. การหาชนิดของ clay ที่เติมลงไปใน TPS แล้วทำให้ชิ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

2.1 การเติม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปใน TPS

2.1.1 ออบแป้งข้าวเหนียวใน vacuum oven ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน

2.1.2 ผสม compound ตามสูตรดังตารางที่ 6 โดยนำแป้งที่อบแล้วมาผสมกับ clay

ชนิดต่าง ๆ ให้เข้ากันในถุง polyethylene จากนั้นเติม glycerol ลงไป เขย่าให้ glycerol กระจายตัว 30 นาทีแล้วนำไปเก็บไว้ใน desiccator เป็นเวลา 1 วัน

3. การผสมและขึ้นรูป compound ที่เตรียมได้ในข้อ 1 และ 2

โดยการใช้ internal mixer ในการผสมและจากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน TPS โดยการใช้เครื่อง compression molding เช่นเดียวกับตอนที่ 4

ตารางที่ 6 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว clay ชนิดต่าง ๆ และ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS แบบ melt mixing

สูตร	ปริมาณ clay (% w/w)	Clay's types	ปริมาณ glycerol (%w/w)	เนื้อสัมผัส
MGly25	0	-	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-Be-2	2	Bentonite	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-CCG-2	2	CCG	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-CCD20-2	2	CCD20	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-C30B-2	2	Cloisite30B	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-Be-10	10	Bentonite	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-CCG-10	10	CCG	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-CCD20-10	10	CCD20	25	ร่วนเนื้อหยาบ
MGly25-C30B-10	10	Cloisite30B	25	ร่วนเนื้อหยาบ

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS

1. Impact testing (charpy impact) ทำตาม ASTM D 256

- 1.1 ทำการบากชิ้นงาน impact specimens ที่นำมาทดสอบด้วยเครื่องทำรอยบาก
- 1.2 ทำการวัดความกว้างและความหนาบริเวณพื้นที่ด้านหลังรอยบากของชิ้นงาน
- 1.3 นำชิ้นงานไปทดสอบโดยทำการยึดชิ้นงานกับฐานของเครื่องทดสอบให้แน่น โดยหันด้านที่มีรอยบากเข้าหา pendulum (ขนาด 4 จูล) แล้วทำการปล่อย pendulum ให้ตกลงมากระทบชิ้นงาน
- 1.4 บันทึกค่าพลังงานที่ได้ (มิลลิจูล) และทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ทุกชิ้นงาน
- 1.5 คำนวณค่าพลังงานเฉลี่ยต่อพื้นที่ของรอยแตก (มิลลิจูลต่อตารางมิลลิเมตร)
- 1.6 หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลดังกล่าว
- 1.7 ทำแผนภูมิควบคุม (control chart) เพื่อเลือกข้อมูลที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้
- 1.8 เลือกอัตราส่วนผสมที่ให้ค่า impact strength ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

2. Tensile strength testing ทำตาม ASTM D 638

2.1 วัดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน tensile specimens ที่นำมาทดสอบ โดยทำการวัดค่า 3 ช่วง คือ ช่วงต้น ช่วงกลางและช่วงปลาย แล้วนำค่ากลางที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณ

2.2 ทำการวัด gauge length ของชิ้นงานแล้วทำเครื่องหมายแสดงช่วงของ gauge length ไว้

2.3 นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงยึด 50.0 มิลลิเมตร ต่อนาที และใช้ load cell ขนาด 5 kN

2.4 บันทึกผลข้อมูลของค่า tensile strength และ percentage strain at break และทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ทุกชิ้นงาน

2.5 นำข้อมูลมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตร

2.6 หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้

2.7 ทำแผนภูมิควบคุม (control chart) เพื่อเลือกข้อมูลที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

2.8 ทำการเลือกสูตรผสมของแป้งที่ให้ค่า tensile strength สูงที่สุดเพื่อนำไปใช้ใน

ขั้นตอนต่อไป

ตอนที่ 6 การศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่ใช้การขึ้นรูปแบบ melt mixing

การเก็บชิ้นงานไว้ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% (ทำตาม ASTM E 104)

1.เตรียมสารละลายของ magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) โดยนำ magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) ผสมกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์จันอิมตัวยิ่งยวดโดยมีการให้ความร้อนร่วมด้วย หลังจากนั้นเทสารละลายอิมตัวยิ่งยวดดังกล่าวลงใน chamber ที่มีฝาปิด จะได้ chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53%

2.นำชิ้นงานที่เตรียมได้ข้างต้นวางบนตะแกรงลวดแล้วนำไปใส่ไว้ใน chamber ที่มีสารละลายอิมตัวยิ่งยวดของ magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) ดังรูปที่ 17 จากนั้นเก็บชิ้นงานไว้ 15 วัน

3. นำชิ้นงานที่อยู่ใน chamber ออกมาชั่งน้ำหนักทุกวันตลอด 15 วัน เพื่อศึกษาน้ำหนักของชิ้นงาน TPS ที่เปลี่ยนแปลงไป

4. นำค่าน้ำหนักของชิ้นงาน TPS ที่เปลี่ยนแปลงไป มาคำนวณหา %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS แต่ละชิ้น



รูปที่ 17 การเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53%

ตอนที่ 7 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

นำวัสดุที่ใช้เตรียม TPS ชิ้นงาน TPS ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี melt mixing และ clay ชนิดต่าง ๆ มาศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 °C และเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1100 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C ต่อนาที

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

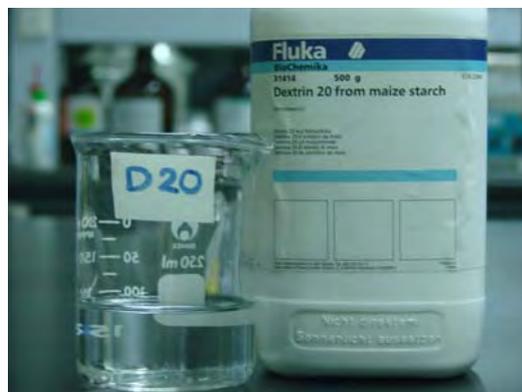
ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20 และหาปริมาณที่สังเคราะห์ได้

1. ผลการสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20

จากขั้นตอนในการสังเคราะห์สารละลาย cationic glucose และ cationic dextrin20 จะพบว่า สารละลายตั้งต้นที่ใช้ทั้งสองส่วนคือส่วนที่เป็น glucose หรือ dextrin20 ผสมกับ deionized water กับอีกส่วนหนึ่งคือ ส่วนที่เป็น CHPTAC ผสมกับ 1M NaOH จะเป็นสารละลายใสไม่มีสี ดังรูปที่ 18 และรูปที่ 19 แต่เมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จสิ้นสารละลาย cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่ได้จะมีสีน้ำตาลแดง ดังรูปที่ 20 และรูปที่ 21 และจากการพิจารณาสารละลายที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองชนิด ดังรูปที่ 20 และรูปที่ 21 จะพบว่าสารละลาย cationic glucose จะมีสีที่เข้มกว่าสีของสารละลาย cationic dextrin20 เล็กน้อย

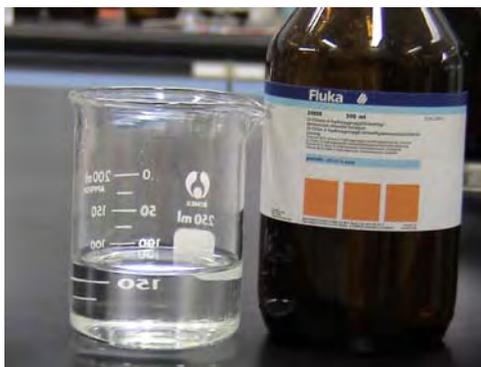


(a)



(b)

รูปที่ 18 (a) สารละลายของ glucose ที่ผสมกับ deionized water (b) สารละลายของ dextrin20 ที่ผสมกับ deionized water



รูปที่ 19 สารละลายของ CHPTAC ที่ผสมกับ 1M NaOH



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ 20 สารละลาย cationic glucose



รูปที่ 21 สารละลาย cationic dextrin20

2. การหาปริมาณของ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลาย

การหาปริมาณของ cationic glucose และ cationic dextrin20 ในสารละลายที่สังเคราะห์ได้นั้น จะใช้วิธีการคำนวณหาจากการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) โดยวิธีของ Mohr ซึ่งปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่หาได้ทั้งหมดในสารละลายนั้นเมื่อนำมาหักออกด้วยปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่เกิดจากการเติม 1M HCl ลงไปเพื่อหยุดปฏิกิริยาและปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่เป็น counter ion ในโมเลกุลของ CHPTAC จะได้ปริมาณของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง CHPTAC กับ glucose หรือ dextrin20 เกิดเป็น cationic glucose หรือ cationic dextrin20 ขึ้นดังรูปที่ 10 โดยคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยานั้นจะเป็นคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่หลุดออกจากโมเลกุลของ CHPTAC ซึ่งคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) 1 ตัวที่หลุดออก จะทำให้ CHPTAC สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของ glucose หรือ dextrin20 เกิดเป็น cationic glucose หรือ cationic dextrin20 ได้ 1 โมเลกุล เพราะฉะนั้นจึงสามารถที่จะนำค่าคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่คำนวณได้มาเป็นตัวแทนของปริมาณ cationic glucose และ cationic dextrin20 ในสารละลายได้ จากการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ในสารละลายที่สังเคราะห์ได้ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาตรของ 0.1M AgNO₃ ที่ใช้ในการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ในสารละลายตัวอย่าง

สารละลาย	ปริมาณ 0.1M AgNO ₃ (ml)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
CHPTAC (Pure)	41.2	41.3	41.1	41.3	41.1	41.2
Cationic glucose	17.9	17.9	18.0	17.7	17.7	17.8
Cationic dextrin20	9.8	9.7	9.7	10.0	9.9	9.8

เมื่อนำผลการไตเตรตที่ได้ดังตารางที่ 7 ไปทำการคำนวณตามวิธีดังกล่าว ก จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปริมาณ cationic glucose และ cationic dextrin20 ในสารละลายที่สังเคราะห์ได้

สารละลาย	ปริมาณ CI ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา (mmol)	% ของ CHPTAC ที่เข้าทำปฏิกิริยา
Cationic glucose	5.10	91.7
Cationic dextrin20	1.16	93.7

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณของ cationic glucose ในสารละลายที่สังเคราะห์ได้ มีค่าเท่ากับ 5.10 mmol และปริมาณของ cationic dextrin20 ในสารละลายที่สังเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 1.16 mmol และเมื่อพิจารณาถึง % ของ CHPTAC ที่เข้าทำปฏิกิริยากับ glucose และ dextrin20 มีค่า 91.7 และ 93.7 ตามลำดับ ค่าที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาระหว่าง CHPTAC กับ glucose หรือ dextrin20 นั้นเกิดได้ดี อาจเนื่องมาจากว่า glucose และ dextrin20 นั้นมีขนาดโมเลกุลที่เล็ก ถึงแม้ว่าสายโซ่โมเลกุลของ dextrin20 จะยาวกว่า glucose ถึง 5 เท่าก็ตาม แต่เมื่อนำสารทั้งสองไปละลายใน deionized water แล้วสารทั้งสองก็สามารถกระจายตัวได้เป็นอย่างดี ไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เมื่อเติม CHPTAC เข้าไปเพื่อไปทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของ CHPTAC จึงสามารถกระจายตัวแทรกเข้าไปทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของ glucose และ dextrin20 ได้ง่ายและทั่วถึงจึงทำให้มี % ของ CHPTAC ที่เข้าทำปฏิกิริยาที่สูงใกล้เคียงกัน ทั้งในการสังเคราะห์ cationic glucose และการสังเคราะห์ cationic dextrin20

ตอนที่ 2 การปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 เป็นสาร modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออนในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้

การวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ bentonite clay, CD, CCG และ CCD20 ด้วยเทคนิค XRD

เมื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 เป็นสาร modifier แล้ว clay ที่ได้คือ CCG และ CCD20 ตามลำดับ ซึ่ง CCG และ CCD20 ที่สังเคราะห์ได้และทำการบดแล้ว จะมีลักษณะดังรูปที่ 22 และ รูปที่ 23



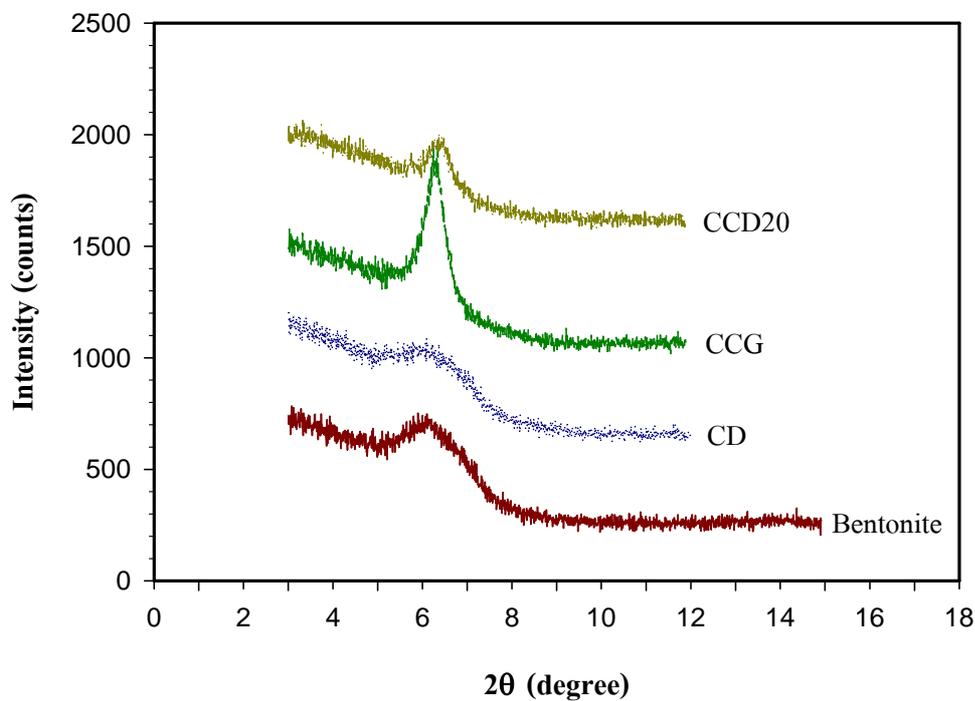
รูปที่ 22 CCG ที่ทำการบดแล้ว



รูปที่ 23 CCD20 ที่ทำการบดแล้ว

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

จากนั้นเมื่อทำการบด CCG และ CCD20 เรียบร้อยแล้วจะนำ clay ทั้งสองชนิดนี้ไปทำการทดสอบดูระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ด้วยเทคนิค XRD พร้อมกับ bentonite clay บริสุทธิ์ และ bentonite clay ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเช่นเดียวกับ CCG และ CCD20 แต่จะใช้ deionized water แทนสาร modifier (cationic glucose และ cationic dextrin20) เรียก clay ชนิดนี้ว่า CD เพื่อนำผลของเทคนิค XRD ที่ได้ของ clay ทั้ง 4 ชนิดนี้มาเปรียบเทียบกัน โดยผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ที่ได้มีดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ bentonite clay, CD, CCG และ CCD20

จากรูปที่ 24 แสดงผลของการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ bentonite clay, CD, CCG และ CCD20 จะพบว่ากราฟของชั้น silicate ของ clay ทั้ง 4 ชนิดจะมี peak เกิดขึ้นเด่นชัดเพียง 1 peak ในแต่ละกราฟ ที่มุม 2θ ประมาณ 6 องศา เมื่อนำมุม 2θ ที่ได้มาผ่านการคำนวณด้วยสมการ Bragg's equation จะได้เป็นค่า d-spacing ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay, CD, CCG และ CCD20

Clay's types	Angle ($2\theta^{\circ}$)	d-spacing (\AA)
Benonite	6.15	14.4
CD	6.06	14.6
CCG	6.29	14.0
CCD20	6.40	13.8

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าระยะ d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay เมื่อเปรียบเทียบกับค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CD จะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยคือ 14.4 Å กับ 14.6 Å ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะ clay ทั้งสองชนิดนี้เป็น bentonite clay ที่ยังไม่ได้ถูกทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสาร modifier เหมือนกัน แต่ CD จะผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ deionized water แทนสาร modifier (cationic glucose และ cationic dextrin20) จึงทำให้ CD มีชั้นของ silicate ที่กว้างกว่าชั้น silicate ของ bentonite clay เล็กน้อยและเมื่อเราพิจารณาถึงชนิดของ bentonite clay ที่ใช้คือ bentonite H. ซึ่ง clay ชนิดนี้เกิดการ swell ได้ดีในน้ำ ก็ช่วยสนับสนุนผลการทดลองที่เราได้เป็นอย่างดี

