



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง ผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด

Effect of Plasticizer on Physical and Mechanical Properties of Cellulose Ester Films from Rice Straw and Corn Husk

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย

ประจำปี 2558

จำนวน 216,000 บาท

หัวหน้าโครงการ

นางสาวอรรัตน์ รัตนกำนวล

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

30 / กันยายน / 2559

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของพลาสติกไซเซอร်ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด (Effect of Plasticizer on Physical and Mechanical Properties of Cellulose Ester Films from Rice Straw and Corn Husk) ได้สำเร็จดั่งนี้ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอและสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่ และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	๗
สารบัญภาพ	๙
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	23
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	31
สรุปผลการวิจัย	71
เอกสารอ้างอิง	74

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 23
ตารางที่ 2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆของเซลลูโลส และเซลลูโลสคัดแปร 24
ตารางที่ 3	น้ำหนักเปลือกข้าวโพดแห้ง น้ำหนักผงเซลลูโลสที่สกัดได้ และปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในเปลือกข้าวโพด 32
ตารางที่ 4	น้ำหนักของเซลลูโลสก่อนและหลังคัดแปรและร้อยละน้ำหนักเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น 34
ตารางที่ 5	ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของเซลลูโลส จากเปลือกข้าวโพดก่อนคัดแปรและหลังคัดแปร 35
ตารางที่ 6	ความสามารถในการละลายของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด และเซลลูโลสภายหลังคัดแปรในทำตัวละลายชนิดต่างๆ 39
ตารางที่ 7	ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม 46
ตารางที่ 8	ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสชนิดไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ 51
ตารางที่ 9	ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 1 %w 51
ตารางที่ 10	ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 2 %w 52
ตารางที่ 11	ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 4 %w 52
ตารางที่ 12	ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 6 %w 53
ตารางที่ 13	ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 8 %w 53
ตารางที่ 14	ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 10 %w 54
ตารางที่ 15	ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไดบิวทิลพทาเลต 1 %w 54

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 16 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไดบิวทิลพทาเลต 2 %w	55
ตารางที่ 17 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไดบิวทิลพทาเลต 4 %w	55
ตารางที่ 18 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไดบิวทิลพทาเลต 6 %w	56
ตารางที่ 19 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไดบิวทิลพทาเลต 8 %w	56
ตารางที่ 20 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไดบิวทิลพทาเลต 10 %w	57
ตารางที่ 21 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 1 %w	57
ตารางที่ 22 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 2 %w	58
ตารางที่ 23 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 4 %w	58
ตารางที่ 24 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 6 %w	59
ตารางที่ 25 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 8 %w	59
ตารางที่ 26 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และมอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 10 %w	60
ตารางที่ 27 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเมื่อน้ำหนักเซลลูโลสหายไปร้อยละ 5 (Td5) ของฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรและฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลไดบิวทิลพทาเลต (DBP) และไตรเอทิลซิเตรต (TEC) เป็นพลาสติกไซเซอรที่ความเข้มข้นต่างๆ	66

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส	9
ภาพที่ 2 พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส	9
ภาพที่ 3 การทำงานของพลาสติกไซเซอร์ที่เปรียบเสมือนสารหล่อลื่น	12
ภาพที่ 4 การทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์	12
ภาพที่ 5 โครงสร้างของ PVC ทั้งในกรณีที่ใส่และไม่ใส่พลาสติกไซเซอร์	12
ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร์ชนิดพทาเลตเอสเทอร์	14
ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร์ชนิดไตรเมทิลเทตเอสเทอร์	15
ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร์ชนิดอะลิฟาทิกไดคาร์บอซิลิกแอซิดเอสเทอร์	16
ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร์ชนิดฟอสเฟตเอสเทอร์	16
ภาพที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล	18
ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของไตรเอทิลซิเตรต	18
ภาพที่ 12 โครงสร้างทางเคมีของไดบิวทิลพทาเลต	19
ภาพที่ 13 ลักษณะใบของข้าวโพด	20
ภาพที่ 14 การต้มเปลือกข้าวโพดด้วยน้ำกลั่น	25
ภาพที่ 15 การทำเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	25
ภาพที่ 16 การฟอกขาวเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วย 5% v/v H ₂ O ₂ ใน 0.5 M NaOH	26
ภาพที่ 17 การย่อยเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	26
ภาพที่ 18 ผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด	27
ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทดลองโดยรวมของการเตรียมฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรจากเปลือกข้าวโพด	28
ภาพที่ 20 ปฏิกริยาเอสเทอริฟิเคชันของเซลลูโลส	33
ภาพที่ 21 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซลลูโลสก่อนการดัดแปรเปรียบเทียบกับเซลลูโลสภายหลังการดัดแปร	36
ภาพที่ 22 ลักษณะผงเซลลูโลสที่สกัดได้จากเปลือกข้าวโพดเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าก่อนการดัดแปร และหลังการดัดแปร	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 23 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงเซลล์โลสที่สกัดได้จาก เปลือกข้าวโพดโดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning Electron Microscopy) ก่อนการตัดแปรและภายหลังการตัดแปร	38
ภาพที่ 24 เทอร์โมแกรมอุณหภูมิการสลายตัวของผงเซลล์โลสจากเปลือกข้าวโพด ก่อนตัดแปรและหลังตัดแปร	41
ภาพที่ 25 DSC เทอร์โมแกรมของผงเซลล์โลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนและหลังตัดแปร	42
ภาพที่ 26 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	43
ภาพที่ 27 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรที่ใช้กลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์	44
ภาพที่ 28 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรที่ใช้ไดบิวทิลพทาเลต เป็นพลาสติกไซเซอร์	44
ภาพที่ 29 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรที่ใช้ไตรเอทิลซิเตรต เป็นพลาสติกไซเซอร์	45
ภาพที่ 30 ฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรจากเปลือกข้าวโพดขนาด 7.50 x 0.80 เซนติเมตร	46
ภาพที่ 31 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จาก เปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และที่เติมพลาสติกไซเซอร์ที่ชนิด และปริมาณต่างๆ	60
ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จาก เปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และที่เติมพลาสติกไซเซอร์ที่ชนิด และปริมาณต่างๆ	62
ภาพที่ 33 กราฟเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จาก เปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และที่เติมพลาสติกไซเซอร์ที่ชนิด และปริมาณต่างๆ	64
ภาพที่ 34 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพด ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ ชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบ กับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 35	TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพด ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ ชนิดไดบิวทิลพทาเลตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบ กับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	66
ภาพที่ 36	TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพด ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ ชนิดไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบ กับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	67
ภาพที่ 37	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	69
ภาพที่ 38	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไดบิวทิลพทาเลตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	70
ภาพที่ 39	DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	70

ผลของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลส

เอสเทอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด

Effect of Plasticizer on Physical and Mechanical

Properties of Cellulose Ester Films from Rice Straw and Corn husk

อุษารัตน์ รัตนกำนวน

Usarat Ratanakamnuan

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสตัดแปะที่เตรียมได้จากเปลือกข้าวโพด ทำการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดด้วยกระบวนการกำจัดลิกนิน กระบวนการฟอกขาวและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตามลำดับ หลังจากนั้นทำการตัดแปะโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่เตรียมได้ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ลอโรอิลคลอไรด์เป็นสารตัดแปะ ใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลายและไพรีดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้สภาวะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 80°C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน คือตำแหน่งหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ในหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ที่ตำแหน่ง 1753 cm^{-1} และหมู่เมทิล (C-H stretching) ที่ตำแหน่ง 2927 cm^{-1} และ 2855 cm^{-1} ตามลำดับ แล้วจึงทำการขึ้นรูปฟิล์มเซลลูโลสตัดแปะด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม เติมพลาสติกไซเซออร์ 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนักของผงเซลลูโลสเอสเทอร์ตามลำดับ ผลของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส พบว่าฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 219°C ส่วนฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ ยกเว้นฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลพลาสติกไซเซออร์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก และสำหรับสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์มีค่าความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซออร์ ในขณะที่ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอลร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ : เซลลูโลส เซลลูโลสเอสเทอร์ เปลือกข้าวโพด เอสเทอร์ฟิเคชัน พลาสติกไซเซออร์

Abstract

In this work, the effects of plasticizers on mechanical properties of cellulose ester films from corn husk were studied. Corn husk cellulose extraction was performed by delignification, bleaching and hydrolysis, respectively. After that, the esterification of corn husk cellulose powder was carried out by using lauroyl chloride as an esterifying agent, toluene as a solvent medium, and pyridine as a catalyst under an optimum condition of 80°C for 12 hours. The results from FTIR spectra provide evidences of cellulose esterification by the presence of important ester carbonyl band (C=O) at 1753 cm^{-1} and the methyl band (C-H stretching) at 2927 cm^{-1} and 2855 cm^{-1} , respectively. After that, modified cellulose film was prepared by solvent casting using chloroform as a solvent. Three types of plasticizers i.e. glycerol, dibutyl phthalate and triethyl citrate were used as additives of cellulose film at concentrations of 1%, 2%, 4%, 6%, 8% and 10%wt of dry cellulose ester powder, respectively. The effects of plasticizer on thermal properties of cellulose ester films were studied by TGA. The degradation temperature (T_d) of cellulose ester film was observed at 219°C while the plasticized cellulose ester film showed the lower T_d . The corn husk cellulose film plasticized with 1-2 % w/w glycerol showed greater than T_d of cellulose ester film. Mechanical properties of cellulose ester film were investigated. The results showed that, tensile strength and Young's modulus of plasticized cellulose films decreased with increasing plasticizer content, while % elongation at break was improved with adding 1-2 %wt of glycerol.

Key word: Cellulose, cellulose ester, corn husk, esterification, plasticizer

คำนำ

พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทและเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์เราเนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกที่เป็นประโยชน์ต่อการใช้งาน เช่น มีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรง อีกทั้งพลาสติกยังมีราคาถูก ทำให้พลาสติกเป็นที่นิยมมากทั้งในงานที่ต้องการความทนทาน งานบรรจุภัณฑ์หรือผลิตวัสดุสำหรับใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ในทางตรงกันข้ามก็ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันและรวมถึงอนาคต เนื่องจากพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยากหรือแทบจะไม่ย่อยสลายได้เลยตามธรรมชาติจึงก่อให้เกิดปัญหาการสะสมของขยะพลาสติกตามมา นอกจากนี้การผลิตพลาสติกส่วนใหญ่จะใช้แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียมเป็นหลัก ซึ่งปิโตรเลียมเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์เป็นเวลานาน ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ปิโตรเลียมนับเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถเกิดขึ้นทดแทนได้ หรือถ้าจะเกิดมาทดแทนได้ก็ต้องใช้ระยะเวลาอย่างมาก ในปัจจุบันพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) จึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นวัตถุดิบหลักตั้งต้นของการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic) เป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์ชีวภาพจัดเป็นวัตถุดิบที่มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ จึงสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเป็นทรัพยากรที่สามารถเกิดทดแทนขึ้นใหม่ได้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาฟิล์มพลาสติกจากพอลิเมอร์ที่มีในธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เพื่อทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียม โดยทำการสกัดเซลลูโลสจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มพลาสติกที่เตรียมได้นั้นมีความความยืดหยุ่นต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติกทั่วไปในท้องตลาด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักโดยทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮดรอกซีที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์ที่เตรียมได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากฟางข้าว และเปลือกข้าวโพด โดยมีพลาสติกไบโอเซอร์เป็นสารเติมแต่ง
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไบโอเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่เตรียมได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้พลาสติกไบโอเซอร์ที่มีความเหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นและความสามารถในการขึ้นรูปของฟิล์มเซลล์ูโลสตัดแปรจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด
2. ได้ฟิล์มเซลล์ูโลสตัดแปรจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพเพื่อทดแทนการใช้ฟิล์มจากพอลิเมอร์สังเคราะห์
3. สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมทางวิชาการ หรือตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับทางวิชาการเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