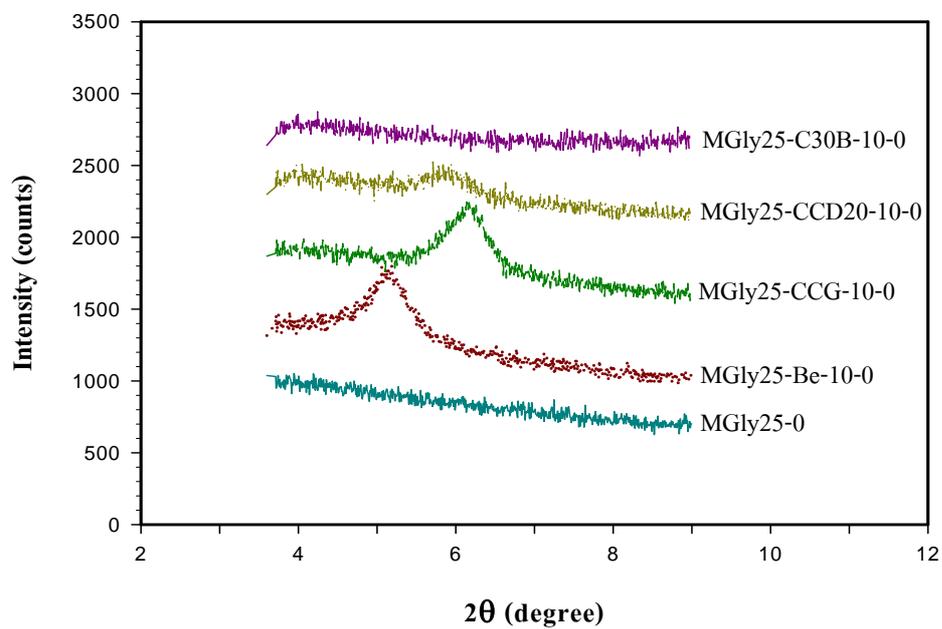
เมื่อพิจารณาค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCG และ CCD20 คือ 14.0 Å และ 13.8 Å ตามลำดับ พบว่ามีค่าใกล้เคียงค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay มาก และเมื่อพิจารณาให้ละเอียดยิ่งขึ้น จะพบว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCG และ CCD20 จะมีค่าน้อยกว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay เล็กน้อยแสดงว่าชั้น silicate ของ CCG และ CCD20 มีความแคบลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชั้น silicate ของ bentonite clay ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าโมเลกุลของ สาร modifier คือ cationic glucose และ cationic dextrin20 สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออน (Na⁺) ในชั้น silicate ของ bentonite clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ bentonite clay ได้ แต่เนื่องจากโมเลกุลของ cationic glucose และ cationic dextrin20 มีขนาดเล็กและมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นเกินไป จึงไม่สามารถผลักชั้น silicate ของ clay ให้ขยายหรือแตกออกได้ อีกทั้งการที่สายโซ่โมเลกุลของ cationic glucose และ cationic dextrin20 นั้นมีส่วนหนึ่งของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นส่วนของ glucose หรือ dextrin20 อยู่ ทำให้สายโซ่โมเลกุลส่วนนี้ไปบดบังผลของประจุลบที่อยู่บนชั้น silicate ของ clay ส่งผลให้แรงผลักระหว่างประจุลบที่อยู่บนชั้น silicate ของ clay ลดน้อยลง จึงทำให้เกิดการยุบตัวเข้าหากันของชั้น silicate ของ clay เล็กน้อย ความกว้างของชั้น silicate ของ clay ใน CCG และ CCD20 จึงมีค่าแคบลงเล็กน้อย ต่อมาเมื่อพิจารณาค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCG พบว่า มีค่ามากกว่าค่า d-spacing ของ CCD20 เล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าการที่สายโซ่โมเลกุลส่วนที่เป็น dextrin20 ของ cationic dextrin20 นั้นมีขนาดใหญ่และยาวกว่าสายโซ่โมเลกุลส่วนที่เป็น glucose ของ cationic glucose ทำให้โมเลกุลของ cationic dextrin20 ไปบดบังผลของประจุลบที่อยู่บนชั้น silicate ของ clay ได้มากกว่าโมเลกุลของ cationic glucose เมื่อสายโซ่โมเลกุลของ cationic dextrin 20 เข้าไปแทรกอยู่ในชั้น silicate ของ clay แล้ว ชั้น silicate ของ clay จึงยุบลงมาได้มากกว่าเล็กน้อย ทำให้ค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCD20 จึงน้อยกว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCG เล็กน้อย

ตอนที่ 3 การขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing เพื่อนำไปเปรียบเทียบลักษณะทาง morphology ของ composite ที่เตรียมได้กับการขึ้นรูป TPS แบบ melt mixing

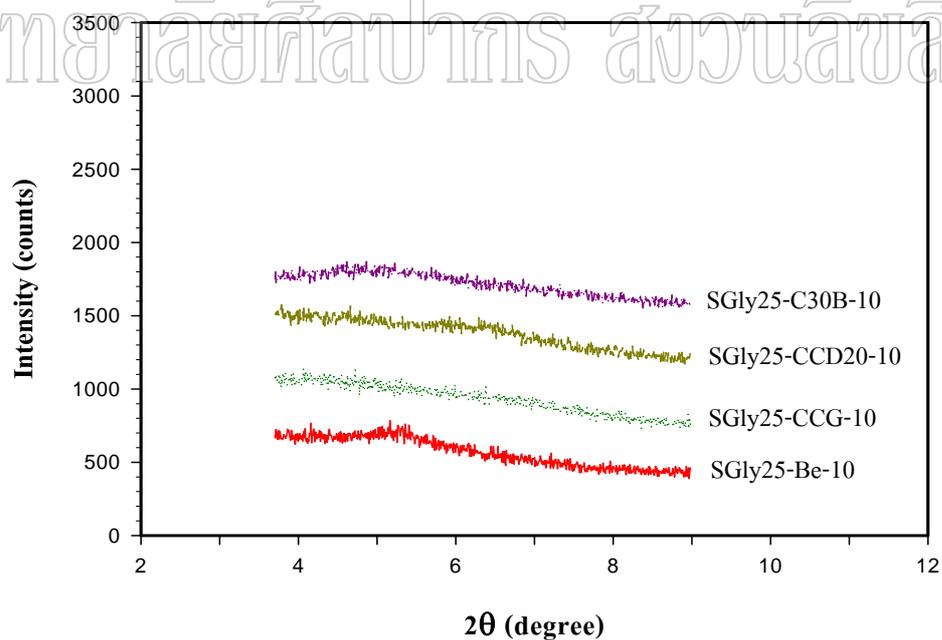
การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ และลักษณะทาง morphology ในชิ้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ solution mixing และ melt mixing ด้วยเทคนิค XRD

เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ คือ bentonite, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก และใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก โดยใช้วิธีการผสมแบบ solution mixing และ melt mixing แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษา ระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ในชิ้นงาน TPS ด้วยเทคนิค XRD ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 25

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



(a)



(b)

รูปที่ 25 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ (a) ชิ้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ melt mixing
(b) ชิ้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ solution mixing

จากรูปที่ 25 พบว่ากราฟของชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ในชั้นงาน TPS ทั้งที่ขึ้นรูปแบบ melt mixing และ solution mixing บางกราฟจะไม่พบ peak เกิดขึ้น ส่วนกราฟที่มี peak จะพบ peak ที่เด่นชัดเพียง 1 peak เมื่อนำมุม 2θ ที่ได้มาผ่านการคำนวณด้วยสมการ Bragg's equation จะได้เป็นค่า d-spacing ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ในชั้นงาน TPS ที่มีการขึ้นรูปแบบ melt mixing และ solution mixing

ชั้นงาน	Angle ($2\theta^\circ$)	d-spacing (Å)
MGly25-0	-	-
MGly25-Be-10-0	5.16	17.1
MGly25-CCG-10-0	6.16	14.3
MGly25-CCD20-10-0	5.90	15.0
MGly25-C30B-10-0	-	-
SGly25-Be-10	5.22	16.9
SGly25-CCG-10	-	-
SGly25-CCD20-10	-	-
SGly25-C30B-10	-	-

หมายเหตุ ช่องที่มีเครื่องหมาย - แสดงถึงการไม่พบค่านั้นในกราฟ

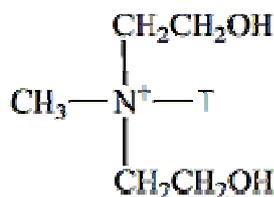
จากรูปที่ 25(a) และตารางที่ 10 พบว่าชั้นงาน TPS สูตร MGly25-0 และ MGly25-C30B-0 จะไม่พบ peak ในกราฟ XRD ส่วนชั้นงาน TPS สูตร MGly25-Be-10-0, MGly25-CCG-10-0 และ MGly25-CCD20-10-0 จะพบ peak ที่เด่นชัดเพียง 1 peak ในกราฟ XRD เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ในชั้นงาน TPS จะได้ 17.1, 14.3 และ 15.0 Å ตามลำดับที่ผลเป็นเช่นนี้เพราะชั้นงาน TPS สูตร MGly25-0 นั้นไม่มีการเติม clay ลงไปในชั้นงานจึงทำให้ไม่พบ peak ในกราฟ XRD ส่วนชั้นงาน TPS สูตร MGly25-C30B-10-0 จะไม่พบ peak ในกราฟเช่นกันทั้งที่มีการเติม C30B ลงไปในชั้นงาน TPS ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าในชั้นงาน TPS สูตรนี้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวสามารถแทรกเข้าไปในชั้น silicate ของ C30B ในชั้นงานได้ดีมากจนทำให้ชั้น silicate ของ C30B ในชั้นงาน TPS สูตรนี้สามารถแตกออกเกิดเป็น composite แบบ exfoliated nanocomposite แบบสมบูรณ์ได้

เมื่อพิจารณาที่กราฟ XRD ของชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-CCD20-10-0 จะพบว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCD20 ในชิ้นงานสูตรนี้จะมีค่ามากกว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ CCD20 ที่ยังไม่ได้นำมาผสมกับ TPS (ดูค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ที่ยังไม่ได้นำมาผสมกับ TPS ได้ ดังตารางที่ 9) ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อนำ CCD20 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน TPS ด้วยวิธีแบบ melt mixing แล้ว จะทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้น silicate ของ CCD20 ได้ ทำให้เกิดเป็น composite แบบ intercalated nanocomposite นอกจากนี้แล้วค่า intensity ของกราฟ XRD นั้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกราฟ XRD ของชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-Be-10-0 และ MGly25-CCG-10-0 มาก ทั้งที่มีการใส่ปริมาณของ clay ลงในชิ้นงาน TPS ที่เท่ากันคือ 10% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่านอกจากโมเลกุลของแป้งจะแทรกเข้าไปขยายชั้น silicate ของ CCD20 ในชิ้นงาน TPS เกิดเป็น intercalated nanocomposite แล้ว โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวที่แทรกเข้าไปในชั้น silicate ของ CCD20 ส่วนหนึ่งสามารถทำให้ชั้น silicate ของ CCD20 แยกออกจากกันเกิดเป็น composite แบบ exfoliated nanocomposite ได้อีกด้วย

และเมื่อพิจารณาส่วนชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-Be-10-0 และ MGly25-CCG-10-0 จะพบว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ในชิ้นงาน จะมีค่ามากกว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ที่ยังไม่ได้นำมาผสมกับ TPS (ดูค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ที่ยังไม่ได้นำมาผสมกับ TPS ได้ ดังตารางที่ 9) เล็กน้อยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าในชิ้นงาน TPS สองสูตรนี้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวสามารถแทรกเข้าไปในชั้น silicate ของ clay ในชิ้นงาน ได้ เกิดเป็น intercalated nanocomposite ขึ้นและพบว่าชิ้นงานสูตร MGly25-Be-10-0 จะมีค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ในชิ้นงานที่มีการขยายมากที่สุดคือจาก 14.4 Å เป็น 17.1 Å

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่าสาร modifier ที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของ clay มีผลต่อลักษณะของ composite ที่จะเกิดขึ้นและความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ clay ชนิดต่าง ๆ กับ เฟสของ TPS โดยพบว่าเมื่อโมเลกุลของ modifier ยังมีขนาดสายโซ่ที่ยาวและมีหมู่ฟังก์ชันที่มีค่าความเป็นขั้วใกล้เคียงกับ TPS มากจะทำให้ composite ที่ได้มีโอกาสเกิดเป็น exfoliated nanocomposite ซึ่งเป็น composite ชนิดที่มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ clay กับเฟสของ TPS ได้ดีที่สุด ดังจะเห็นได้จากการที่ชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-C30B-10-0 เกิดเป็น exfoliated nanocomposite อย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-CCG-10-0 และ MGly25-CCD20-10-0 เนื่องจากโมเลกุลของสาร modifier ที่ใช้ปรับปรุง clay ใน C30B คือสาร methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium (MT2EtOH) มีโครงสร้างดังรูปที่ 26 เป็นสารที่มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาว เมื่อนำไปปรับปรุงคุณสมบัติ

ของ clay ทำให้ชั้น silicate ของ clay เพิ่มขึ้นจาก 11.7 Å เป็น 18.5 Å อีกทั้งในสายโซ่โมเลกุลของ MT2EtOH จะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อนำ C30B ไปผสมกับ TPS และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีแบบ melt mixing จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวใน TPS สามารถแทรกเข้าไปในชั้น silicate ของ C30B ในชิ้นงานได้ง่ายและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ MT2EtOH กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้จึงทำให้ชั้น silicate ของ C30B ในชิ้นงาน TPS เกิดการแตกออกกลายเป็น exfoliated nanocomposite ขึ้นแบบสมบูรณ์



โดย T คือ Tallow (~65% C18; ~30% C16; ~5% C14)

รูปที่ 26 โครงสร้างของ MT2EtOH

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ในส่วนของชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-CCG-10-0 และ MGly25-CCD20-10-0 นั้นโมเลกุลของสาร modifier ที่ใช้คือ cationic glucose และ cationic dextrin20 ตามลำดับซึ่งมีขนาดความยาวของสายโซ่ที่สั้นกว่าสาร MT2EtOH ที่เป็นสาร modifier ใน C30B มาก แต่สาร cationic dextrin20 จะมีความยาวของสายโซ่โมเลกุลมากกว่าสาร cationic glucose ถึง 5 เท่า ทำให้เมื่อนำ CCD20 ที่ใช้สาร cationic dextrin20 เป็นสาร modifier ไปผสมลงใน TPS และขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ melt mixing แล้วลักษณะของ composite บางส่วนจึงสามารถเกิดเป็น exfoliated nanocomposite ได้ และอีกส่วนหนึ่งเกิดเป็น intercalated nanocomposite ส่วนโมเลกุลของ cationic glucose นั้นมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นมากทำให้เมื่อนำ CCG ที่มีสาร cationic glucose เป็นสาร modifier ไปผสมลงใน TPS และขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ melt mixing แล้วทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวแทรกเข้าไปในชั้น silicate ของ CCG ได้ไม่มากนักและพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างโมเลกุลของ cationic glucose กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวเกิดได้จำนวนน้อยจึงทำให้ composite ที่ได้ในชิ้นงาน TPS สูตรนี้เป็น intercalated nanocomposite ทั้งหมด ไม่สามารถเกิดเป็น exfoliated nanocomposite ได้

และเมื่อพิจารณารูปที่ 25(b) และตารางที่ 10 จะเป็นกราฟ XRD และตารางค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ในชิ้นงาน TPS ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี solution mixing ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม จะพบว่าฟิล์ม TPS สูตร SGly25-CCG-10, SGly25-CCD20-10 และ

SGly25-C30B-10 จะไม่พบ peak ในกราฟ XRD ส่วนฟิล์ม TPS สูตร SGly25-Be-10 จะพบ peak ในกราฟ XRD 1 peak ซึ่งเมื่อนำมุม 2θ ของ peak นี้ไปคำนวณตาม Bragg's equation จะได้ค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay ในฟิล์ม TPS เท่ากับ 16.9 \AA ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้นี้แสดงว่าฟิล์ม TPS สูตร SGly25-CCG-10, SGly25-CCD20-10 และ SGly25-C30B-10 เป็น composite แบบ exfoliated nanocomposite ได้สมบูรณ์ ส่วนฟิล์ม TPS สูตร SGly25-Be-10 นั้นจะเกิดเป็น composite แบบ intercalated nanocomposite เนื่องจากค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay ในฟิล์ม TPS นั้นมีค่ามากกว่าค่า d-spacing ของชั้น silicate ของ bentonite clay ที่ยังไม่ได้ผสมลงใน TPS และบางส่วนอาจเกิดเป็น exfoliated nanocomposite ได้ เนื่องจากค่า intensity ของ peak ที่ได้นั้นมีค่าลดลง

จากนั้นเมื่อนำผลการทดลอง XRD ของฟิล์ม TPS ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี solution mixing มาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี melt mixing จะได้ผลดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบลักษณะ composite ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธี melt mixing และ solution mixing

สูตร	Clay's types	วิธีผสม	ลักษณะ composite ที่ได้
MGly25-Be-10-0	Be	Melt	Intercalated
SGly25-Be-10	Be	Solution	Intercalated, Exfoliated
MGly25-CCG-10-0	CCG	Melt	Intercalated
SGly25-CCG-10	CCG	Solution	Exfoliated
MGly25-CCD20-10-0	CCD20	Melt	Intercalated, Exfoliated
SGly25-CCD20-10	CCD20	Solution	Exfoliated
MGly25-C30B-10-0	C30B	Melt	Exfoliated
SGly25-C30B-10	C30B	Solution	Exfoliated

จากตารางที่ 11 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ชนิดของ clay เดียวกัน เมื่อนำไปผสมกับ TPS แล้วขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ solution mixing แล้ว จะทำให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ clay ชนิดต่าง ๆ กับเฟสของ TPS ดีขึ้นมากกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ melt mixing คือ bentonite clay เมื่อนำไปผสมกับ TPS แล้วขึ้นรูปด้วยวิธี melt mixing จะได้ intercalated nanocomposite แต่เมื่อขึ้นรูปด้วยวิธี solution mixing นอกจากจะเกิด intercalated nanocomposite แล้ว บางส่วนสามารถเกิดเป็น

exfoliated nanocomposite ได้ CCG เมื่อนำไปผสมกับ TPS แล้วขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ melt mixing จะได้ intercalated nanocomposite แต่เมื่อขึ้นรูปด้วยวิธี solution mixing จะเกิดเป็น exfoliated nanocomposite CCD20 เมื่อนำไปผสมกับ TPS แล้วขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ melt mixing จะได้ intercalated nanocomposite และ exfoliated nanocomposite บางส่วนแต่เมื่อขึ้นรูปด้วยวิธี solution mixing จะเกิดเป็น exfoliated nanocomposite ทั้งหมด ส่วน C30B นั้นเมื่อนำไปผสมกับ TPS แล้ว จะเกิดเป็น exfoliated nanocomposite ทั้งการผสมด้วยวิธี melt mixing และ solution mixing ที่ผล เป็นเช่นนี้เนื่องจากสาร modifier ใน C30B นั้นมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวและมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ทำให้ สามารถเกิด exfoliated nanocomposite ได้แม้จะขึ้นรูปแบบ melt mixing

จากผลที่ได้นี้ การที่ขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ solution mixing แล้วทำให้เกิดความเข้ากันได้ ระหว่างเฟสของ clay ชนิดต่าง ๆ กับเฟสของ TPS ดีขึ้นมากกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีแบบ melt mixing นั้นเป็นเพราะการที่ผสมด้วยวิธี solution mixing นั้นมีน้ำอยู่ในระบบการผสมด้วย ซึ่งน้ำที่มีอยู่ใน ระบบนั้นจะทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น จากสูตร

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดย ΔG = Gibbs free energy, ΔH = enthalpy, ΔS = entropy หรือ ความไม่เป็นระเบียบของระบบ

และ T = อุณหภูมิ (K)

การที่ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการผสมกันได้ค่านั้นค่า ΔG จะต้องมีค่าที่เป็นลบซึ่งการที่จะทำให้ค่า ΔG เกิดเป็นลบได้นั้นต้องทำให้เทอม $T\Delta S$ นั้นมีค่าสูง แต่ค่า T นั้นเป็นค่าของอุณหภูมิของระบบซึ่งในการทดลองจะใช้อุณหภูมิกงที่ ทำให้การที่จะทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการผสมกันได้ค่านั้น จะขึ้นอยู่กับค่า ΔS หรือค่าความไม่เป็นระเบียบของระบบ ดังนั้นเมื่อขึ้นรูป TPS แบบ solution mixing จะทำให้ระบบมีค่า ΔS สูงกว่าการขึ้นรูปแบบ melt mixing เพราะในระบบ solution mixing นั้นจะมีน้ำอยู่ในระบบซึ่งน้ำจะเป็นตัวช่วยทำให้ ΔS หรือความไม่เป็นระเบียบมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อมีน้ำอยู่ในระบบ น้ำจะเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวทำให้เป็นการลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวด้วยกันเอง ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวมีอิสระในการเคลื่อนที่มากขึ้น สามารถที่จะเคลื่อนที่แทรกเข้าไปในชั้นของ silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ได้ง่าย และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของสาร modifier ในชั้น silicate ของ clay ชนิดต่าง ๆ ได้ง่ายกว่าการผสมแบบ melt mixing ส่งผล

ให้การขึ้นรูปแบบ solution mixing ทำให้เกิดความเข้ากันได้ของสารในระบบมากกว่าการผสมแบบ melt mixing

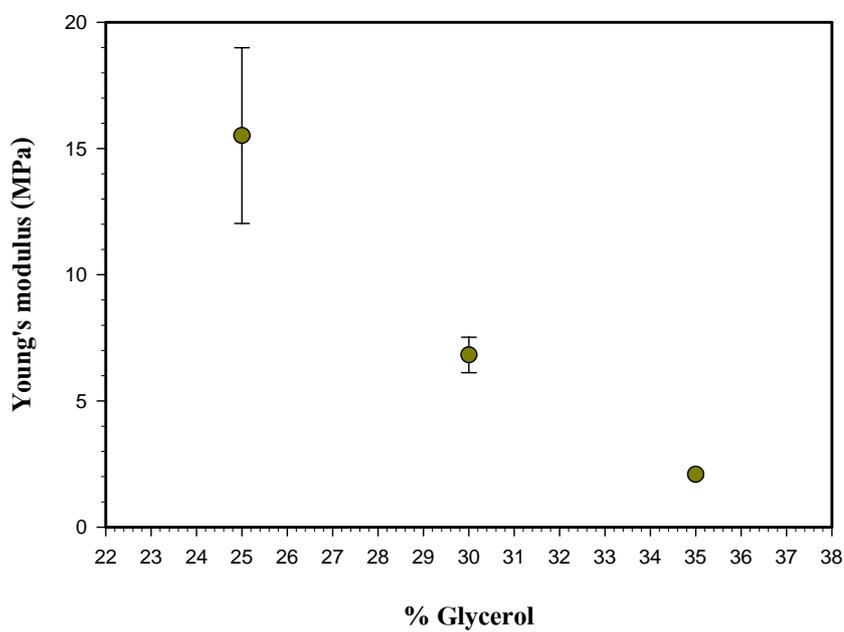
ตอนที่ 4 การหาปริมาณของ glycerol ที่ทำให้ชิ้นงาน TPS ที่ใช้การผสมแบบ melt mixing มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านทานแรงดึงยืด (Tensile properties)

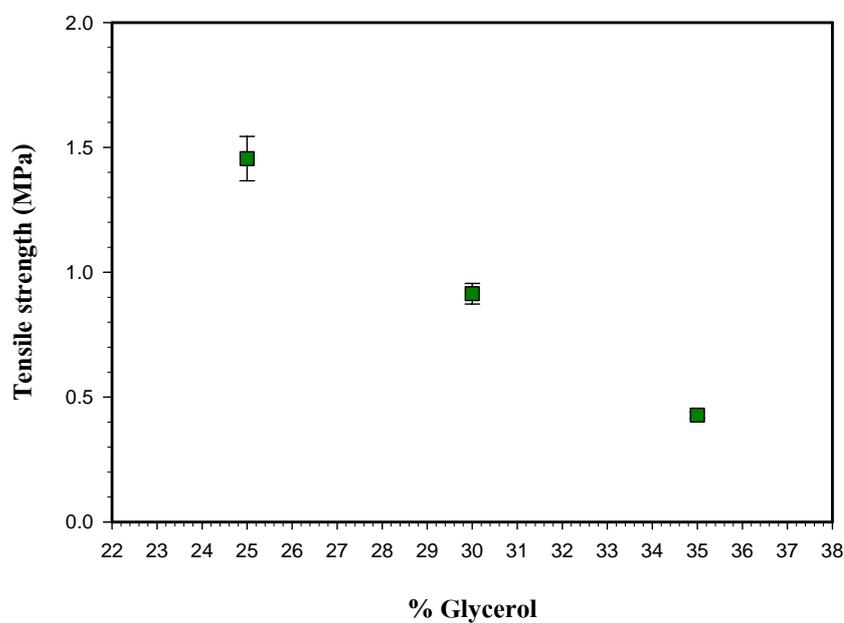
ชิ้นงาน TPS ทดสอบที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวซึ่งใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก โดยหลังจากขึ้นรูปชิ้นงานจะทำการเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงยืดด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine โดยใช้ Load Cell 5 kN อัตราเร็วในการดึง 50.0 mm/min ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าคุณสมบัติในการดึงยืด (Tensile properties) ของ TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก

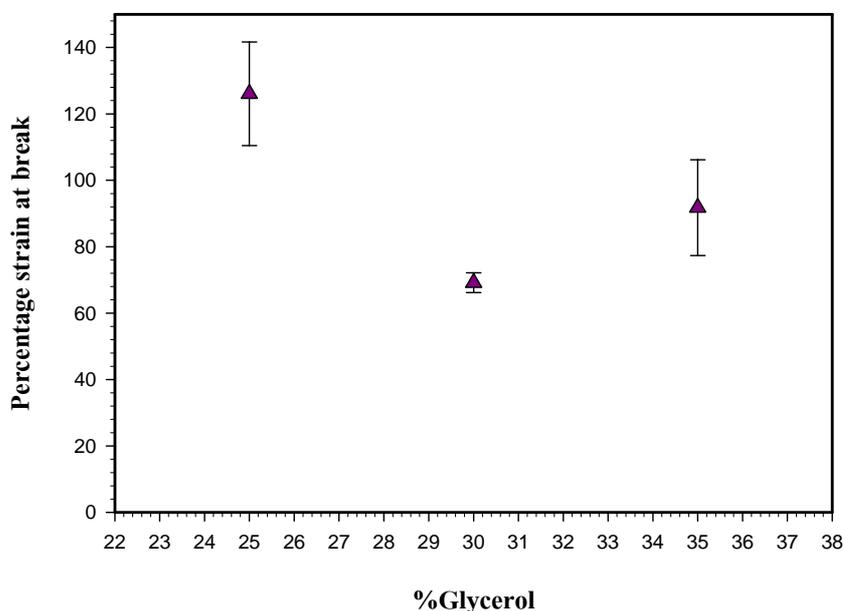
สูตร	Young's modulus (MPa)		Tensile strength (MPa)		Percentage strain at break	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
	MGly25-15	15.51	3.482	1.46	0.089	126.07
MGly30-15	6.82	0.703	0.91	0.041	69.16	2.984
MGly35-15	2.09	0.132	0.43	0.012	91.76	14.430



รูปที่ 27 ค่า young's modulus ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 28 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 29 ค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านการดึงยึดของชิ้นงานตัวอย่าง TPS ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 27 และ 28 พบว่าเมื่อปริมาณ glycerol มากขึ้นจะทำให้ชิ้นงาน TPS มีความแข็งแรงในการดึงยึดลดลง โดยดูได้จากค่า young's modulus และ tensile strength ที่ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ glycerol มากขึ้น โมเลกุลของ glycerol จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอยู่ห่างกันมากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงยึด โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียว จึงสามารถเคลื่อนตัวออกจากกันตามแรงดึงได้ง่าย และจากรูปที่ 29 พบว่าค่า percentage strain at break ที่ได้จะมีแนวโน้มไม่ชัดเจนอาจเนื่องจากว่าโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวบางส่วนอาจเกิด retrogradation ขึ้น เนื่องจากเมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ 53% ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 15 วันพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอาจเกิดการแตกออกเพราะพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ [8] ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกลับมาเกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ค่า percentage strain at break ที่ได้จึงมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทก (Impact properties)

ชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบการทนทานต่อแรงกระแทก (impact specimens) ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็น พลาสติกไซเซออร์ โดยหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานจะทำการเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทกได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าคุณสมบัติในการทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ของ TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35%

สูตร	Impact strength (mJ/mm ²)		ลักษณะการแตกหัก
	Mean	SD	
MGly25-15	17.72	1.708	complete break
MGly30-15	9.87	1.031	partial break
MGly35-15	5.64	0.604	partial break

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทก (impact strength) แบบ izod ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวและใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 13 พบว่าชิ้นงาน TPS ที่มีสัดส่วนของ glycerol 25% โดยน้ำหนัก (MGly25-15) มีลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบสมบูรณ์คือ แยกออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่า ในขณะที่ชิ้นงาน TPS ที่มีสัดส่วนของ glycerol 30% โดยน้ำหนัก (MGly30-15) และ 35% โดยน้ำหนัก (MGly35-15) มีลักษณะการแตกหักของชิ้นงานไม่สมบูรณ์คือ บางส่วนของชิ้นงานขาดออกด้วยมุมมากกว่า 90° ที่เป็นเช่นนี้เพราะ TPS ที่มีสัดส่วนของ glycerol มากขึ้น โมเลกุลของ glycerol ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์จะแทรกเข้าไประหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียว ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวลดลง โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวจึงสามารถเคลื่อนตัวได้มากขึ้นหรือมีความยืดหยุ่นได้มากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระแทกอย่างรวดเร็ว โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวสามารถเคลื่อนตัวได้มากขึ้นทำให้เป็นการลดความเค้น (stress) ที่เกิดจากแรงกระแทกได้มาก ชิ้นงานจึงเกิดการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ ส่วนชิ้นงาน TPS ที่มีสัดส่วน glycerol น้อยที่สุด คือ 25% โดยน้ำหนัก โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวจะจัดเรียงตัวชิดกันและมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงมากกว่า เนื่องจากสัดส่วนของ glycerol ที่น้อยกว่าทำให้การกระจายตัวของ

โมเลกุล glycerol ที่จะเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวมีน้อยกว่าทำให้ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงาน TPS ชนิดนี้มีลักษณะแข็งเกร็ง (stiffness) เมื่อได้รับแรงกระทำอย่างรวดเร็ว โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวไม่สามารถเคลื่อนตัวเพื่อลดความเค้น (stress) จากแรงนั้นได้ โมเลกุล จึงเกิดการเคลื่อนที่ออกจากกันหรือเกิดการแตกหักของชิ้นงานแบบสมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นค่า impact strength ของชิ้นงานสูตร MGly30-15 และ MGly35-15 ที่ได้จึงไม่ใช่ค่าที่แท้จริงและไม่สามารถนำค่าไปเปรียบเทียบกับชิ้นงาน TPS สูตร MGly25-15 ได้

ตอนที่ 5 การหาสัดส่วนและชนิดของ clay ที่เติมลงไปชิ้นงาน TPS แล้วทำให้ชิ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

1. การหาสัดส่วนของ bentonite clay ที่เติมลงไปชิ้นงาน TPS แล้วทำให้ชิ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

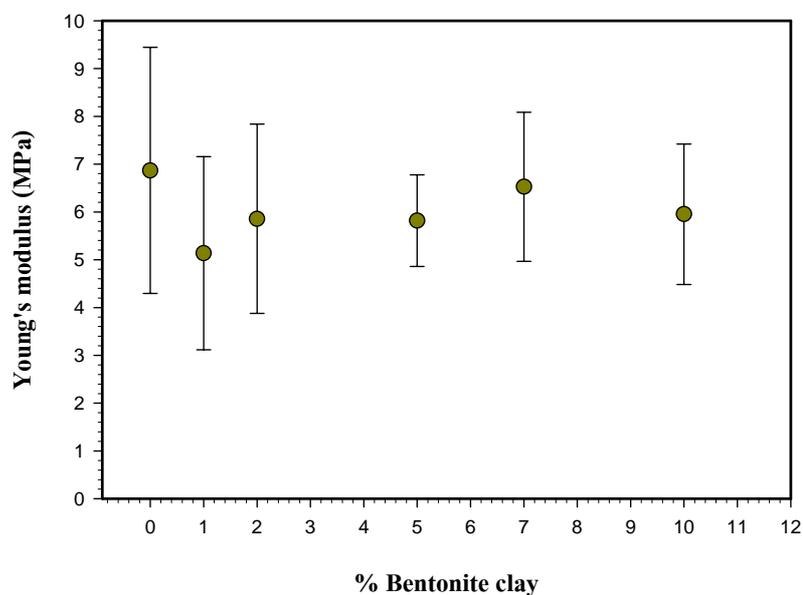
1.1 การวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึงยืด (tensile strength)

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านการดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน ได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 14

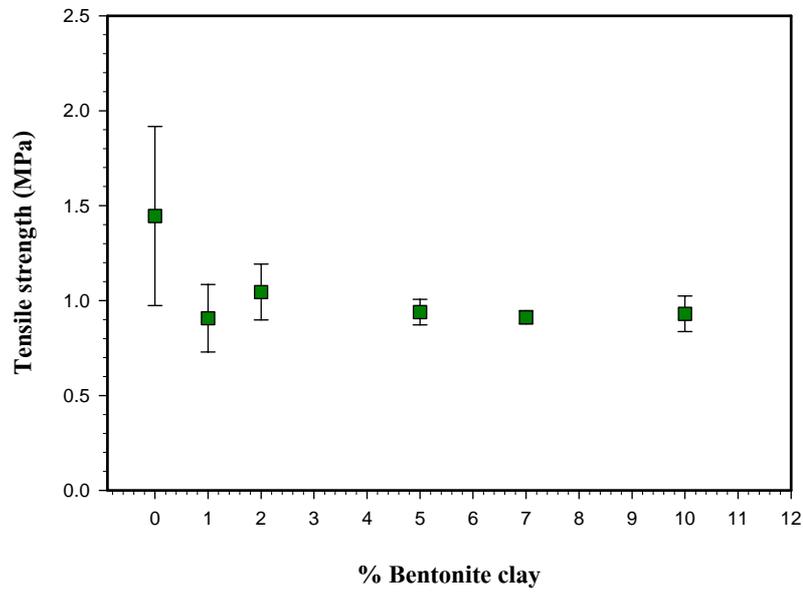
ตารางที่ 14 ค่าคุณสมบัติในการดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก

สูตร	%Bentonite clay	Young's modulus (MPa)		Tensile strength (MPa)		Percentage strain at break	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
MGly25-15	0	6.87	2.576	1.45	0.472	185.82	16.422
MGly25-Be-1-15	1	5.14	2.020	0.91	0.178	74.24	16.224
MGly25-Be-2-15	2	5.86	1.981	1.05	0.147	68.79	20.755
MGly25-Be-5-15	5	5.82	0.959	0.94	0.067	71.25	5.723
MGly25-Be-7-15	7	6.53	1.558	0.91	0.035	60.36	5.955
MGly25-Be-10-15	10	5.95	1.470	0.93	0.094	59.63	10.178

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

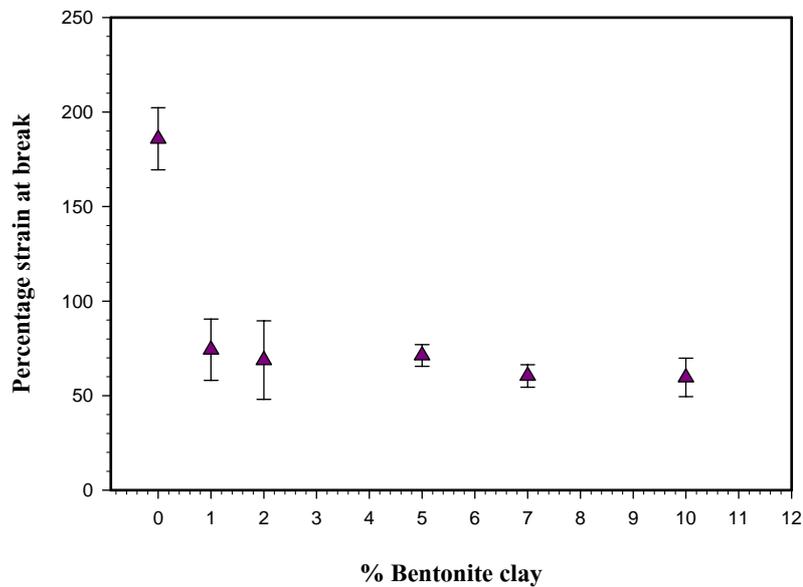


รูปที่ 30 ค่า young's modulus ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 31 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์



รูปที่ 32 ค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ และมีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อสัดส่วนของ bentonite clay ในชิ้นงาน TPS มากขึ้น ค่า young's modulus และค่า tensile strength ของชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ดังรูปที่ 30 และ 31 ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว เมื่อสัดส่วนของ bentonite clay ในชิ้นงาน TPS มากขึ้นค่า young's modulus และค่า tensile strength ของชิ้นงานน่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีการเติม bentonite clay ลงไปในสัดส่วนที่มากขึ้นนั้น ปริมาณของ bentonite clay ที่มีอยู่ในชิ้นงาน TPS ย่อมมากขึ้นตามไปด้วย และ bentonite clay ที่เติมลงไปนั้นสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณของ bentonite clay มากขึ้นจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง bentonite clay กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวมากขึ้น และ bentonite clay มี aspect ratio อยู่ระหว่าง 500-1000 ซึ่งสามารถเสริมแรงให้กับชิ้นงาน TPS ได้ แต่จากผลการทดลองที่ได้ ค่า young's modulus กับ tensile strength ของชิ้นงาน TPS มีค่าใกล้เคียงกัน และไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากว่าชิ้นงาน TPS ทุกชิ้นที่นำมาทดสอบนั้นถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ 53% ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 15 วัน ทำให้ชิ้นงาน TPS สามารถดูดความชื้นได้มาก ซึ่งปริมาณของน้ำที่ถูกดูดเข้าไปจะกระจายตัวเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกับโมเลกุลของ bentonite clay และระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวด้วยกันเอง ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกับ bentonite clay และโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวด้วยกัน มีระยะห่างที่มากขึ้นและการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันลดลงมากและโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวบางส่วนอาจเกิด retrogradation ขึ้น เนื่องจากเมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ 53% ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 15 วันพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอาจเกิดการแตกออกเพราะพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ [8] ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกลับมาเกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นจึงเป็นผลให้ถึงแม้จะเติมสัดส่วนของ bentonite clay ในชิ้นงาน TPS มากขึ้น แต่ค่า young's modulus กับ tensile strength ของชิ้นงาน TPS กลับมีค่าใกล้เคียงกันและไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