การตรวจเอกสาร

ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทและเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์เรา ดังจะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์ของใช้และบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ รวมไปถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์และการเกษตร เนื่องจากพลาสติกมีข้อดีหลายประการคือ มีราคาถูก มีน้ำหนักที่เบาแต่มีความแข็งแรงทนทานสูง มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ง่ายต่อการแปรรูป สามารถใช้งานได้กว้างขวาง สามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ อีกทั้งยังสามารถผลิตพลาสติกให้มีสมบัติเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทางได้อีกด้วย ทำให้ความต้องการการบริโภคพลาสติกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากข้อมูลสรุปสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2554 และแนวโน้มปี 2555 พบว่าอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทย มีความต้องการการใช้เม็ดพลาสติกในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2553 อยู่ที่ 3,431 พันตัน และคาดว่าจะเพิ่มเป็น 3,561 พันตัน ในปี พ.ศ. 2554 จากปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเรื่องการกำจัดขยะพลาสติกที่จะเกิดตามมา ทั้งนี้เนื่องจากการกำจัดพลาสติกที่ใช้แล้วไม่สอดคล้องกับอัตราการผลิตพลาสติกที่สูงเพิ่มมากขึ้น พลาสติกที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่สามารถเกิดขึ้นทดแทนได้ใหม่และยากต่อการย่อยสลายในสภาวะแวดล้อมปกติ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้น วิธีการจัดการขยะพลาสติกอาจทำได้โดยนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) หรือนำพลาสติกที่ใช้แล้วไปแปรรูปและเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) แต่เป็นวิธีที่ไม่นิยมเนื่องจากคุณภาพหรือสมบัติการใช้งานของพลาสติกจะลดลงและมักจะมีปัญหาเรื่องความสะอาดและความปลอดภัย จึงนิยมแก้ปัญหาด้วยการฝังกลบ (Landfill) และการเผาซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกแต่ก็ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมทางออกที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาเหล่านี้คือการคิดค้นพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์ที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยเน้นการนำวัตถุดิบทางชีวภาพ เช่น แป้ง (Starch) เซลลูโลส (Cellulose) ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan) ซึ่งจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถเกิดใหม่ได้มาทดแทนการใช้วัตถุดิบประเภทปิโตรเคมีซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด

เซลลูโลส (Cellulose) จัดเป็นวัตถุดิบทดแทนที่มีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากที่สุดซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เกิดจากมอนอเมอร์ที่เรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (Anhydro-glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไกลโคซิดิก (β -1,4-glucosidic linkage) เกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ในเซลลูโลสหนึ่งกลูโคสยูนิตจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความ

ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีจำนวนถึงสามกลุ่มด้วยกัน การที่เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในโครงสร้างโมเลกุลนี้จึงส่งผลให้เซลลูโลสมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส จากโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง ทำให้เซลลูโลสไม่สามารถละลายในตัวทำละลายมีขั้วทั่วไป และยากต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อต้องการนำไปขึ้นรูปเนื่องจากเซลลูโลสจะสลายตัวก่อนที่จะเกิดการหลอมเหลว ดังนั้นจึงต้องมีการดัดแปรโครงสร้างของเซลลูโลสเพื่อปรับปรุงสมบัติของเซลลูโลสให้ดีขึ้นและมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้มากขึ้น

การดัดแปรเซลลูโลสนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือการดัดแปรทางกายภาพ เช่น การใส่สารเติมแต่ง การปรับปรุงกรรมวิธีการผลิต และการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ส่วนวิธีการดัดแปรที่สองคือ การดัดแปรทางเคมี เช่นการดัดแปรโครงสร้างของเซลลูโลสบางส่วนด้วยสารดัดแปร (Modifying agent) และการทำกราฟโคพอลิเมอร์ (Graft copolymerization) เป็นต้น

การดัดแปรเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Cellulose esterification) นับเป็นวิธีการดัดแปรเซลลูโลสที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการดัดแปรเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้ยังมีสมบัติเชิงกลไม่ทางใดก็ทางหนึ่งที่ด้อยกว่าพลาสติกที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม จากงานวิจัยของ Satgé *et al.* (2002) พบว่าสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความยืดหยุ่นที่ต่ำจึงยังขาดความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ซึ่งข้อจำกัดนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์ โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์นั้นจะช่วยให้อะตอมของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และเข้าไปเพิ่มที่ว่างระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงทำให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการหักงอ (Flexibility) และมีความสามารถในการยืดตัวออก (Stretchability) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้ว พลาสติกไซเซอร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) และช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมเหลว (Polymer's melt viscosity) ส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น (อรอุยา, 2546) ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยที่ผ่านมาของ Choi and Park (2004) ได้ศึกษาผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตโคพอลิไฮดรอกซีวาเลอเรต (PHVB) โดยใช้ น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (Epoxidized soybean oil) ไตรเอทิลซิ