สำหรับกรณีของค่า percentage strain at break พบว่าเมื่อสัดส่วนของ bentonite clay ในชิ้นงาน TPS มากขึ้นค่า percentage strain at break มีค่าใกล้เคียงกันแต่จะมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 32 ทั้งนี้เนื่องจากว่า bentonite clay ที่เติมลงไปนั้น จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียว ทำให้เมื่อชิ้นงาน TPS ได้รับแรงดึงยืดมากขึ้นนั้น โมเลกุลของแป้งจะเคลื่อนที่ออกจากกันได้ยากขึ้น เนื่องจากผลของ bentonite clay จึงทำให้ค่า percentage strain at brake ของชิ้นงาน TPS ที่นำมาทดสอบมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนของ bentonite clay มีค่ามากขึ้น

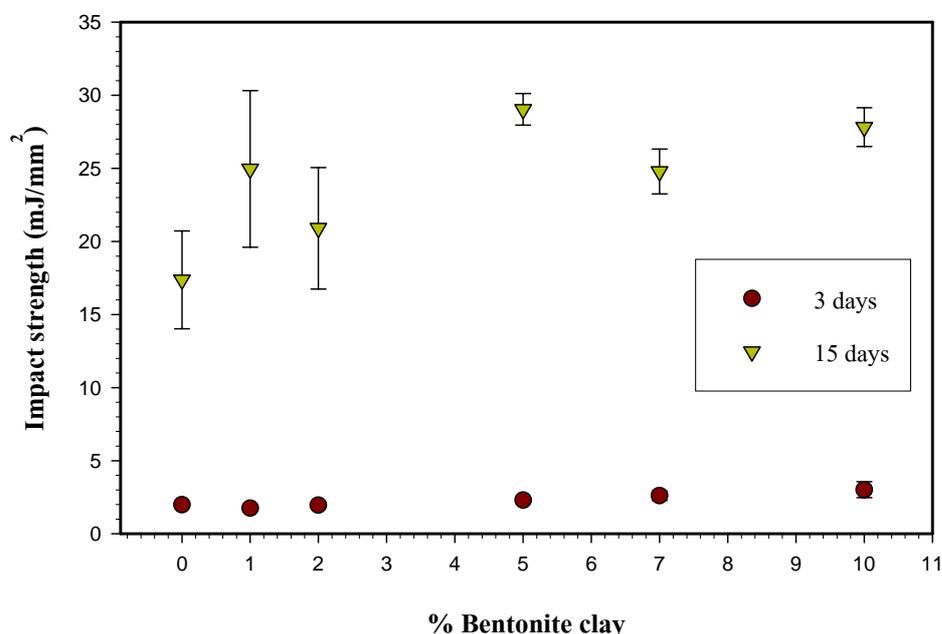
และเมื่อพิจารณาค่า young's modulus ค่า tensile strength และค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay และไม่มีการเติม bentonite clay พบว่าชิ้นงานที่มีการเติม bentonite clay มีค่า young's modulus ค่า tensile strength และค่า percentage strain at break น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติม bentonite clay ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อมีโมเลกุลของน้ำกระจายตัวเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกับโมเลกุลของ bentonite clay ทำให้โมเลกุลทั้งสองชนิดอยู่ห่างกันมากขึ้นและมีพันธะไฮโดรเจนลดลง ทำให้ bentonite clay ที่เติมลงไปนั้นมีความเข้ากันได้กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้น้อยลง และโมเลกุลของ bentonite clay ยังไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแป้ง ในขณะที่ได้รับแรงดึงยืด เป็นผลให้ค่า young's modulus ค่า tensile strength และค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay มีค่าน้อยกว่า ชิ้นงาน TPS ที่ไม่ได้เติม bentonite clay

1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties)

ชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบการทนทานต่อแรงกระแทก (impact specimens) ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียว โดยใช้ glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ และมีการเติม bentonite clay เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ TPS โดยหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานจะทำการเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทกแบบ charpy ได้ผล ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าคุณสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่าง ๆ ผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน

สูตร	Impact strength (mJ/mm ²)		ลักษณะการแตกหัก
	Mean	SD	
MGly25-3	1.98	0.141	complete break
MGly25-Be-1-3	1.74	0.150	complete break
MGly25-Be-2-3	1.96	0.166	complete break
MGly25-Be-5-3	2.29	0.160	complete break
MGly25-Be-7-3	2.60	0.315	complete break
MGly25-Be-10-3	3.00	0.546	complete break
MGly25-15	17.37	3.344	complete break
MGly25-Be-1-15	24.96	5.357	complete break
MGly25-Be-2-15	20.90	4.154	complete break
MGly25-Be-5-15	29.03	1.077	complete break
MGly25-Be-7-15	24.78	1.533	complete break
MGly25-Be-10-15	27.82	1.326	complete break



รูปที่ 33 ค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนต่างๆ ผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า impact strength ของชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน พบว่าเมื่อเก็บชิ้นงานนานขึ้น ค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS จะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากอิทธิพลของน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในชิ้นงาน TPS โดยโมเลกุลของน้ำจะแทรกเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอยู่ห่างกันมากขึ้น เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ชิ้นงานจึงรับแรงกระแทกได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาเฉพาะการเก็บชิ้นงาน 15 วัน จะพบว่าค่า impact strength ที่ได้จะมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงาน TPS ดูดความชื้นเข้าไปมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปกระจายตัวแทรกระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกับโมเลกุลของ bentonite clay และระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวด้วยกันเอง ทำให้โมเลกุลของน้ำเหล่านี้ไปบดบังการทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงของ bentonite clay และโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวบางส่วนอาจเกิด retrogradation ขึ้น เนื่องจากเมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ 53% ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 15 วันพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอาจเกิดการแตกออกเพราะพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับ

โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ [8] ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกลับมาเกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองอีกครั้งหนึ่งค่า impact strength ที่ได้จึงไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ bentonite clay ในชิ้นงาน TPS เพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาชิ้นงาน TPS ที่มีการเก็บชิ้นงานไว้ 3 วัน พบว่าเมื่อสัดส่วนของ bentonite clay ในชิ้นงาน TPS เพิ่มขึ้นความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกหรือค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS มีแนวโน้มที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่า bentonite clay ที่เติมลงไปนั้นเป็นวัสดุอนินทรีย์ (inorganic materials) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก และโมเลกุลของ bentonite ยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้ ดังนั้นเมื่อชิ้นงาน TPS ที่นำมาทดสอบได้รับแรงกระแทกที่รวดเร็วจึงสามารถส่งผ่านแรงที่ได้รับนั้นไปยัง bentonite clay ได้ อีกทั้งการเก็บชิ้นงานไว้ 3 วันนั้นชิ้นงานยังคงความชื้นได้น้อย โมเลกุลของน้ำที่เข้าไปในชิ้นงานยังไม่ส่งผลกระทบต่อการทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงของ bentonite clay มากนักจึงทำให้ชิ้นงาน TPS สามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น ค่า impact strength จึงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า impact strength ระหว่างชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเติม bentonite clay และมีการเติม bentonite clay ทั้งชิ้นงาน TPS ที่มีการเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน และ 15 วัน พบว่าค่า impact strength ของชิ้นงานที่มีการเติม bentonite clay มีค่ามากกว่าชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเติม bentonite clay ทั้งนี้เพราะ bentonite clay ที่เติมลงไปจะไปช่วยรับแรงกระแทกในชิ้นงาน TPS ทำให้ชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay รับแรงกระแทกได้มากขึ้น ค่า impact strength จึงมากกว่าชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเติม bentonite clay

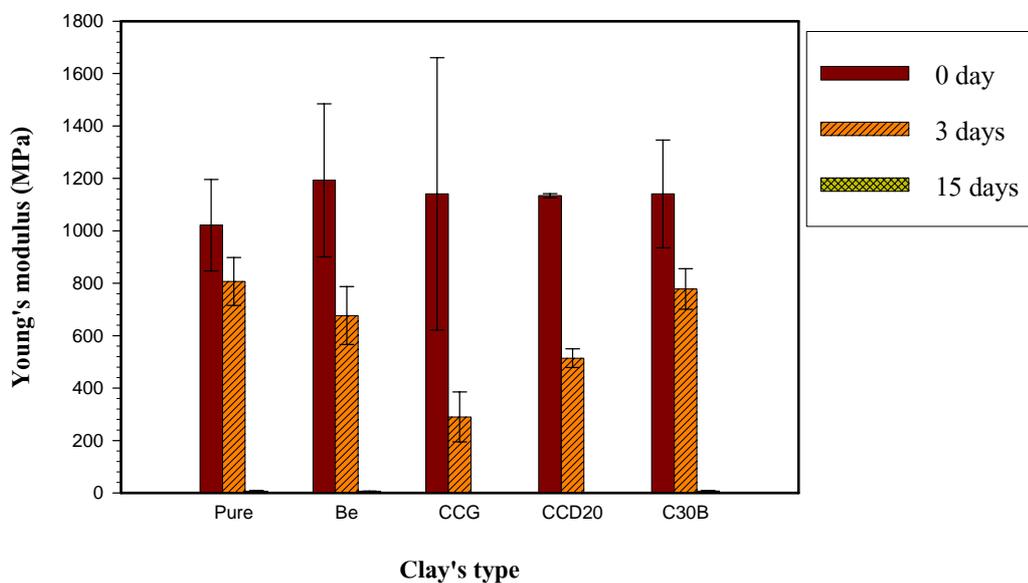
2. การหาชนิดของ clay ที่เติมลงไปชิ้นงาน TPS แล้วทำให้ชิ้นงาน TPS มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

2.1 การวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึงยืด (tensile strength)

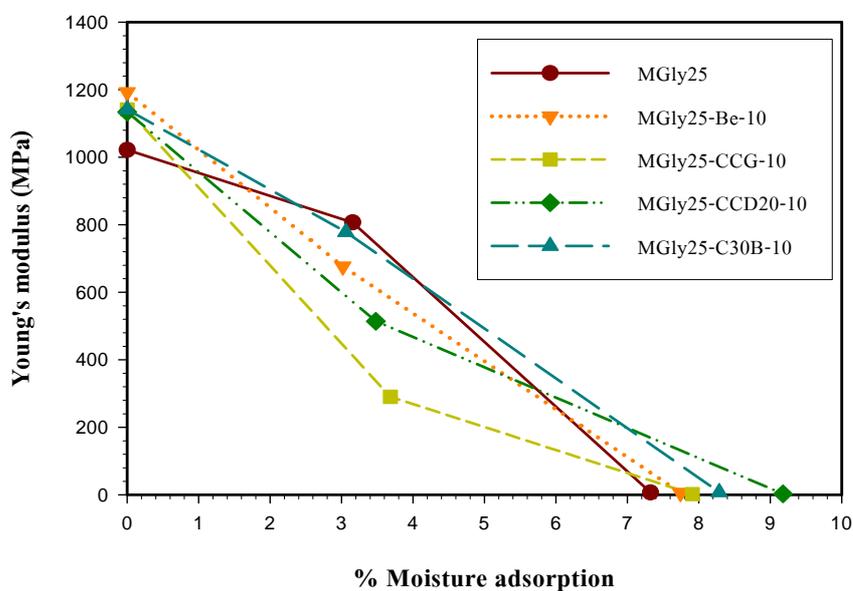
จากการทดสอบคุณสมบัติด้านการดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ คือ bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน ได้ผล ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าคุณสมบัติในการดึงยึด (tensile properties) และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน

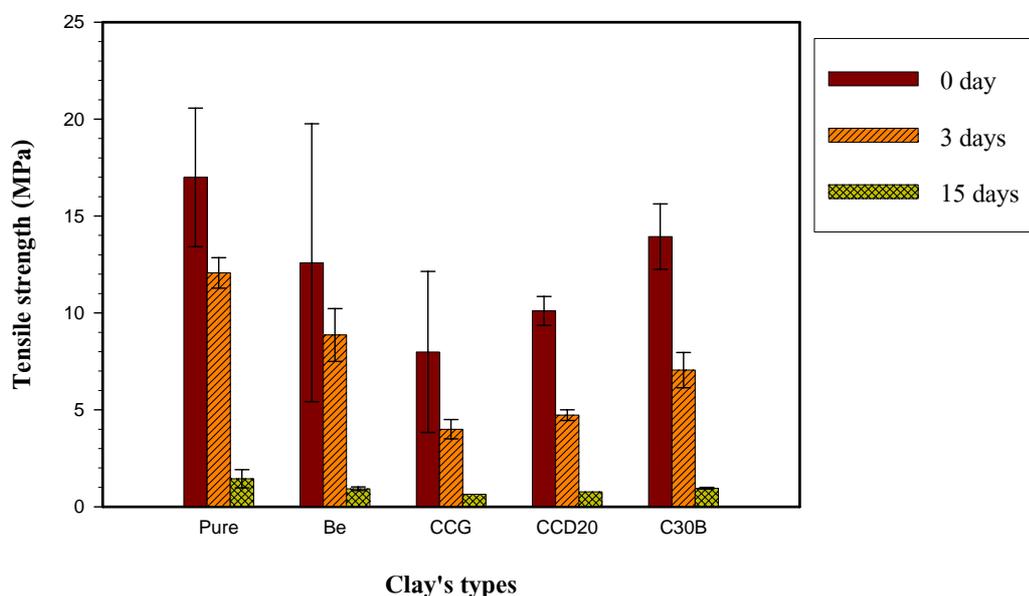
สูตร	วัน	% moisture adsorption	Young's modulus (MPa)		Tensile strength (MPa)		Percentage strain at break	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
MGly25	0	0.00	1021.30	174.328	16.99	3.571	3.10	0.789
	3	3.16	806.72	91.281	12.07	0.789	3.17	0.173
	15	7.32	6.87	2.576	1.45	0.472	185.82	16.422
MGly25-Be-10	0	0.00	1192.69	292.323	12.59	7.168	1.67	0.957
	3	3.02	676.59	110.473	8.86	1.359	2.08	0.381
	15	7.75	5.95	1.470	0.93	0.094	59.63	10.178
MGly25-CCG-10	0	0.00	1141.21	519.686	7.99	4.152	1.49	1.030
	3	3.69	290.01	95.607	4.00	0.497	4.22	1.447
	15	7.91	2.13	0.000	0.65	0.000	113.53	0.000
MGly25-CCD20-10	0	0.00	1133.98	7.754	10.11	0.747	1.26	0.143
	3	3.48	513.72	35.509	4.73	0.275	1.27	0.172
	15	9.18	2.49	0.000	0.77	0.000	128.01	0.000
MGly25-C30B-10	0	0.00	1140.87	205.541	13.94	1.687	2.02	0.513
	3	3.06	778.05	77.145	7.05	0.907	2.33	0.201
	15	8.29	7.31	0.773	0.96	0.047	156.86	29.456



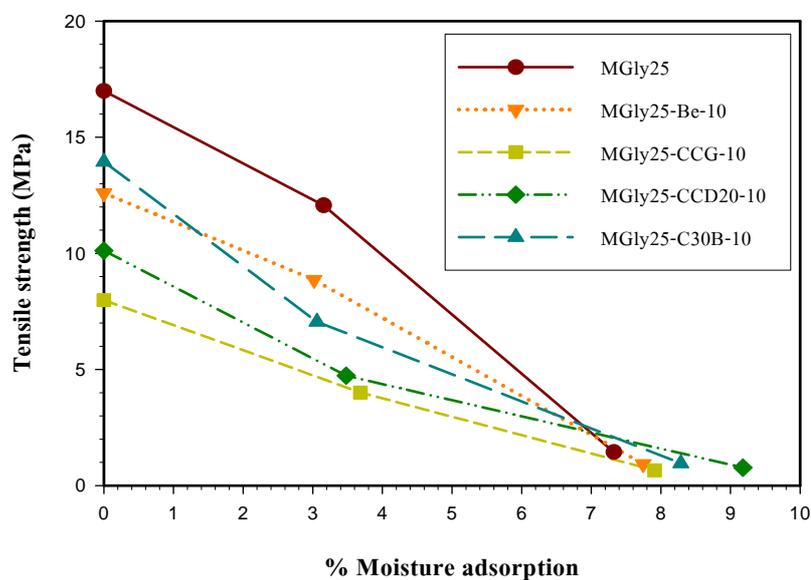
รูปที่ 34 ค่า young's modulus ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน



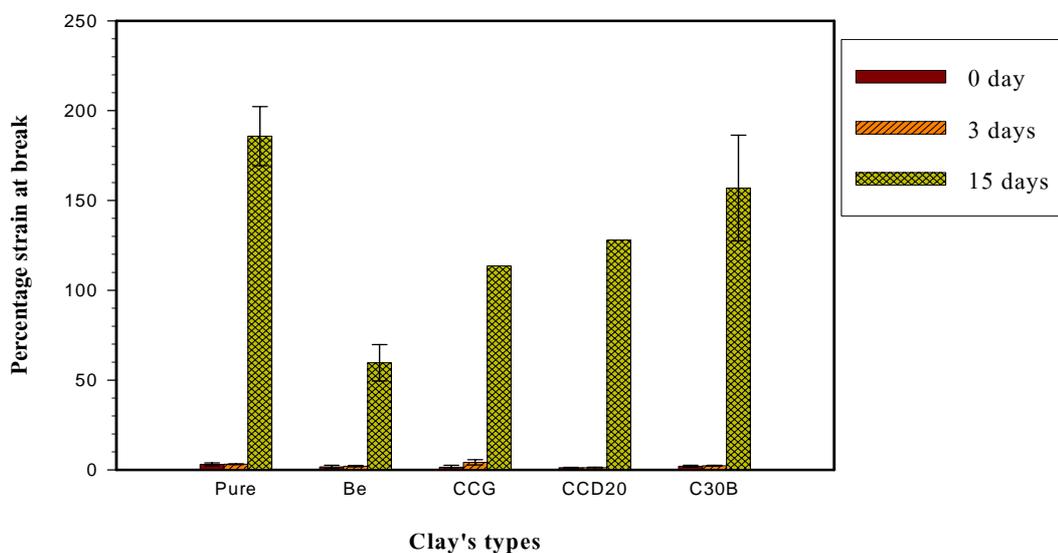
รูปที่ 35 ค่า young's modulus และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน



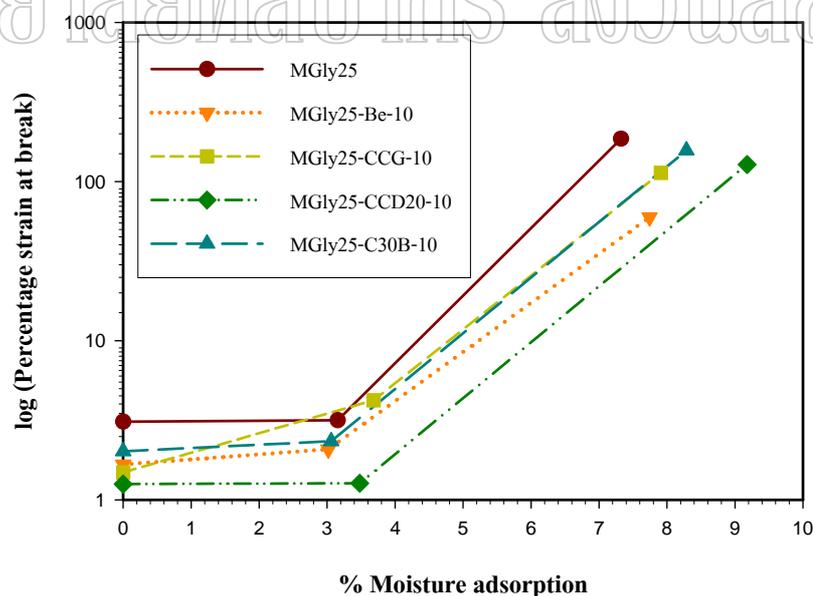
รูปที่ 36 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน



รูปที่ 37 ค่า tensile strength และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน



รูปที่ 38 ค่า percentage strain at break ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน



รูปที่ 39 ค่า percentage strain at break และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน

จากรูปที่ 35 และ 37 พบว่าเมื่อเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลานานขึ้น จะทำให้ชิ้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption มากขึ้น และส่งผลให้ค่า young's modulus และค่า tensile strength ของชิ้นงานทุกสูตรมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของน้ำที่ถูกชิ้นงานดูดเข้าไป จะแทรกเข้าไประหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกับอนุภาคของ clay และระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวด้วยกันเอง ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกับ clay และโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวด้วยกันมีระยะห่างที่มากขึ้น และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่า young's modulus และค่า tensile strength มีค่าลดลงเมื่อชิ้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption มากขึ้น และจากรูปที่ 39 เมื่อชิ้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption มากขึ้น จะทำให้ค่า percentage strain at brake มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าโมเลกุลของน้ำที่แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวนั้น จะสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้ทำให้เมื่อชิ้นงาน TPS ได้รับแรงดึง โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่าย ทำให้ชิ้นงานดึงยืดได้มากขึ้น

จากรูปที่ 34 และ รูปที่ 35 เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ไม่ได้มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น พบว่าชิ้นงานสูตร MGly25-0 จะมีค่า young's modulus น้อยที่สุด ส่วนชิ้นงานสูตรอื่นๆ ที่เหลือคือ MGly25-Be-10-0, MGly25-CCG-10-0, MGly25-CCD20-10-0 และ MGly25-C30B-10-0 นั้นจะมีค่า young's modulus ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากว่าเมื่อมีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปในชิ้นงาน TPS อนุภาคของ clay ชนิดต่าง ๆ จะช่วยรับแรงส่วนหนึ่งไว้ ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่า young's modulus จึงเพิ่มมากกว่าชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเติม clay ลงไป และเมื่อพิจารณาชิ้นงาน TPS ที่ถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน พบว่าชิ้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption ใกล้เคียงกันและชิ้นงานสูตร MGly25-3 จะมีค่า young's modulus มากกว่าชิ้นงานสูตรอื่นๆ ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปในชิ้นงาน ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดเข้าไปในชิ้นงานนั้นจะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างอนุภาคของ clay กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวทำให้ความสามารถในการรับแรงของ clay ที่ส่งผ่านมาจากโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวลดลง ทำให้ชิ้นงาน MGly25-3 ที่ไม่มีการเติม clay จึงมีค่า young's modulus มากที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงชนิดของ clay ที่เติมลงไป ในชิ้นงานจะพบว่าชิ้นงานที่มีการเติม C30B จะมีค่า young's modulus มากที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่มีการเติม bentonite clay, CCD20 และ CCG ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะจากผลการทดสอบ XRD พบว่าชิ้นงานที่มีการเติม C30B นั้นจะมีลักษณะเป็น exfoliated nanocomposite ทำให้ชิ้นงานมีความเข้ากันได้ของระบบที่ดีจึงส่งผลให้มีความแข็งแรงมากที่สุด ชิ้นงานที่มีการเติม bentonite clay นั้นจะแข็งแรงรองลงมาเพราะชิ้นงานที่มีการเติม bentonite clay จะเกิดเป็น intercalated nanocomposite ที่มีการขยายของชั้น silicate ของ bentonite clay ที่กว้างมากกว่าใน

CCD20 และ CCG และถึงแม้ว่าชั้นงานที่มีการเติม CCD20 จะเกิดเป็น exfoliated nanocomposite แต่ก็เป็นส่วนน้อยทำให้ส่วนที่เป็น intercalated nanocomposite มีผลต่อความแข็งแรงของชั้นงานมากกว่า ส่วนชั้นงานที่มีการเติม CCG ลงไปนั้นจะมีค่า young's modulus น้อยที่สุด เพราะชั้นงานเป็น intercalated nanocomposite และเมื่อพิจารณาชั้นงานที่เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 15 วันพบว่าค่า young's modulus ของชั้นงานมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับชั้นงานที่เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน

จากรูปที่ 36 และ รูปที่ 37 เมื่อพิจารณาชั้นงานที่ไม่ได้มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นพบว่าชั้นงานสูตร MGly25-0 จะมีค่า tensile strength ที่มากที่สุด รองลงมาคือชั้นงานสูตร MGly25-C30B-10-0, MGly25-Be-10-0, MGly25-CCD20-10-0 และชั้นงานสูตร MGly25-CCG-10-0 นั้นจะมีค่า tensile strength น้อยที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เพราะชั้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปจะทำให้ชั้นงานที่ได้มีลักษณะแข็งเปราะมากขึ้น ดึงยึดได้น้อยลง เนื่องจากชั้นงานเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงดึง ทำให้ค่า tensile strength ที่ได้จึงมีค่าน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นงาน TPS ที่ไม่ได้มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไป และเมื่อพิจารณาถึงชนิดของ clay ที่เติมลงในชั้นงาน TPS พบว่าชั้นงานที่มีการเติม C30B จะมีค่า tensile strength มากที่สุดเพราะเป็น exfoliated nanocomposite ทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ C30B กับเฟสของ TPS สูง ส่วนชั้นงานที่เติม bentonite clay จะมีค่า tensile strength รองลงมาเพราะเป็น intercalated nanocomposite ที่มีการขยายของชั้น silicate ของ bentonite clay มากที่สุด และแม้ว่าชั้นงานที่เติม CCD20 จะมีลักษณะเป็น exfoliated nanocomposite บางส่วน แต่ก็เป็นส่วนน้อยทำให้ผลของส่วนที่เป็น intercalated nanocomposite มีผลมากกว่า ค่า tensile strength จึงน้อยกว่าชั้นงานที่มีการเติม bentonite clay ลงไป ส่วนชั้นงานที่มีการเติม CCG นั้นจะมีค่า tensile strength น้อยที่สุดเพราะชั้นงานที่ได้เป็นแบบ intercalated nanocomposite ที่มีการขยายของชั้น silicate ของ CCG น้อยที่สุด ความเข้ากันได้ของ CCG กับเฟสของ TPS จึงน้อยที่สุด ทำให้ค่า tensile strength ของชั้นงานชนิดนี้มีค่าน้อยที่สุด

ต่อมาพิจารณาชั้นงานที่เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน พบว่าชั้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption ที่ใกล้เคียงกันมาก และเมื่อพิจารณาถึงค่า tensile strength พบว่าค่าที่ได้จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับชั้นงานที่ไม่ได้มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น แต่จะต่างกันตรงชั้นงานที่มีการเติม bentonite clay ลงไปนั้นจะกลับมีค่า tensile strength มากกว่าชั้นงานที่มี C30B ลงไป ซึ่งอาจเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำที่ชั้นงานดูดซึมเข้าไปจะแทรกเข้าไประหว่างอนุภาคของ C30B กับโมเลกุลของแป้งทำให้ชั้นงานที่มีการเติม C30B นั้นมีความเข้ากันได้ของระบบต่ำลง ค่า tensile strength จึงลดลง และเมื่อพิจารณาชั้นงานที่มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น 15 วัน พบว่าชั้นงาน

จะมีค่า tensile strength ที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า tensile strength ของชิ้นงานที่มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน แต่ค่า tensile strength ที่ได้ของแต่ละสูตรนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากมีผลของความชื้นและผลของการเกิด retrogradation เข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น

จากรูปที่ 38 และ รูปที่ 39 เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ไม่ได้มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นพบว่า ชิ้นงานสูตร MGly25-0 จะมีค่า percentage strain at break มากที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานสูตร MGly25-C30B-10-0, MGly25-Be-10-0, MGly25-CCG-10-0 และชิ้นงานสูตร MGly25-CCD20-10-0 จะมีค่า percentage strain at break น้อยที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมี clay ชนิดต่าง ๆ ผสมอยู่ในชิ้นงาน TPS ส่วนที่เป็น clay จะขัดขวางการเลื่อนไถลของโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวเมื่อได้รับแรงดึง จึงทำให้ค่า percentage strain at break ของชิ้นงานที่ไม่ได้เติม clay จึงมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีการเติม clay ส่วนเมื่อพิจารณาชนิดของ clay ที่เติมลงไปชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานที่เติม C30B จะมีค่า percentage strain at break มากที่สุดเพราะเป็น exfoliated nanocomposite ทำให้มีการผสมกันระหว่างเฟสของ C30B กับเฟสของ TPS ได้ดีทำให้ชิ้นงานดึงยืดได้มาก ส่วนชิ้นงานที่เติม bentonite clay จะมีค่า percentage strain at break รองลงมาเพราะเป็น intercalated nanocomposite ที่มีการขยายของชั้น silicate ของ bentonite clay มากที่สุด ส่วนชิ้นงานที่มีการเติม CCD20 และ CCG นั้นจะมีค่า percentage strain at break ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน พบว่าชิ้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption ที่ใกล้เคียงกันมากและเมื่อพิจารณาถึงค่า percentage strain at break พบว่าค่าที่ได้จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ได้เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นแต่จะแตกต่างกันตรงที่ชิ้นงานที่มีการเติม CCG ลงไปจะมีค่า percentage strain at break สูงที่สุด อาจเป็นเพราะชิ้นงานที่มีการเติม CCG จะมีค่า %moisture adsorption มากที่สุดจึงทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นให้กับชิ้นงานที่มีการเติม CCG จึงทำให้ชิ้นงานที่มีการเติม CCG จึงมีค่า percentage strain at break มากที่สุด ส่วนชิ้นงานที่มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 15 วันนั้น จะมีผลของ percentage strain at break ที่มีแนวโน้มไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นและชิ้นงานที่มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 3 วัน อาจเป็นเพราะผลของความชื้นที่ชิ้นงานดูดเข้าไปมากและโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวบางส่วนอาจเกิด retrogradation ขึ้น เนื่องจากเมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ 53% ความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลา 15 วันพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอาจเกิดการแตกออกเพราะพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ [8] ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกลับมาเกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองอีกครั้งหนึ่งจน

ไปมีผลกับ percentage strain at break มากกว่าผลของชนิดของ clay จึงทำให้ค่าที่ได้มีแนวโน้มไม่แน่นอน

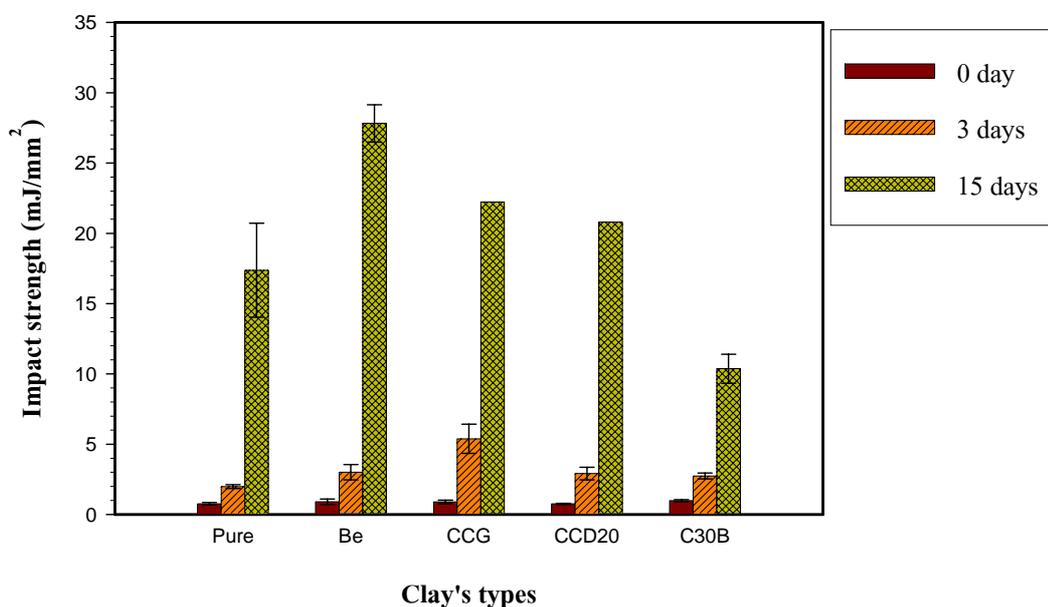
2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties)

ชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบการทนทานต่อแรงกระแทก (impact specimens) ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ glycerol เป็น พลาสติกไซเซอรันในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และมีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ คือ bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก หลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานจะทำการเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงานเมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกแบบ charpy ได้ผลดัง ตารางที่ 17

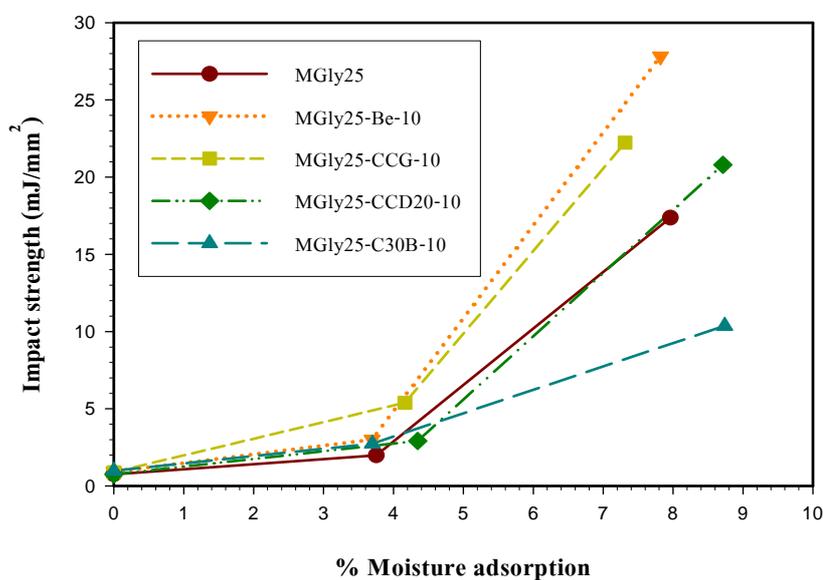
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 17 ค่าคุณสมบัติทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties) และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักมีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน

สูตร	วัน	% moisture adsorption	Impact strength (mJ/mm ²)	
			Mean	SD
MGly25	0	0.00	0.76	0.086
	3	3.75	1.98	0.141
	15	7.96	17.37	3.344
MGly25-Be-10	0	0.00	0.91	0.195
	3	3.70	3.01	0.0546
	15	7.82	27.82	1.326
MGly25-CCG-10	0	0.00	0.90	0.128
	3	4.17	5.39	1.040
	15	7.31	22.23	0.000
MGly25-CCD20-10	0	0.00	0.75	0.047
	3	4.35	2.92	0.448
	15	8.71	20.80	0.000
MGly25-C30B-10	0	0.00	0.98	0.072
	3	3.70	2.74	0.214
	15	8.7385	10.366	1.032



รูปที่ 40 ค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน



รูปที่ 41 ค่า impact strength และค่า %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก มีการเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 3 วัน 15 วัน และไม่มีการเก็บชิ้นงาน

จากรูปที่ 41 พบว่าเมื่อเก็บชิ้นงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลานานขึ้นจะทำให้ชิ้นงานทุกสูตรมี %moisture adsorption มากขึ้น และจะส่งผลให้ค่า impact strength ของชิ้นงานทุกสูตรมีค่ามากขึ้น เพราะโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดเข้าไปในชิ้นงานนั้นจะเข้าไปทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในชิ้นงานทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวได้ ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอยู่ห่างกันมากขึ้น เลื่อนไกลผ่านกันได้ง่ายขึ้น ชิ้นงานจึงรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

จากตารางที่ 17 รูปที่ 40 และ รูปที่ 41 เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ไม่ได้มีการเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นพบว่าค่า impact strength ของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ มีค่าจากมากไปหาน้อยดังนี้ MGly25-C30B-10-0 > MGly25-Be-10-0 > MGly25-CCG-10-0 > MGly25-0 > MGly25-CCD20-10-0 โดยที่ชิ้นงานสูตร MGly25-0 และ MGly25-CCD20-10-0 มีค่า impact strength ที่ใกล้เคียงกันมาก และจากพิจารณาค่า impact strength ที่ได้ จะพบว่าชิ้นงานที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ จะมีค่า impact strength ที่มากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติม clay ลงไปเพราะการเติม clay ลงไปในชิ้นงานจะทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระแทกจะสามารถส่งผ่านแรงที่ได้รับมานั้นไปยัง clay ได้ ดังนั้นค่า impact strength ที่ได้ของชิ้นงานที่มีการเติม clay จึงมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้มีการเติม clay และเมื่อพิจารณาถึงชนิดของ clay ที่เติมลงไปชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่มีการเติม C30B ลงไปในชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานมีค่า impact strength มากที่สุด เพราะชิ้นงานชนิดนี้เป็น exfoliated nanocomposite จึงมีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ C30B กับเฟสของ TPS ได้มาก การกระจายแรงกระแทกที่ได้รับมาผ่านไปยังเฟสของ C30B จึงทำได้ดี ชิ้นงานสูตรนี้จึงมีค่า impact strength สูงสุด และชิ้นงานสูตรที่มีค่า impact strength รองลงมาคือ ชิ้นงานที่มีการเติม bentonite clay ลงไป ซึ่งชิ้นงานประเภทนี้จะเป็ชิ้นงานที่เป็น intercalated nanocomposite ที่มีการขยายชั้น silicate ของ bentonite clay กว้างขึ้น ทำให้มีความเข้ากันได้ของชิ้นงาน TPS มากขึ้น ส่วนชิ้นงานที่มีการเติม CCG และ CCD20 นั้น ชั้นของ silicate ใน clay ทั้ง 2 ยังขยายไม่มากถึงแม้ว่าในชิ้นงาน CCD20 จะมีส่วนหนึ่งเกิดเป็น exfoliate nanocomposite ก็ตาม แต่ก็เป็นส่วนน้อยทำให้ค่า impact strength ของชิ้นงานทั้งสองนี้มีค่าต่ำลงมา

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่า impact strength ของชิ้นงานที่มีการเก็บชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมความชื้น 3 วันและ 15 วัน พบว่าแนวโน้มค่า impact strength ของชิ้นงานเมื่อพิจารณาตามชนิดของ clay ที่เติมลงไปชิ้นงานจะไม่มีแนวโน้มเด่นชัด เป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานดูดความชื้นเข้าไปทำให้โมเลกุลของน้ำไปมีผลกับค่า impact strength ของชิ้นงานมากกว่าผลของ clay ที่เติมลงไป และโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวบางส่วนอาจเกิด retrogradation ขึ้น เนื่องจากเมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ 53% ความชื้นสัมพัทธ์ พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol

กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวอาจเกิดการแตกออกเพราะพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ glycerol กับโมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ [8] ทำให้โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวกลับมาเกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นสารเสริมแรงของ clay ชนิดต่าง ๆ ได้

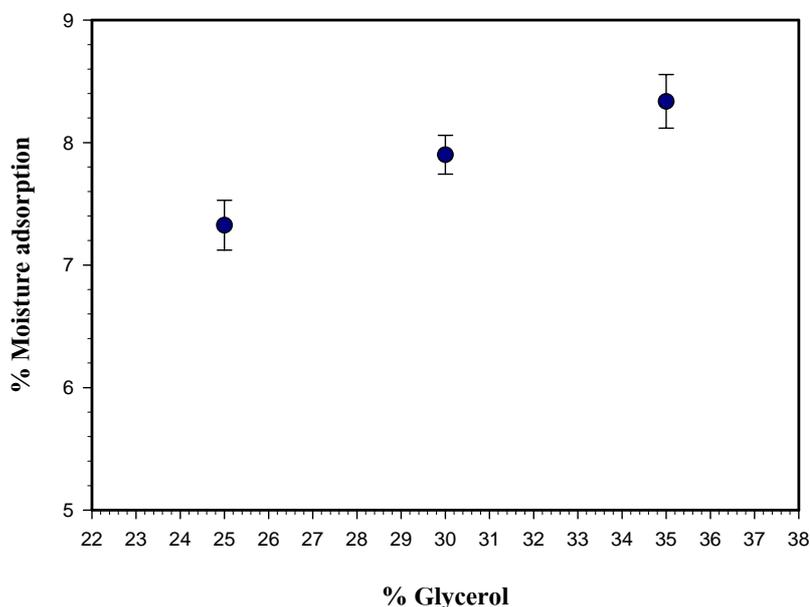
ตอนที่ 6 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS

1. การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีสัดส่วนของพลาสติกไซเซออร์ที่แตกต่างกัน

จากการนำชิ้นงาน TPS ที่ใช้แป้งข้าวเหนียวผสม glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก นำไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นเวลา 15 วันจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็น %moisture adsorption ได้ผลการทดลองดัง ตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม glycerol เป็นพลาสติกไซเซออร์ในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก

สูตร	%moisture adsorption	
	Mean	SD
MGly25-15	7.32	0.204
MGly30-15	7.90	0.158
MGly35-15	8.34	0.219



รูปที่ 42 %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม glycerol เป็นพลาสติกไซเซอรันในสัดส่วน 25%, 30% และ 35% โดยน้ำหนัก

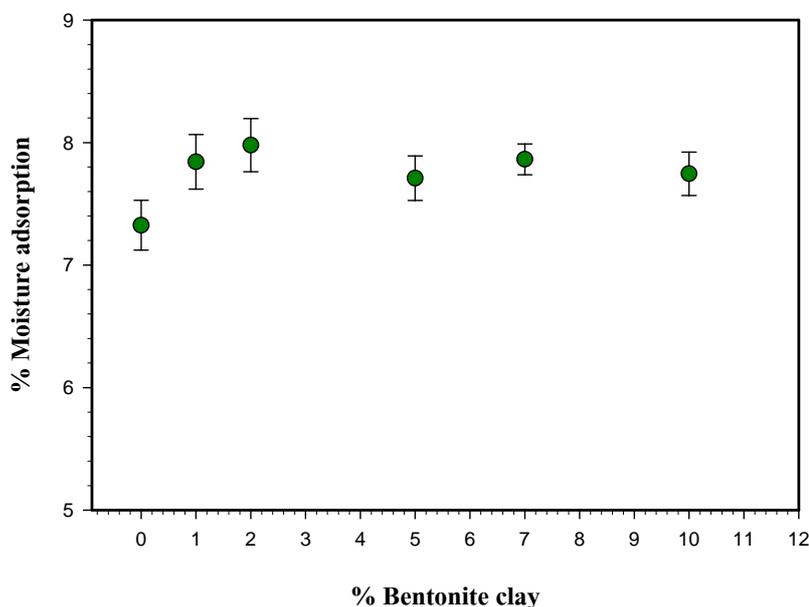
จากรูปที่ 42 พบว่าเมื่อสัดส่วนของ glycerol ในชิ้นงาน TPS เพิ่มมากขึ้น %moisture adsorption ก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะ glycerol ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรันนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลจึงทำให้ glycerol มีความเป็น hydrophilic เมื่อนำไปผสมกับ TPS ในสัดส่วนที่มากขึ้นทำให้ชิ้นงาน TPS มีความเป็น hydrophilic สูงขึ้นดังนั้นจึงทำให้ %moisture adsorption มีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อสัดส่วนของ glycerol ในชิ้นงาน TPS เพิ่มมากขึ้น glycerol บางส่วนที่มีมากเกินไป จะเกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้ glycerol ส่วนนี้ไปเพิ่มปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ดังนั้นจึงทำให้ %moisture adsorption มีค่าสูงขึ้น โดยสัดส่วนของ glycerol ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรันในชิ้นงาน TPS ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 23% โดยน้ำหนัก [18]

2. การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วนที่ต่างกัน

จากการนำชิ้นงาน TPS ที่ใช้แป้งข้าวเหนียวผสม glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และเติม bentonite clay ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นเวลา 15 วัน จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็น %moisture adsorption ได้ผลการทดลองดัง ตารางที่ 19

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก

สูตร	%moisture adsorption	
	Mean	SD
MGly25-15	7.32	0.204
MGly25-Be-1-15	7.84	0.223
MGly25-Be-3-15	7.98	0.217
MGly25-Be-5-15	7.71	0.182
MGly25-Be-7-15	7.86	0.126
MGly25-Be-10-15	7.75	0.178



รูปที่ 43 %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก

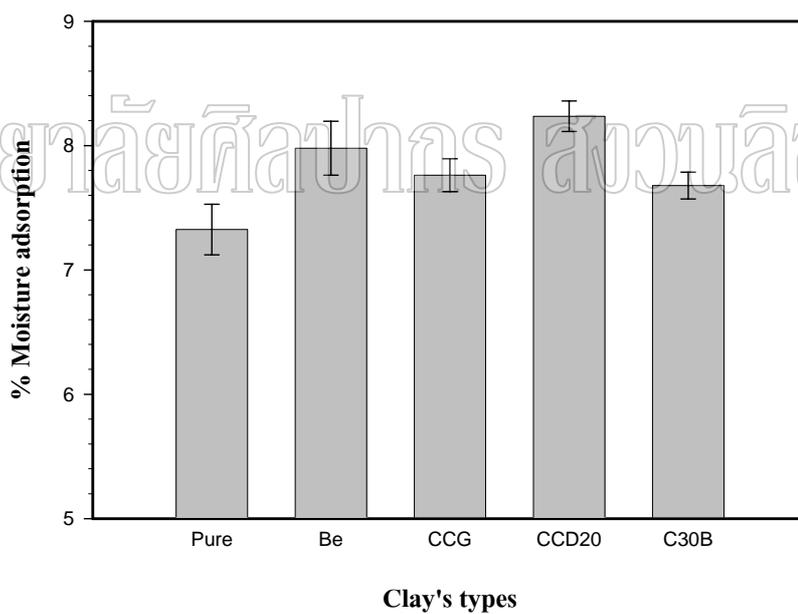
จากรูปที่ 43 พบว่าชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay ในสัดส่วน 1%, 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่า %moisture adsorption ที่ใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่ได้มีการเติม bentonite clay ลงไป ทั้งนี้เป็นเพราะว่า bentonite clay เองก็มีคุณสมบัติเป็น hydrophilic เช่นเดียวกับแป้งทำให้ bentonite clay ที่เติมลงไปนั้นจะไม่ส่งผลต่อความเป็น hydrophilic ของชิ้นงาน TPS มากนัก

3. การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ

จากการนำชิ้นงาน TPS ที่ใช้แป้งข้าวเหนียวผสม glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก และเติม bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 2% โดยน้ำหนัก นำไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นเวลา 15 วัน จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็น %moisture adsorption ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 2% โดยน้ำหนัก

สูตร	%moisture adsorption	
	Mean	SD
MGly25-15	7.32	0.204
MGly25-Be-2-15	7.98	0.217
MGly25-CCG-2-15	7.76	0.132
MGly25-CCD20-2-15	8.24	0.123
MGly25-C30B-2-15	7.68	0.108



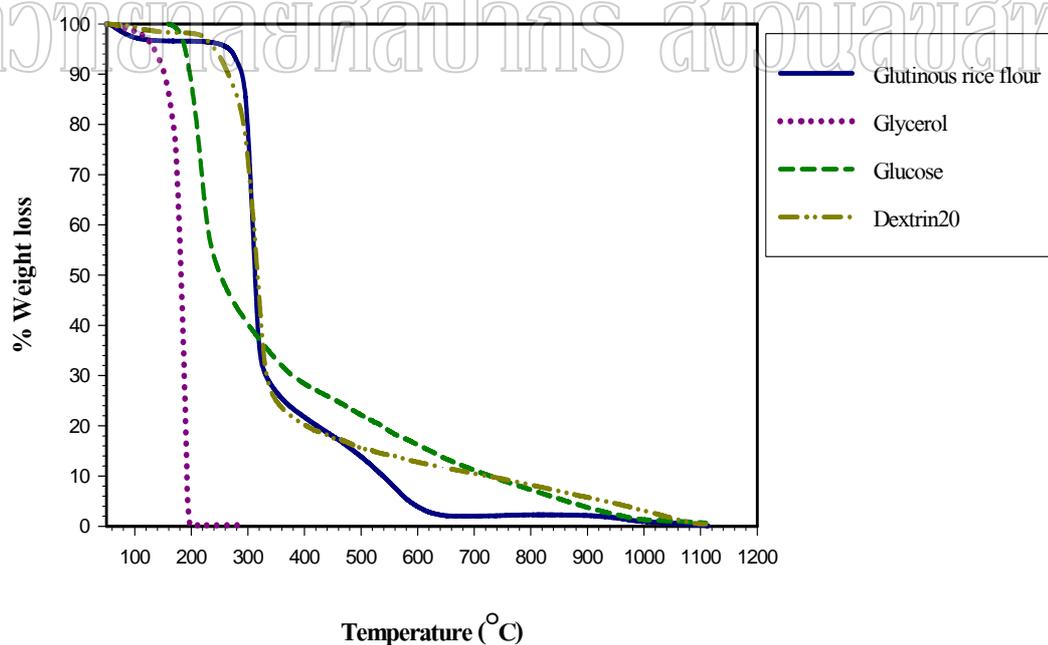
รูปที่ 44 %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 2% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 44 พบว่าชิ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปในสัดส่วน 2% โดยน้ำหนัก จะมีค่า %moisture adsorption ที่ใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่ได้มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไป ทั้งนี้เป็นเพราะว่า clay ชนิดต่าง ๆ ที่เติมลงไปนั้นจะไม่ส่งผลต่อความเป็น hydrophilic ของชิ้นงาน TPS มากนัก

ตอนที่ 7 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

1. การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมขึ้นรูป TPS และวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลาย cationic

จากการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียว, glucose, glycerol และ dextrin20 ด้วยเทคนิค TGA โดยให้ความร้อนจาก 50 องศาเซลเซียสถึง 1100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C ต่อนาที ได้ TGA thermogram แสดง ดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 TGA thermogram ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมขึ้นรูป TPS และวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลาย cationic

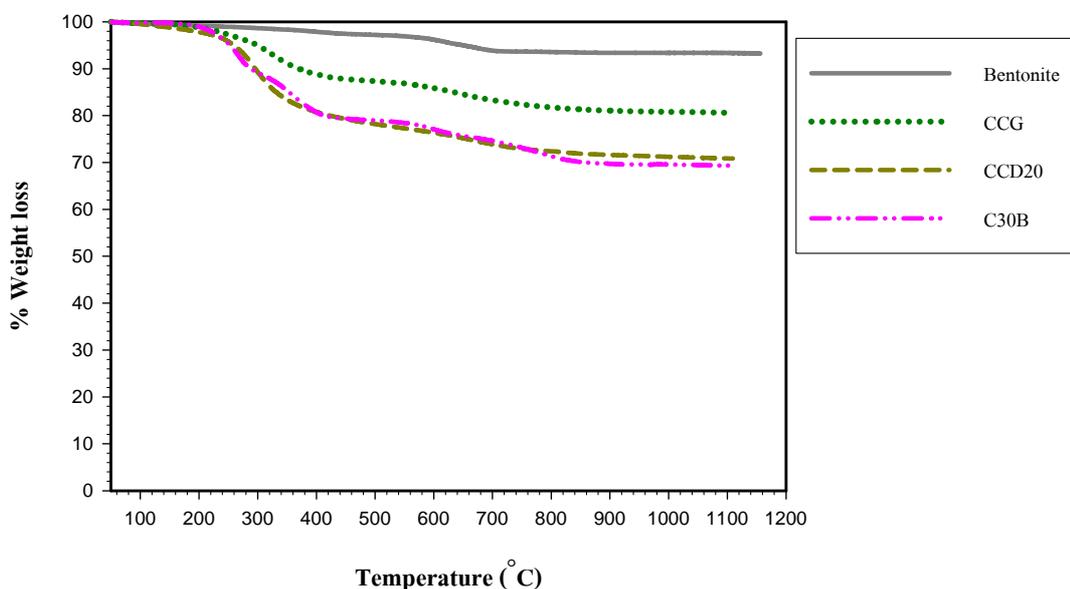
ตารางที่ 21 อุณหภูมิ onset และ inflection point ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมขึ้นรูป TPS และวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลาย cationic

สารตัวอย่าง	Temperature (°C)	
	onset	Inflection point
Glutinous rice flour	295.6	311.9
Glycerol (Gly)	172.4	190.9
Glucose	192.0	217.5
Dextrin20	292.2	318.8

เมื่อพิจารณารูปที่ 45 และ ตารางที่ 21 พบว่าแป้งข้าวเหนียวจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 295.6 องศาเซลเซียส dextrin20 จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 292.2 องศาเซลเซียส glucose เริ่มจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 192.0 องศาเซลเซียส ที่ผลเป็นเช่นนี้เพราะแป้งข้าวเหนียวมีความยาวของสายโซ่โมเลกุลมากที่สุด dextrin20 มีความยาวของสายโซ่โมเลกุลรองลงมา และ glucose นั้นมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นที่สุด ส่วน glycerol นั้นจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 172.4 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการผสม compound ใน internal mixer ที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส และการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS ด้วยเครื่อง compression moulding ที่ใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จึงทำให้แนวโน้มของการเกิดการสลายตัวของวัตถุดิบขณะทำการผสมและขึ้นรูปอยู่ในอัตราที่ต่ำ

2. การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของ clay ชนิดต่าง ๆ

จากการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของ clay ชนิดต่าง ๆ คือ bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ด้วยเทคนิค TGA โดยให้ความร้อนจาก 50 องศาเซลเซียสถึง 1100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C ต่อนาที ได้ TGA thermogram แสดงดังรูปที่ 46



รูปที่ 46 TGA thermogram ของ bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B

ตารางที่ 22 อุณหภูมิ onset และ inflection point ของ clay ชนิดต่าง ๆ

Clay's types	Temperature (°C)	
	onset	Inflection point
Bentonite clay*	610.2	642.4
CCG	261.8	303.7
CCD20	253.2	292.5
C30B	229.7	264.8