เตต (Triethyl citrate) และไดบิวทิลฟทาเลต (Dibutyl phthalate) เป็นพลาสติกไซเซออร์ ที่ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าไตรเอทิลซิเตตมีประสิทธิภาพในการเป็นพลาสติกไซเซออร์สำหรับพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตโคพอลิไฮดรอกซีวาลเอเรต ได้ดีกว่าไดบิวทิลฟทาเลต น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดส์ และน้ำมันถั่วเหลือง ตามลำดับ เนื่องจากไตรเอทิลซิเตตสามารถลดอุณหภูมิอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) รวมถึงเพิ่มค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของฟิล์มได้มากที่สุด

ข้าวและข้าวโพดจัดเป็นพืชเศรษฐกิจและพืชไร่ที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย นอกจากจะนำมาใช้ในการบริโภคกันโดยทั่วไปแล้ว ข้าวและข้าวโพดยังเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆ เช่น อาหารสำเร็จรูป อาหารสัตว์ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด และอุตสาหกรรมแช่แข็งเพื่อการส่งออก เป็นต้น ดังนั้นในการเก็บเกี่ยวผลผลิตในแต่ละปีจึงมีเศษฟางข้าวและเศษเปลือกข้าวโพดเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก มีรายงานการวิจัยพบว่าฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวนี้มีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในปริมาณที่สูง คือฟางข้าวมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 28 -36% และเปลือกข้าวโพดมีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 38-40% (Reddy and Yang, 2005) ถึงแม้ว่าการจัดการกับเศษฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดเหลือทิ้งมีหลายวิธี เช่น นำไปเลี้ยงสัตว์ ใช้คลุมหน้าดินเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ หรือ ใช้ในการเพาะเห็ด หากแต่เกษตรกรส่วนใหญ่มักใช้วิธีการกำจัดฟางข้าวด้วยการเผาเนื่องจากเป็นวิธีเตรียมพื้นที่สำหรับการทำนาครั้งต่อไปซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ส่วนเศษเปลือกข้าวโพดที่เหลือทิ้งนั้นอาจมีการกำจัดโดยการฝังกลบแต่อย่างไรก็ตามจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการจัดการที่ตามมา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเอาเศษฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งทางการเกษตรจากการเก็บเกี่ยวข้าวและข้าวโพดมาเป็นแหล่งวัตถุดิบของเซลลูโลสเพื่อที่จะนำมาพัฒนาเป็นฟิล์มเซลลูโลสคัดแปรทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียม เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้ทางหนึ่ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) มักเรียกว่าพลาสติกชีวภาพเป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ จึงทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

ในปัจจุบันพอลิเมอร์หรือพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้รับการวิจัยและพัฒนาให้มีความหลากหลายและมีเกณฑ์สำหรับการแยกประเภทมากมาย เช่น แยกตามวิธีการสังเคราะห์ กระบวนการขึ้นรูป การใช้งาน และแหล่งกำเนิด โดยสามารถแยกประเภทตามแหล่งกำเนิดได้เป็นสองประเภท คือ มีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ และมีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติ (Biobased polymers) สามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ (1) พอลิเมอร์ที่สกัดได้โดยตรงจากสิ่งมีชีวิตทั้งสัตว์และพืช ซึ่งพอลิเมอร์ประเภทนี้จะอยู่ในพวกพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน (2) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทางชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และ (3) พอลิเมอร์ที่สร้างโดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ผ่านการตัดแต่งทางพันธุกรรม เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyl alkananoates, PHAs)

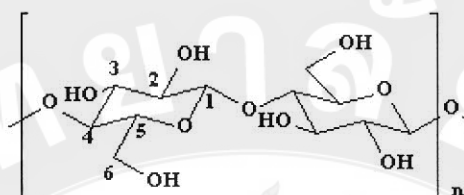
โครงสร้างและสมบัติโดยทั่วไปของเซลลูโลส (Structure and Properties of Cellulose)

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซลลูโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเนื่องจากเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากที่สุดในโลก สามารถพบเซลลูโลสได้ในโครงสร้างของพืชทุกชนิด

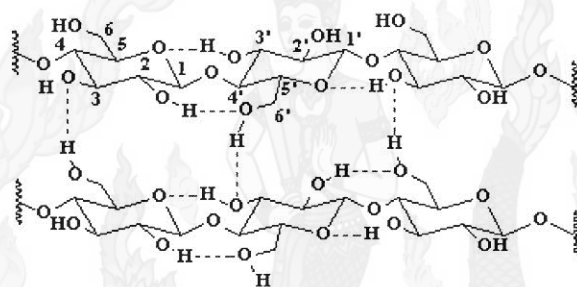
เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง โดยโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (D-glucose) ตั้งแต่ 15-40,000 หน่วย ต่อกันเป็นเส้นตรง (Linear homopolymer) ด้วยพันธะเบต้า-1,4-กลูโคซิดิก (β -1,4-glucosidic linkage) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และ 4 มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีชื่อทางเคมีว่า β -1,4-glucan และมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 300,000-500,000 ดาลตัน โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแสดงดังภาพที่ 1

โมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยปลายสองข้างที่มีลักษณะแตกต่างกัน หมู่ปลายด้านหนึ่งคือ reducing end หมายถึงปลายโมเลกุลข้างที่มี free α - หรือ β -hydroxyl group เป็น Reducing group และ Non reducing end หมายถึง ปลายอีกข้างหนึ่งของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่มี Reducing end group จากโครงสร้างดังกล่าวจะเห็นว่าเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group)

อยู่เป็นจำนวนมาก และเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่มีเป็นจำนวนมากนี้เอง ทำให้เซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล ((Intra-and intermolecular hydrogen bonding) ดังภาพที่ 2 ประกอบกับโครงสร้างของเซลลูโลสสามารถเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก (60-80%)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส