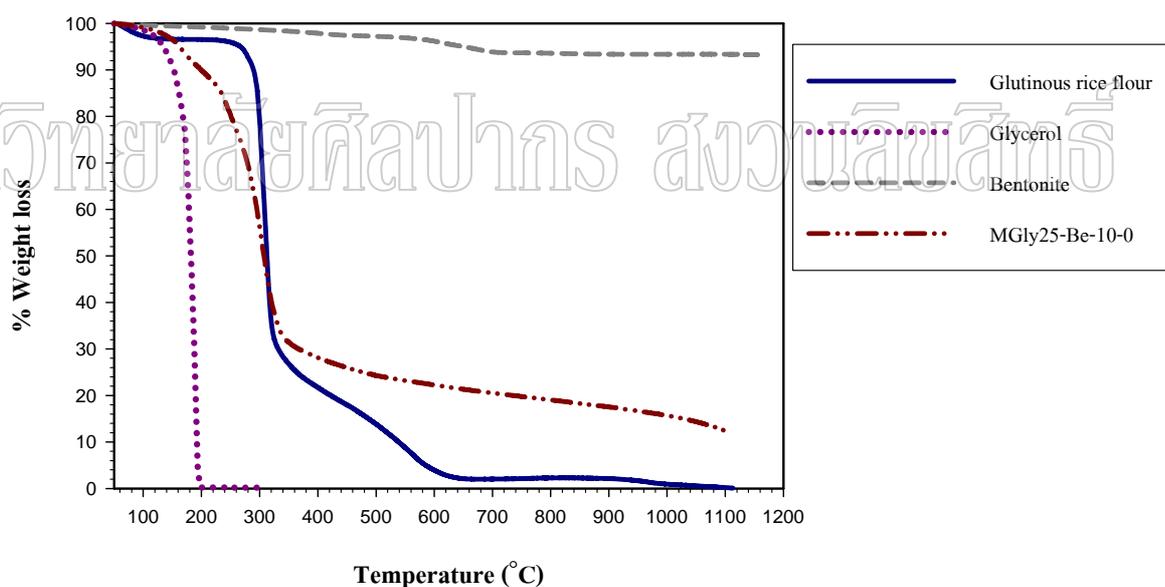
หมายเหตุ * พบการสลายตัวทางความร้อนเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 600-700 °C ทำให้เกิดการสลายตัวของ bentonite clay ประมาณ 5%

เมื่อพิจารณารูปที่ 46 และ ตารางที่ 22 พบว่า bentonite clay จะพบการสลายตัวทางความร้อนเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 600-700 °C ส่วน CCG, CCD20 และ C30B นั้นจะพบการสลายตัวของสาร modifier ที่อยู่ใน clay ทั้ง 3 ชนิดนี้คือ cationic glucose, cationic dextrin20 และ MT2EtOH ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ถึง 305 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาถึง

%weight loss จะพบว่า C30B จะมีการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ MT2EtOH ที่ใช้เป็นสาร modifier ใน C30B จะสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออน (Na^+) ในชั้น silicate ของ C30B และเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ C30B ได้ในปริมาณที่มากกว่า cationic glucose และ cationic dextrin20

3. การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม bentonite clay ลงในชิ้นงาน

จากการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม bentonite clay ลงในชิ้นงาน ในสัดส่วน 10% ด้วยเทคนิค TGA โดยให้ความร้อนจาก 50 องศาเซลเซียสถึง 1100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ได้ TGA thermogram แสดงดังรูปที่ 47



รูปที่ 47 TGA thermogram ของชิ้นงานสูตร MGly25-Be-10-0

ตารางที่ 23 อุณหภูมิ onset และ inflection point ของชิ้นงานสูตร MGly25-Be-10-0

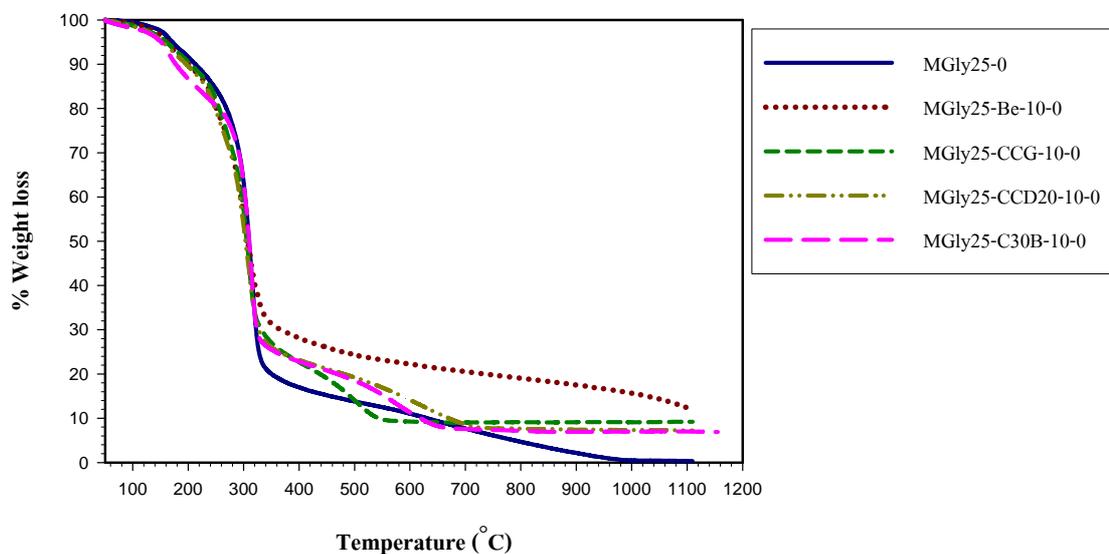
สารตัวอย่าง	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	
	onset	Inflection point
Glutinous rice flour	256.0	311.9
Glycerol (Gly)	172.4	190.9
Bentonite clay *	610.2	642.4
MGly25-Be-10-0	252.2	307.2

หมายเหตุ * พบการสลายตัวทางความร้อนเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 600-700 $^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดการสลายตัวของ bentonite clay ประมาณ 5%

เมื่อพิจารณารูปที่ 47 และ ตารางที่ 23 พบว่า ในช่วงแรกของ TGA thermogram จะพบการลดลงของน้ำหนักของชิ้นงาน MGly25-Be-10-0 เล็กน้อยเนื่องจากการสลายตัวของ glycerol ที่ผสมอยู่ในชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 175 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวแป้งข้าวเหนียวยังไม่เกิดการสลายตัว เมื่อถึงอุณหภูมิประมาณ 252.2 องศาเซลเซียส แป้งจะเริ่มเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว และพบว่าชิ้นงานจะมีน้ำหนักเหลืออยู่ประมาณ 10% ซึ่งเป็นน้ำหนักของ bentonite clay ที่เต็มลงไปและเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้น้อยมากนั่นเอง

4. การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปในชิ้นงาน

จากการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ คือ bentonite clay, CCG, CCD20 และ C30B ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค TGA โดยให้ความร้อนจาก 50 องศาเซลเซียสถึง 1100 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 $^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ได้ TGA thermogram แสดง ดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 TGA thermogram ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดย
น้ำหนัก

ตารางที่ 24 อุณหภูมิ onset และ inflection point ของชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ลง
ไปในชิ้นงาน

ชิ้นงานตัวอย่าง	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	
	onset	Inflection point
MGly25-0	284.5	316.4
MGly25-Be-10-0	252.2	307.2
MGly25-CCG-10-0	274.4	309.4
MGly25-CCD20-10-0	260.4	302.0
MGly25-C30B-10-0	275.7	314.2

เมื่อพิจารณารูปที่ 48 และ ตารางที่ 24 พบว่าในช่วงแรกของการให้ความร้อนของชิ้นงาน
ตัวอย่างทั้ง 5 สูตร จะพบการลดลงของน้ำหนักของชิ้นงานเล็กน้อย เนื่องจากการสลายตัวของ
glycerol ที่มีผสมอยู่ในชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 175 องศาเซลเซียส และจากค่าอุณหภูมิ onset จะ
พบว่าชิ้นงานที่มีการผสม clay ชนิด ต่าง ๆ ลงไปจะมีค่าอุณหภูมิ onset ที่น้อยกว่า กรณีที่ไม่มีการ

ผสม clay ทั้งนี้เพราะ clay เป็นสารที่มีความจุความร้อนสูง เมื่อขึ้นงาน TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ได้รับความร้อน การที่ clay จะมีอุณหภูมิสูงเท่า ๆ กับอุณหภูมิที่สูงขึ้นของแป้งข้าวเหนียวนั้น clay จำเป็นต้องได้รับความร้อนที่สูงมากกว่าแป้งข้าวเหนียว ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนไปสู่แป้งข้าวเหนียวที่อยู่รอบ ๆ clay ทำให้แป้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่ายเมื่อมี clay ผสมอยู่ด้วย และเมื่อพิจารณาน้ำหนักของสารที่เหลืออยู่หลังการทดสอบซึ่งเป็นน้ำหนักของ clay พบว่าขึ้นงานที่มีการผสม C30B จะมีน้ำหนักเหลืออยู่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ MT2EtOH ที่ใช้เป็นสาร modifier ใน C30B จะสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออน (Na^+) ในชั้น silicate ของ C30B และเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ C30B ได้ในปริมาณที่มากกว่า cationic glucose และ cationic dextrin²⁰ ทำให้เมื่อขึ้นงานเกิดการสลายตัวทางความร้อน น้ำหนักของสารที่เหลืออยู่หลังการทดสอบจึงเหลืออยู่น้อยที่สุด

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

สาร CHPTAC สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ glucose และ dextrin20 ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20 เมื่อนำ bentonite clay มาปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 เป็นสาร modifier พบว่า สาร modifier ทั้งสองชนิดสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมไอออน (Na^+) และแทรกตัวเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ bentonite clay ได้ แต่จะไม่ทำให้เกิดการขยายหรือแตกออกของชั้น silicate ของ bentonite clay

เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงาน thermoplastic starch (TPS) แบบ melt mixing ซึ่งเตรียมจากแป้งข้าวเหนียวผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนักเป็นพลาสติกไซเซออร์ จะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของ glycerol ที่ผสมลงไป 30% และ 35% โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาการเติม bentonite clay ลงใน TPS พบว่าการเติม bentonite clay ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนักนั้น TPS ที่ได้จะมีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของ bentonite clay ที่เติมลงไป 1%, 2%, 5% และ 7% โดยน้ำหนัก และมากกว่า TPS ที่ไม่ได้มีการเติม bentonite clay และจากการผสม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก ลงใน TPS พบว่า TPS ที่มีการเติม C30B จะทำให้ TPS มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ TPS ที่มีการเติม bentonite clay, CCG และ CCD20 และเมื่อพิจารณา TPS ที่มีการผสม clay ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติแล้วคือ CCG, CCD20 และ C30B จะพบว่า C30B จะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ clay กับเฟสของ TPS มากที่สุด รองลงมาคือ CCD20 และ CCG ตามลำดับ เนื่องจากผลของขนาดและความยาวของสายโซ่โมเลกุลของสาร modifier และพบว่าการผสมขึ้นรูป TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนักแบบ solution mixing จะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ clay กับเฟสของ TPS มากกว่าการขึ้นรูป TPS แบบ melt mixing

ในการทดสอบการดูดความชื้น โดยการเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 53% พบว่าเมื่อเก็บชิ้นงานนานขึ้นค่าความทนทานต่อการดึงยึดของชิ้นงาน TPS จะมีค่าลดลง แต่ความทนทานต่อแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้น และความชื้นที่ถูกดูดเข้าไปในชิ้นงาน

TPS ที่มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ จะสามารถเข้าไปปรับกระบวนการทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงของ clay ได้ และเมื่อพิจารณา % moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS พบว่า TPS ที่มีการผสม glycerol ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก จะมี %moisture adsorption น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของ glycerol ที่ผสมลงไป 30% และ 35% โดยน้ำหนัก และสัดส่วน และชนิดของ clay ที่ผสมลงใน TPS จะไม่แสดงผลที่เด่นชัดต่อ %moisture adsorption ของชิ้นงาน TPS

ในการทดสอบการสลายตัวทางความร้อน พบว่าเมื่อชิ้นงาน TPS มีการเติม clay ชนิดต่าง ๆ ลงไปจะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่ได้มีการเติม clay ลงไป

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1. ควรมีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งที่ใช้ในการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ให้มีการดูดความชื้นน้อยลงหรือไม่มีการดูดความชื้นเลย โดยการกำจัดหรือเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแป้งที่มีความว่องไวต่อความชื้นสูง
2. ควรมีการเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่น ๆ ที่มีราคาถูกกว่า และสามารถสัมผัสกับอาหารได้ เช่นเดียวกับ glycerol เช่น น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น
3. ควรมีการเลือกใช้สาร modifier ชนิดอื่นๆ ในการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้สาร modifier ที่มีขนาดของสายโซ่โมเลกุลที่ยาวขึ้น เพราะเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ bentonite clay ได้จะเพิ่มโอกาสในการทำให้ชั้น silicate ของ bentonite clay เกิดการขยายหรือแตกออกมากขึ้น เมื่อนำไปผสมกับ TPS จะมีโอกาสเกิด composite แบบ intercalated nanocomposite และ exfoliated nanocomposite มากขึ้น ส่งผลให้ความเข้ากันได้ของเฟส clay กับเฟสของ TPS มีมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ก่อฉัตรรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, เทคโนโลยีของแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.2543, หน้า 15-39.
- [2] Rodriguez-Gonzalez,F.J.,Ramsay, B.A.,Favis, B.D. “High performance LDPE thermoplastic starch blends:asustainable alternative to pure polyethylene.” Polymer 2003, 44 (2003) :1517-1526.
- [3] Pirkko M. Forssell, Jaana M. Mikkila, Graham K. Moates and Roger Parker. “Phase and glass transition behaviour of concentrated barley starch-glycerol-water mixtures, a model for thermoplastic starch.” Carbohydrate polymer 1997, 34 (1997) : 275-282.
- [4] X. F. Ma, J.G. Yu and Y.B. Ma. “Urea and formamide as amixed plasticizer for thermoplastic wheat flour.” Carbohydrate polymer 2005, 60 (2005) : 111-116.
- [5] F.J. Rodriguez. B.A. Ransay and B.D. Favis. “Rheological and thermal properties of thermoplastic starch with high glycerol content.” Carbohydrate polymer 2004, 58 (2004) :139-147.
- [6] Carvalho, A.J.F., Curvelo, A.A.S.,Gandini,A. “Surface chemical modification of thermoplastic starch: reactions with isocyanates, epoxy function and stearyl chloride.” Industrial Crops and Products. Article in press 2004.
- [7] Mingfu Huang, Jiugao Yu and Xiafei Ma. “Ethanalamine as a novel plasticizer for thermoplastic starch.” Polymer degradation and stability 2005, 90(2005) :501-507.
- [8] Xiaofei Ma and Jiugao Yu. “The plasticizers containing amide groups for thermoplastic starch.” Carbohydrate polymer 2004, 57 (2004) :197-203.
- [9] Environmental health criteria, Geneva. “Bentonite, kaolin, and selected clay minerals.” World health organization 2005 : 1-192.
- [10] Ray, Suprakas Sinha, Okamoto, Masami. “Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing.” Polymer engineering and science 2003, 38 (2003) : 1351-1358.
- [11] ส่วนประกอบของแป้ง, <http://en.wikipedia.org/wiki/Glucose> วันที่สืบค้น 28 สิงหาคม 2549 เวลา 19.33 น.

- [12] ส่วนประกอบของแป้ง, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dextrin20> วันที่สืบค้น 28 สิงหาคม 2549 เวลา 19.33 น.
- [13] S. Pal, D. Mal, R.P. Singh. "Cationic starch : an effective flocculating agent." Carbohydrate polymer 2005, 59 (2005) : 417-423.
- [14] S. Limpanart, S. Khunthon, P. Teapaiboon, P. Supaphol. "Effect of surfactant coverage on the preparation of polystyrene-clay nanocomposites prepared by melt intercalation." Matterial letters 2005, 59 (2005) : 2292-2295.
- [15] A. J. F. de Carvalho , A. A. S. Curvelo , J. A. M. Agnelli. "A first insight on composites of thermoplastic starch and kaolin." Polymer 2002, 45 (2002) : 189-194.
- [16] Ming-Fu Huang, Jiu-Gao Yu, Xiao-Fei Ma. "Studies on the properties of Montmorillonite-reinforced thermoplastic starch composites." Polymer 2004, 45 (2004) : 7017-7023.
- [17] Ming-Fu Huang, Jiu-Gao Yu, Xiao-Fei Ma and Peng Jin. "High performance biodegradable thermoplastic starch-EMMT nanoplastics." Polymer 2005, 46 (2005) : 3157-3162.
- [18] L. Godbillot, P. Dole, C. Joly, B. Roge and M. Mathlouthi. "Analysis of water binding in starch plastized films." Food Chemistry 2006, 96 (2006) : 380-386.
- [19] Sinha Ray S, Yamada K, Okamoto M. and Ueda K. "New polylactide/layered silicate nanocomposite ." Novel Lett 2002, 2 (2002) : 1093-1096.