ภาพที่ 2 พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส

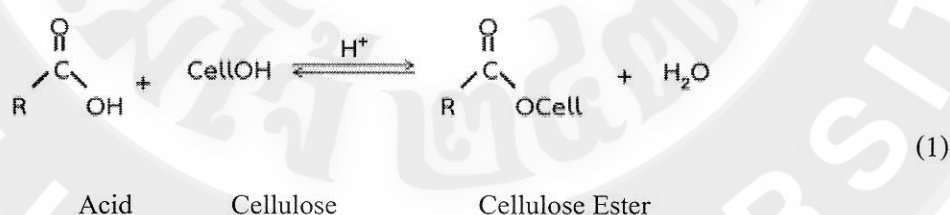
การดัดแปรเซลลูโลส (Cellulose Modification)

ในหนึ่งมอนอเมอร์ของเซลลูโลสที่เรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (Anhydroglucopyranose) นั้นจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ด้วยกัน ที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสนี้เองที่จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารดัดแปร เกิดเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส (Cellulose derivative) ขึ้น แต่เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของเซลลูโลสค่อนข้างที่จะควบคุมการใช้งานได้ลำบาก นั่นคือเซลลูโลสมีพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล (Intra-and intermolecular hydrogen bond) อยู่เป็นจำนวนมาก โครงสร้างของเซลลูโลสสามารถเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้เซลลูโลสไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายมีขั้วทั่วไป และพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเซลลูโลสยังทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับสารเคมีหรือสารดัดแปรอื่นๆ ดังนั้นการเข้าทำปฏิกิริยาของสารเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสจึงเป็นไปได้ยาก โดยทั่วไปในโครงสร้างเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ก่อนสำหรับส่วนที่เป็นผลึกจะเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของผลึกเท่านั้น นอกจากนี้พันธะไฮโดรเจนยังส่งผลให้เซลลูโลสมีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวก่อนที่จะ

จะหลอมเหลวจึงทำให้เซลลูโลสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือไหลได้ เมื่อต้องนำเซลลูโลสไปขึ้นรูปด้วยวิธีการทางความร้อน และการที่เซลลูโลสไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปได้นั้นจึงทำให้ยากที่จะนำมาเซลลูโลสมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มหรือปั่นเป็นเส้นใยได้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำเซลลูโลสมาดัดแปรโครงสร้างทางเคมีเพื่อลดพันธะไฮโดรเจนลง เพื่อให้เซลลูโลสมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกและเหมาะสมที่จะนำเซลลูโลสไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ต่อไป

ค่าเฉลี่ยของการแทนที่ (Degree of substitution) ของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 3 โดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลนั้นจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาและสารละลายที่ใช้ ซึ่งภายหลังจากการเกิดการแทนที่ขึ้นนั้นจะทำให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง และสามารถทำให้เซลลูโลสละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ดีขึ้น ส่งผลให้สามารถนำเซลลูโลสดัดแปรที่ได้ไปใช้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสนั้นทำได้หลายวิธีด้วยกันเช่น การไฮโดรไลซิส การเกิดออกซิเดชันหรือรีดักชัน แต่วิธีการดัดแปรเซลลูโลสที่นิยมวิธีหนึ่งคือการดัดแปรเซลลูโลสจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยสารดัดแปร (Esterifying agent) ที่เป็นกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) หรืออนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก (Derivative of carboxylic acid) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเซลลูโลสดัดแปรชนิดเซลลูโลสเอสเทอร์ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของเซลลูโลสแสดงดังสมการ 1



พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

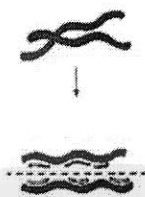
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เซลลูโลสเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันยังมีสมบัติเชิงกลไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง เช่น ความแข็งแรง หรือความยืดหยุ่น ที่ดีกว่าพลาสติกที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม ข้อจำกัดนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์ โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์นั้นจะช่วยให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และเข้าไปเพิ่มที่ว่างระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงทำให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการหักงอ (Flexibility) และมีความสามารถในการยืดตัวออก (Stretchability) เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้แล้วพลาสติกไซเซอร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) และช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมเหลว (Polymer's melt viscosity) ส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น (อรอุมา, 2546)

พลาสติกไซเซอร์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) และ พลาสติกไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) พลาสติกไซเซอร์ภายนอกคือพลาสติกไซเซอร์ที่ผสมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ แล้วทำให้พอลิเมอร์นั้นอ่อนตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้นโดยที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซอร์และพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วพลาสติกไซเซอร์ภายนอกจะเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์และมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันประมาณ -50°C ข้อดีของพลาสติกไซเซอร์ภายนอกคือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้ โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ลงไป อย่างไรก็ตาม พลาสติกไซเซอร์ภายนอกก็มีจุดอ่อนคือพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ ส่วนพลาสติกไซเซอร์ภายในคือพลาสติกไซเซอร์ที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพอลิเมอร์ เช่น การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Co-polymerization) เนื่องจากการทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันนั้นเป็นกรรมวิธีที่ทำให้สมมาตรโมเลกุลของพอลิเมอร์เสียไป แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจึงลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นพลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้จึงไม่สามารถแยกออกจากพอลิเมอร์ได้ด้วยวิธีการสกัดซึ่งจัดเป็นข้อดีของกระบวนการพลาสติกไซเซชันภายใน แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการแบบนี้ก็มีข้อจำกัดการนำไปใช้ กล่าวคือการทำโคพอลิเมอร์จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนตัวจำกัด และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มักจะแปรตามอุณหภูมิมากๆ เสถียรภาพทางรูปร่างมักจะเสียไปที่อุณหภูมิสูงๆ

ทฤษฎีที่อธิบายกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ภายนอกมีทั้งหมด 3 ทฤษฎี ดังนี้คือ