ภาคผนวก
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ภาคผนวก ก

การคำนวณต่าง ๆ และน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การคำนวณต่าง ๆ

วิธีการคำนวณหาปริมาณ CHPTAC ที่ใช้ในการสังเคราะห์ cationic glucose และ cationic dextrin20

1. Cationic glucose

1 mol ของ glucose มีน้ำหนักโมเลกุล 180.16 g

1 mol ของ CHPTAC มีน้ำหนักโมเลกุล 188.10 g

กำหนดให้ใช้อัตราส่วน 1 mol glucose : 1 mol CHPTAC

เพราะฉะนั้น 1 mol glucose = 1 mol CHPTAC

$$180.16 \text{ g} = 188.10 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าใช้ปริมาณ glucose เท่ากับ 1.5 g จะใช้ CHPTAC เท่ากับ } \frac{1.5 \times 188.10}{180.10} = 1.57 \text{ g}$$

จาก density ของ CHPTAC = 1.16 g/ml

$$\text{เพราะฉะนั้น CHPTAC 1.57 g จะมีปริมาตรเท่ากับ } \frac{1.57}{1.16} = 1.35 \text{ ml}$$

2. Cationic dextrin20

จาก dextrin20 มีค่า DE เท่ากับ 20

$$\text{จากสูตร } DE = \frac{100}{DP}$$

เพราะฉะนั้น dextrin20 มีค่า DP = 100/20 = 5

จาก 1 AGU มีน้ำหนัก 162 g

เพราะฉะนั้นน้ำหนักโมเลกุล 1 mol ของ dextrin 20 จะเท่ากับ 5 x 162 = 810.0 g

1 mol ของ CHPTAC มีน้ำหนักโมเลกุล 188.10 g

กำหนดให้ใช้อัตราส่วน 1 mol dextrin20 : 1 mol CHPTAC

เพราะฉะนั้น 1 mol dextrin20 = 1 mol CHPTAC

$$810 \text{ g} = 188.10 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าใช้ปริมาณ Dextrin20 เท่ากับ 1.5 g จะใช้ CHPTAC เท่ากับ } \frac{1.5 \times 188.10}{810.0} = 0.348 \text{ g}$$

จาก density ของ CHPTAC = 1.16 g/ml

$$\text{เพราะฉะนั้น CHPTAC 0.348 g จะมีปริมาตรเท่ากับ } \frac{0.348}{1.16} = 0.30 \text{ ml}$$

การคำนวณหาปริมาณของ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลาย

1. หลักการหาปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) โดยวิธีของ Mohr

การหาปริมาณคลอไรด์ไอออนโดยวิธีของ Mohr อาศัยหลักการของการเกิดตะกอนที่มีสีในการหาจุดยุติของการไตเตรต วิธีการนี้นิยมใช้ในการหาปริมาณคลอไรด์คลอไรด์ (Cl⁻) และโบรมไนด์ (Br⁻) โดยการไตเตรตกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃) โดยมีโครเมต (CrO₄²⁻) เป็นอินดิเคเตอร์ที่จุดยุติจะเห็นตะกอนสีแดงอิฐของซิลเวอร์โครเมต (Ag₂CrO₄) ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนเนื่องจากตะกอน Ag₂CrO₄ นี้จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อคลอไรด์ในสารละลายตกตะกอนไปเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) จะหมดโดยอาศัยความสามารถในการละลาย (Solubility) ของตะกอนทั้งสองที่แตกต่างกัน ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมความเข้มข้นของ CrO₄²⁻ ได้ก็จะสามารถห้วงเหนี่ยวการเกิดตะกอน Ag₂CrO₄ ไว้จนกว่า AgCl จะตกตะกอนออกมาจนหมด ทำให้สามารถหาจุดยุติของการไตเตรตได้

ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องคือ



วิธีของ Mohr นี้สารละลายควรมีสภาพเป็นกลางหรือเบสเล็กน้อย ดังนั้นในการไตเตรตสารละลายควรมี pH ประมาณ 7-10

ตารางที่ 25 ปริมาณของ 0.1M AgNO₃ ที่ใช้ในการไตเตรตหาปริมาณคลอไรด์ (Cl⁻) ในสารละลาย ตัวอย่าง

สารละลาย	ปริมาณ 0.1M AgNO ₃ (ml)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
CHPTAC (Pure)	41.2	41.3	41.1	41.3	41.1	41.20
Cationic glucose	17.9	17.9	18.0	17.7	17.7	17.84
Cationic dextrin20	9.8	9.7	9.7	10.0	9.9	9.82

2. การหาปริมาณของ CHPTAC ในสารละลาย

ค่าปริมาตรของ 0.1M AgNO₃ เฉลี่ยจากการไตเตรต = 41.20 ml

จะมีปริมาณ 0.1M AgNO₃ = 0.1 M x 41.20 ml = 4.120 mmol

จาก 1 mol Ag⁺ จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ 1 mol Cl⁻

ดังนั้นจะมีปริมาณ Cl⁻ = 4.120 mmol

เพราะฉะนั้นใน 1 ml ของ CHPTAC จะมีปริมาณ = 4.120 mmol

ในการสังเคราะห์ cationic glucose ใช้ CHPTAC = 1.35 ml

จะมี CHPTAC = 1.35 x 4.120 = 5.562 mmol

ในการสังเคราะห์ cationic dextrin20 ใช้ CHPTAC = 0.30 ml

จะมี CHPTAC = 0.30 x 4.120 = 1.236 mmol

3. การหาปริมาณของ cationic glucose ในสารละลาย

ค่าปริมาตรของ 0.1M AgNO₃ เฉลี่ยจากการไตเตรต = 17.84 ml

จะมีปริมาณ 0.1M AgNO₃ = 0.1M x 17.84 ml = 1.784 mmol

จาก 1 mol Ag⁺ จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ 1 mol Cl⁻

ดังนั้นจะมีปริมาณ Cl⁻ = 1.784 mmol

สารละลาย cationic glucose ปริมาตร 5 ml มีปริมาณ Cl⁻ = 1.784 mmol

ถ้าสารละลาย cationic glucose ทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้ 31.0 ml จะมีปริมาณ Cl⁻ = $\frac{31.0 \times 1.784}{5} =$

11.0608 mmol

ปริมาตรของ 1M HCl ที่ใช้ในการหยุดปฏิกิริยา = 0.40 ml

จะมีปริมาณ Cl⁻ = 1M x 0.40 ml = 0.40 mmol

ดังนั้นจะมีปริมาณ Cl⁻ ทั้งหมดก่อนทำปฏิกิริยา = 5.562 + 0.40 = 5.962 mmol

ปริมาณ Cl⁻ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา = 11.0608 - 5.962 = 5.0988 mmol

เพราะฉะนั้น ปริมาณ cationic glucose ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลาย = 5.0988 mmol

% ของ CHPTAC ที่เข้าทำปฏิกิริยา $\frac{5.0988 \times 100}{5.562} = 91.6721\%$

4. การหาปริมาณของ cationic dextrin20 ในสารละลาย

ค่าปริมาตรของ 0.1M AgNO₃ เฉลี่ยจากการไตเตรต = 9.82 ml

จะมีปริมาณ 0.1M AgNO₃ = 0.1M x 9.82 ml = 0.982 mmol

จาก 1 mol Ag⁺ จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ 1 mol Cl⁻

ดังนั้นจะมีปริมาณ Cl⁻ = 0.982 mmol

สารละลาย cationic dextrin20 ปริมาตร 5 ml มีปริมาณ Cl⁻ = 0.982 mmol

ถ้าสารละลาย cationic dextrin20 ทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้ 29.5 ml จะมีปริมาณ Cl⁻ = $\frac{29.5 \times 0.982}{5} =$

5.7938 mmol

ปริมาตรของ 1M HCl ที่ใช้ในการหยุดปฏิกิริยา = 3.40 ml

จะมีปริมาณ Cl⁻ = 1M x 3.40 ml = 3.40 mmol

ดังนั้นจะมีปริมาณ Cl⁻ ทั้งหมดก่อนทำปฏิกิริยา = 1.236 + 3.40 = 4.636 mmol

ปริมาณ Cl⁻ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา = 5.7938 - 4.636 = 1.1578 mmol

เพราะฉะนั้น ปริมาณ cationic glucose ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลาย = 1.1578 mmol

% ของ CHPTAC ที่เข้าทำปฏิกิริยา $\frac{1.1578 \times 100}{1.236} = 93.6731\%$

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

การคำนวณหาปริมาณของ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่ใช้เป็นสาร modifier ในการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay

ในการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay โดยใช้ cationic glucose และ cationic dextrin20 ที่สังเคราะห์ได้เป็น modifier โดยทำให้โมเลกุลของ modifier เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโซเดียมไอออนในชั้น silicate ของ clay และโมเลกุลของ modifier สามารถเข้าไปอยู่ในชั้น silicate ของ clay ได้นั้น จะต้องใช้ปริมาณสาร modifier เท่ากับ 10 mmol

1. การคำนวณหาปริมาณ cationic glucose

Cationic glucose ปริมาณ 5.0988 mmol จะอยู่ในสารละลาย cationic glucose ปริมาตร 31.0 ml

ถ้าใช้สาร cationic glucose ปริมาณ 10.0 mmol จะอยู่ในสารละลาย cationic glucose ปริมาตร

$$\frac{10.0 \times 31.0}{5.0988} = 60.80 \text{ ml}$$

จะต้องใช้สารละลาย cationic glucose ปริมาตร 60.80 ml ในการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay

2. การคำนวณหาปริมาณ cationic dextrin20

cationic dextrin20 ปริมาณ 1.1578 mmol จะอยู่ในสารละลาย cationic dextrin20 ปริมาตร 29.5 ml

ถ้าใช้สาร cationic dextrin20 ปริมาณ 10.0 mmol จะอยู่ในสารละลาย cationic dextrin20 ปริมาตร

$$\frac{10.0 \times 29.5}{1.1578} = 254.80 \text{ ml}$$

จะต้องใช้สารละลาย cationic dextrin20 ปริมาตร 254.80 ml ในการปรับปรุงคุณสมบัติของ bentonite clay

น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS

ตารางที่ 26 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว glycerol และ clay ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 3

สูตร	Clay's types	ปริมาณ clay (% w/w)	ปริมาณ glycerol (%w/w)	น้ำหนักที่ใช้		
				แป้ง	glycerol	clay
SGly25-Be-10	Bentonite	10	25	2.00	0.77	0.31
SGly25-CCG-10	CCG	10	25	2.00	0.77	0.31
Sgly25-CCD20-10	CCD20	10	25	2.00	0.77	0.31
SGly25-C30B-10	Cloisite30B	10	25	2.00	0.77	0.31

ตารางที่ 27 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวและ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 4

สูตร	ชนิดแป้ง	ปริมาณกลีเซอรอล (%w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)	
			แป้ง	กลีเซอรอล
MGly25	Glutinous Rice Flour	25	225	75
MGly30	Glutinous Rice Flour	30	210	90
MGly35	Glutinous Rice Flour	35	195	105

ตารางที่ 28 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว bentonite clay และ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 5

สูตร	ปริมาณ bentonite clay (%w/w)	ปริมาณ กลีเซอรอล (%w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)		
			แป้ง	กลีเซอรอล	bentonite clay
MGly25-Be-1	1	25	222.00	75.00	3.00
MGly25-Be-2	2	25	219.00	75.00	6.00
MGly25-Be-5	5	25	210.00	75.00	15.00
MGly25-Be-7	7	25	204.00	75.00	21.00
MGly25-Be-10	10	25	195.00	75.00	30.00

ตารางที่ 29 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว clay ชนิดต่าง ๆ และ glycerol ที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS ตอนที่ 5

สูตร	% Clay	Clay's types	ปริมาณ กลีเซอรอล (%w/w)	น้ำหนักที่ใช้ (g)		
				แป้ง	กลีเซอรอล	Clay
MGly25	0	-	25	225.00	75.00	0
MGly25-Be-2	2	Be	25	219.00	75.00	6.00
MGly25-CCG-2	2	CCG	25	219.00	75.00	6.00
MGly25-CCD20-2	2	CCD20	25	219.00	75.00	6.00
MGly25-C30B-2	2	C30B	25	219.00	75.00	6.00
MGly25-Be-10	10	Be	25	195.00	75.00	30.00
MGly25-CCG-10	10	CCG	25	195.00	75.00	30.00
MGly25-CCD20-10	10	CCD20	25	195.00	75.00	30.00
MGly25-C30B-10	10	C30B	25	195.00	75.00	30.00

ภาคผนวก ข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สงวนลิขสิทธิ์

การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Testing)

1. Tensile Testing

การทดสอบสมบัติด้านการดึงยึดของพอลิเมอร์เป็นการทดสอบเชิงกลพื้นฐาน เพื่อใช้ในการหาสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ เช่น modulus, tensile strength at yield, elongation at yield, maximum tensile strength , elongation at break รวมถึงลักษณะการดึงยึดของพอลิเมอร์ (hard, tough, brittle, soft) ในการทดสอบจะใช้เครื่อง universal testing machine โดยการนำชิ้นตัวอย่างไปตัดตามรูปแบบที่จะทดสอบ แล้ววัดขนาดพื้นที่หน้าตัดก่อนนำไปทดสอบ ผลการทดลองจะได้เป็น stress-strain curve ซึ่งสามารถนำไปหาค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ได้

2. Impact Testing

การทดสอบสมบัติด้านการรับแรงกระแทก เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลภายใต้อัตราเร็วในการเสียรูปที่สูงมากซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์มีพฤติกรรมแบบ brittle มากกว่าการทดสอบภายใต้อัตราเร็วในการเสียรูปต่ำ ๆ การทดสอบด้านการรับแรงกระแทกที่นิยมใช้จะเป็นแบบ pendulum impact test ซึ่งจะใช้การปล่อยลูกตุ้มตามแรงโน้มถ่วงของโลกให้ตกลงมากระทบชิ้นตัวอย่าง การทดสอบแบบนี้ยังแยกเป็น 2 วิธี คือ izod impact test และ charpy impact test ในการทดสอบแบบ izod ชิ้นตัวอย่างชิ้นตัวอย่างจะถูกยึดที่ปลายด้านหนึ่ง ลูกตุ้มจะตกกระทบที่ปลายอีกด้านหนึ่ง โดยชิ้นตัวอย่างจะถูกบากในด้านที่ลูกตุ้มตกกระทบด้วย ส่วนการทดสอบแบบ charpy ชิ้นตัวอย่างจะถูกยึดที่ปลายทั้งสองข้าง ลูกตุ้มจะตกกระทบตรงกลางของชิ้นตัวอย่างซึ่งมีรอยบากอยู่ด้านหลัง impact test จึงเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลที่สำคัญในสถานะที่ชิ้นงานมีการเสียรูป (deformation) ที่อัตราเร็วสูง ๆ

การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal Analysis)

Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นวิธีการศึกษาสมบัติทางความร้อนที่ง่ายและเก่าที่สุด เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) ของพอลิเมอร์โดยจะทำการวัดน้ำหนักชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิด้วยอัตราเร็วที่คงเอาไว้แล้วแสดงเป็นกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา เทคนิคนี้มีประโยชน์อย่างมากในการใช้หาอุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature และ degradation temperature) รวมไปถึง

การใช้หาอุณหภูมิการสลายตัวและวิเคราะห์เชิงปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในชั้นตัวอย่างได้ด้วย เช่น ใช้ในการหาปริมาณความชื้น, plasticizer และ solvent ซึ่งใช้หาสมบัติด้าน sorption และ desorption ของพอลิเมอร์ได้

การวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้น silicate ของ clay ชนิดต่างๆด้วยเทคนิค XRD

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg

เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่คอยเสริมเทคนิค Spectroscopic อื่น ๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร

1. ความเป็นมา

โครงสร้างผลึกโปรตีนชนิดแรกที่ใช้เทคนิค XRD ในการตรวจวัด คือ สเปิร์มของปลาวาฬ (myoglobin) ซึ่งถูกค้นพบโดย Max Perutz และ Sir John Cowdery Kendrew เมื่อปี ค.ศ. 1958 ทำให้พวกเขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมี การวิเคราะห์ myoglobin ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้ได้รับการกระตุ้นจากการสังเกตเห็นผลึกของ myoglobin ในคราบเลือดที่แห้งกรังบนดาบฟ้าของเรื่อล่าปลาวาฬ การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยรังสีเอ็กซ์สามารถแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของดีเอ็นเอมีลักษณะเป็นเกลียวคู่ นอกจากนี้ ในปัจจุบันเทคนิคนี้ยังได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์การออกฤทธิ์ของยา เช่น ยาต้านมะเร็ง ว่ามีกลไกการทำงานต่อโมเลกุลเป้าหมายได้อย่างไร

2. หลักการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

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

โดยที่

$$n = 1, 2, 3, \dots,$$

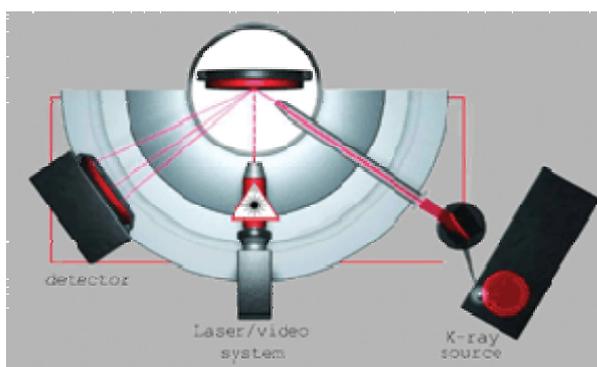
λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้จะไปลด radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการเคลื่อนไหวของอนุภาคภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่าง ๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละ peak ที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด

ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงกลอย่างมากมาย



รูปที่ 49 แสดงแผนภาพการทำงานของ XRD

3. เทคนิค

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่

3.1 Single-Crystal Methods

โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น (Laue method) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุนและอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม θ โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมและจัดการข้อมูล ซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

3.2 Powder Methods

เบื้องต้นแล้ววิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-Crystal Methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

3.3 X-ray Powder Diffractometer

แหล่งกำเนิดและเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ในปัจจุบันนี้มีข้อจำกัดที่สามารถตรวจวัดได้เฉพาะความเข้มของโฟตอนที่เกิดการเลี้ยวเบนเท่านั้น ไม่รวมเฟสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของข้อมูลรูปร่างที่แท้จริงของความหนาแน่นอิเล็กตรอน ซึ่งการทำงานร่วมกันของเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้

นอกจากที่จะสามารถแยกแยะธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างแล้วนั้น X-ray Powder Diffractometer (XPRD) ถือเป็นวิธีการเดียวที่สามารถแยกแยะความแตกต่างของเฟสของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในตัวอย่างได้จึงเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพ

4. การทำงานของ XRPD

เทคนิค X-ray Powder Diffractometry นั้นจะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวฉายลงบนตัวอย่างที่ถูกวางอยู่บนแท่นหมุนเป็นมุม $\theta = 0-90^\circ$ รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแล้วบันทึกบน inked strip chart เครื่องตรวจวัดจะหมุนไปพร้อม ๆ กับแท่นหมุน แต่จะหมุนเป็นมุม 2θ และ strip chart จะหมุนไปพร้อมกับแท่นหมุนและเครื่องตรวจวัดด้วยความเร็วคงที่ เพื่อบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เครื่องตรวจวัดวัดได้ แล้วนำมาพล็อตกราฟ diffractogram ซึ่งประกอบด้วยพีคต่างๆ โดยที่พีคแต่ละพีคจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg จะสามารถหาค่า d ของแต่ละพีคแล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เป็นต้น ก็จะสามารถหาปริมาณสัมพันธ์ของเฟสที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้

5. ข้อดีและข้อจำกัด

เทคนิค XRPD นั้นเป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงาน สามารถใช้งานได้ง่าย ใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2 มิลลิกรัม) แต่เดิมนั้นแม้ว่าเทคนิคนี้จะมีข้อดีหลายอย่าง แต่ด้วยผลข้อมูลที่ช้าและในการใช้งานจำเป็นต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ทำให้เทคนิคนี้ยังไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายมากนัก

แต่อย่างไรก็ตาม ใน 2-3 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาด้านการออกแบบเครื่องมือให้ได้ผลข้อมูลที่รวดเร็วขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น และด้วยเทคโนโลยีทางด้าน Solid-state ทำให้เครื่องตรวจวัดไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก ทำให้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น ตั้งแต่การใช้งานในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย บริษัท การควบคุมขั้นตอนการผลิต รวมไปถึงช่วยให้ผู้ผลิตต่าง ๆ ได้รับความรู้ความเข้าใจในกระบวนการผลิตมากขึ้น

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ที่อยู่	นายรัฐพร สุรพัฒน์ 22/11 ถ.เทศบาล 5 ต. ตลาดหลวง อ.เมือง จ.อ่างทอง 14000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2546	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ จาก มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม
พ.ศ. 2547	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์