1. Lubricity Theory ทฤษฎีนี้อธิบายการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ว่าทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (Lubricant) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลผ่านไปมาซึ่งกันและกันได้ ดังภาพที่ 3



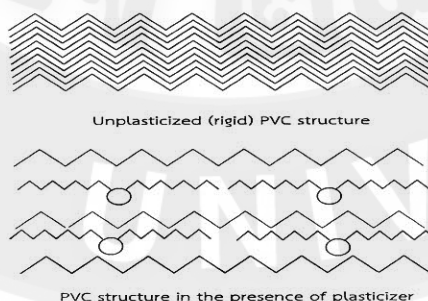
ภาพที่ 3 การทำงานของพลาสติกไซเซอร์ที่เปรียบเสมือนสารหล่อลื่น

2. Gel Theory ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไซเซอร์จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน ดังนั้นพลาสติกไซเซอร์จะต้องประกอบด้วยทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว โดยพลาสติกไซเซอร์ส่วนที่มีขั้วจะเข้ายึดกับไดโพลหรือบริเวณที่มีขั้วของพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติกไซเซอร์ส่วนที่ไม่มีขั้วจะกำบัง (Shield) บริเวณไดโพลของพอลิเมอร์ออกจากกัน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์

3. Free-Volume Theory ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น
ตัวอย่างของโครงสร้างพอลิเมอร์ (PVC) ที่ใส่และไม่ใส่พลาสติกไซเซอร์ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างของ PVC ทั้งในกรณีที่ใส่และไม่ใส่พลาสติกไซเซอร์

สมบัติที่ต้องการของพลาสติกไซเซอร

1. สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ กล่าวคือ ระหว่างการขึ้นรูป พลาสติกไซเซอรจะต้องผสมกับพอลิเมอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ เกิดเป็นสารผสมที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะต้องยังคงเป็นเนื้อเดียวกัน

2. ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอร วัตถุประสงค์แรกของการใช้พลาสติกไซเซอรคือ เพื่อให้พอลิเมอร์อ่อนตัวไม่เปราะ ซึ่งความสามารถดังกล่าวก็คือ “ประสิทธิภาพ” ของพลาสติกไซเซอร และโดยทั่วไปวัดได้จากผลของการใช้พลาสติกไซเซอรที่มีต่อมอดูลัสของพอลิเมอร์ โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่ามอดูลัสและปริมาณพลาสติกไซเซอร ซึ่งในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพลาสติกไซเซอรต่างชนิดกัน อาจทำได้โดยการวัดค่ามอดูลัสที่ปริมาณพลาสติกไซเซอรเท่ากัน หรือวัดจากปริมาณพลาสติกไซเซอรที่ต้องการใช้ในการทำให้พอลิเมอร์มีมอดูลัสเท่ากัน ซึ่งนอกจากนี้ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอรยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวมันเอง โดยพบว่าการมีโครงสร้างแบบอะลิฟาติกเชิงเส้น จะส่งผลให้พลาสติกไซเซอรมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในขณะที่โครงสร้างแบบกิ่งและแบบวงจะทำให้ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอรลดลง นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอรยังอาจวัดได้จากผลในการทำให้อุณหภูมิห้อง T_g ของพอลิเมอร์ลดลง พลาสติกไซเซอรที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้พอลิเมอร์มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากแข็งเหมือนแก้ว ไปยืดหยุ่นเหมือนยางอยู่ในช่วงกว้าง

3. มีความคงตัวสูง อยู่กับพอลิเมอร์ได้นาน กล่าวคือ ระหว่างการใช้งาน ผลิตภัณฑ์จะมีสมบัติความอ่อนตัวลดลงและเปลี่ยนเป็นแข็งเปราะ ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากพลาสติกไซเซอรที่ใช้ไม่มีความคงตัวและเกิดการหลุดออกจากเนื้อพอลิเมอร์ หรือมาจากการเสื่อมของพลาสติกไซเซอรระหว่างการใช้งานเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากแสง ความร้อน ออกซิเจนหรือจุลินทรีย์ หรือพลาสติกไซเซอรเข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ไม่สมบูรณ์ และค่อยๆ ระเบิด (Exude) ออกมาที่พื้นผิวผลิตภัณฑ์ทีละเล็กละน้อย ซึ่งการปรับปรุงความคงตัวของพลาสติกไซเซอรสามารถทำได้โดยใช้พลาสติกไซเซอรที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สารที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรได้คือควมมีน้ำหนักโมเลกุลอย่างน้อยประมาณ 300

4. เสถียร ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ

เนื่องจากการขึ้นรูปและสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณของ พลาสติกไซเซอร ดังนั้นการเลือกใช้พลาสติกไซเซอรให้เหมาะสม จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่อไปนี้

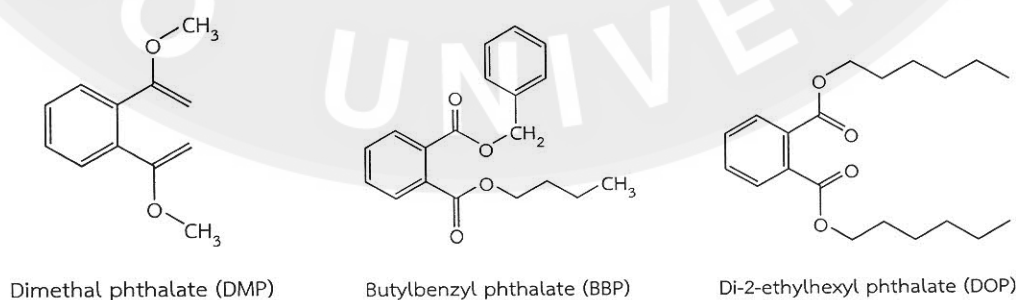
- ราคา
- ความสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์
- ลักษณะเฉพาะในการขึ้นรูป
- สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล
- ความทนทานต่อน้ำ เคมีภัณฑ์ สภาพอากาศ ฝุ่น และจุลินทรีย์
- ความเป็นพิษ
- วิธีการขึ้นรูป
- สมบัติที่ต้องการของผลิตภัณฑ์

สามารถแบ่งชนิดของพลาสติกไซเซอรได้ตามโครงสร้างทางเคมี (ปรีชา, 2544: 30) (อรอุษา, 2546) ดังนี้คือ

พทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate Esters)

พทาเลตเอสเทอร์ จัดเป็นพลาสติกไซเซอรที่มีการนำมาใช้งานกันมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งพทาเลตต่อไปนี้คือ ได-2-เอทิล-เฮกซิลพทาเลต (DOP) ไดไอโซออกทิลพทาเลต (DIOP) ไดไอโซโนนิลพทาเลต (DINP) และ ไดไอโซเดซิลพทาเลต (DIDP) สำหรับอะลิฟาติกไดคาร์บอกซิลิกแอซิดเอสเทอร์ จะใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มสมบัติความอ่อนตัว ส่วนฟอสเฟตเอสเทอร์ จะนิยมนำไปใช้ในกรณีที่ต้องการได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทนไฟ

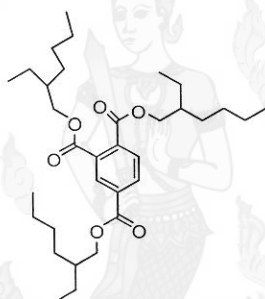
พทาเลตเอสเทอร์เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเล็กน้อย และไม่ละลายในน้ำ สัมผัสได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างฟทาสิกแอนไฮไดรด์และแอลกอฮอล์ ซึ่ง พทาเลตเอสเทอร์ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรที่สำคัญ ได้แก่ ไดเมทิลพทาเลต (Dimethyl phthalate, DMP) ไดบิวทิลพทาเลต (Dibutyl phthalate, DBP) ได-2-เอทิล-เฮกซิลพทาเลต (Di-2-ethylhexyl phthalate, DEHP หรือ DOP) บิวทิลเบนซิลพทาเลต (Butyl benzyl phthalate, BBP) ตัวอย่างโครงสร้างพลาสติกไซเซอรบางชนิดแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอรชนิดพทาเลตเอสเทอร์

ไตรเมลลิตเอสเทอร์ (Trimellitate Esters)

ไตรเมลลิตเอสเทอร์เป็นสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีการระเหยต่ำ ดังนั้นจึงนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความทนทานต่อความร้อน และทนต่อการถูกสกัดออก อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการเป็นพลาสติกไซเซอ์ต่ำกว่าพทาเลต มีราคาแพง และไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีสมบัติต้าน อุณหภูมิต่ำ โดยพลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้ที่สำคัญคือ ไตรออกทิลไตรเมลลิต (Trioctyl trimellitate, TOTM) โครงสร้างดังภาพที่ 7 การใช้งานของ TOTM ส่วนใหญ่ใช้ในฉนวนสายไฟฟ้า และสายเคเบิลทนอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังใช้ปะเก็นเครื่องล้างจาน (Dishwasher gaskets) และท่อสายยางทางการแพทย์



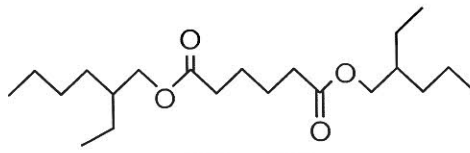
Trioctyl trimellitate (TOTM)

ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอ์ชนิดไตรเมลลิตเอสเทอร์

อะลิฟาติกไดคาร์บอกซิลิกแอซิดเอสเทอร์ (Aliphatic Dicarboxylic Esters)

พลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้ได้จากเอสเทอร์ของกรดไดคาร์บอกซิลิก ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$ โดยกรดที่ใช้กันได้แก่ กรดอะดิพิก (Adipic acid, $n=4$) กรดอะซีลาอิก (Azelaic acid, $n=7$) และกรดซีบาซิก (Sebacic acid, $n=8$) อะลิฟาติกไดคาร์บอกซิลิกเอสเทอร์เป็นพลาสติกไซเซอ์ที่มีประสิทธิภาพสูง และใช้ในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความอ่อนตัว ฦ อุณหภูมิต้าน นอกจากนี้สารเหล่านี้ยังมีความทนทานต่อแสงยูวี เนื่องจากพลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้มีความหนืดต่ำ และมีอำนาจการละลายต่ำ จึงทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการผลิต PVC plastisols อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้มีความสามารถในการเข้าร่วมตัวกับ PVC ได้จำกัด จึงต้องใช้ร่วมกับพทาเลต

ในบรรดาอะลิฟาติกไดคาร์บอกซิลิกเอสเทอร์ทั้งหมด สารที่มีการผลิตเพื่อใช้เป็นพลาสติกไซเซอ์มากที่สุดคือ อะดิเพต ซึ่งอะดิเพตที่สำคัญและใช้กันมาก ได้แก่ ได-2-เอทิลเฮกซิลพทาเลต หรือไดออกทิลอะดิเพต (DOA) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 8



Diethyl adipate (DOA)

ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไฮดรอกซีไดฟอสเฟตไดคาร์บอซิลิกแอซิดเอสเทอร์

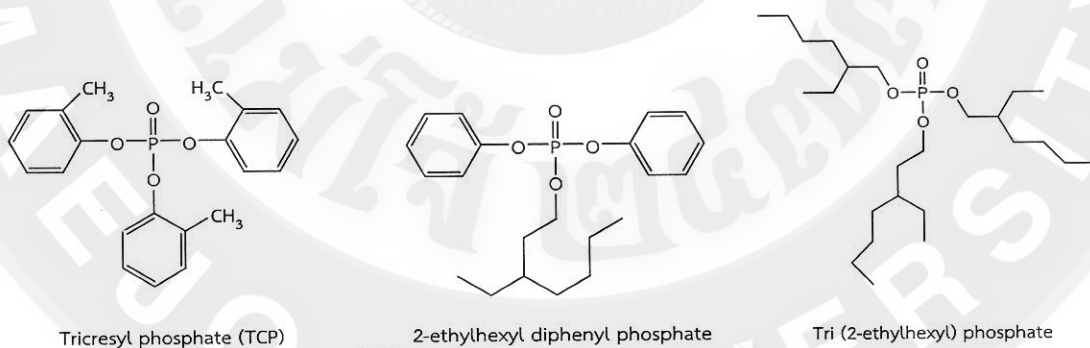
ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate Esters)

ฟอสเฟตเอสเทอร์ ใช้เป็นพลาสติกไฮดรอกซีใน PVC พอลิเอทิลีน และอนุพันธ์ของเซลลูโลส ข้อดีของพลาสติกไฮดรอกซีนีคือช่วยเพิ่มความทนไฟให้กับพลาสติก

ฟอสเฟตเอสเทอร์ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ไตรแอริลฟอสเฟต (Triaryl phosphate) ได้แก่ ไตรครีซิลฟอสเฟต (Tricresyl phosphate, TCP)
2. แอลคิลไดแอริลฟอสเฟต (Alkyldiaryl phosphate) ได้แก่ 2-เอทิลเฮกซิลไดฟีนิลฟอสเฟต (2-Ethylhexyl diphenyl phosphate)
3. ไตรแอลคิลฟอสเฟต (Trialkyl phosphate) ได้แก่ ไตร (2-เอทิลเฮกซิล)ฟอสเฟต (Tri (2-ethylhexyl phosphate))

โครงสร้างของพลาสติกไฮดรอกซีนีฟอสเฟตเอสเทอร์ ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังภาพ 9

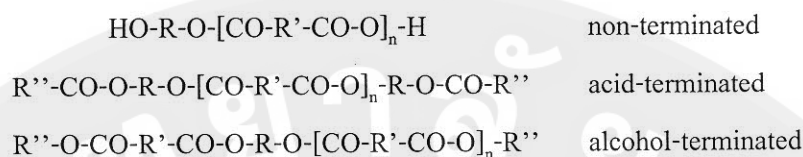


ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไฮดรอกซีนีฟอสเฟตเอสเทอร์

พอลิเอสเทอร์ หรือพอลิเมอร์พลาสติกไฮดรอกซี (Polymeric Plasticizers)

พอลิเมอร์- หรือพอลิเอสเทอร์พลาสติกไฮดรอกซี ทางการค้าที่ใช้กันส่วนใหญ่คือ พอลิเอสเทอร์อิมิด์ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดออกไซด์และกรดไดคาร์บอซิลิก ซึ่งในกรณีที่มีการเตรียมใช้ไดออกไซด์มากเกินไป ก็จะได้พอลิเมอร์ที่ปลายโซ่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล และมักเอสเทอร์ฟาย

ต่อด้วยกรดโมโนคาร์บอซิลิก (กรดเป็น Terminating agent) แต่ถ้าการเตรียมใช้กรดมากเกินไป จะได้พอลิเมอร์ที่ปลายโซ่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอซิลิก และมักเอสเทอร์ไฟด้วยโมโนไฮดรอกแอ ลกซอล (แอลกอฮอล์เป็น Terminating agent) ดังนั้นพอลิเมอร์พลาสติกไซเซอ์จึงมีโครงสร้างได้ 3 แบบ ดังนี้



พลาสติกไซเซอ์อื่นๆ (Other Plasticizers) ได้แก่

เอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid esters) เอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น ลอเรต (Laureates) ปาล์มไมเทต (Palmitates) สเตียเรต (Stearates) และริซินโนลีเอต (Ricinoleates) จัดเป็นผลิตภัณฑ์พิเศษที่ใช้งานเป็นเอกซ์เทนเดอร์ สารหล่อลื่น หรือพลาสติกไซเซอ์ เสริม

ซิตริกแอซิดเอสเทอร์ (Citric acid esters) ซิตริกแอซิดเอสเทอร์ หรือซิเตรต (Citrates) เป็นพลาสติกไซเซอ์ที่ใช้กันน้อย เนื่องจากมีราคาแพง อย่างไรก็ตาม จากการที่สารเหล่านี้ไม่มีอันตราย จึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในฟิล์มหรือท่ออ่อนที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างของพลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้ ได้แก่ ไตร(2-เอทิลเฮกซิล) แอซีทิลซิเตรต (Tri (2-ethylhexyl) acetyl citrate)

ซัลโฟนิคแอซิดเอสเทอร์และซัลโฟนาไมด์ (Sulfonic acid esters and sulfonamides) พลาสติไซเซอ์ในกลุ่มนี้สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง PVC ข้อดีอย่างหนึ่งของพลาสติกไซเซอ์ในกลุ่มนี้คือ มีความทนทานต่อไฮโดรลิซิสแม้ในภาวะที่เป็นด่างใน สารละลายแอลกอฮอล์

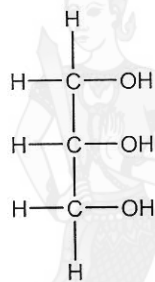
เบนโซอิกแอซิดเอสเทอร์ (Benzoic acid esters) ตัวอย่างของพลาสติกไซเซอ์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอลเบนโซเอต (Diethylene glycol benzoate) สารตัวนี้เป็นพลาสติกไซเซอ์ของเหลวที่มีสมบัติพลาสติกไซเซอ์ใกล้เคียงกันกับบิวทิลเบนซินพทาเลต (BBP) ซึ่งนิยมใช้ในแผ่น ไวไนลปูพื้น แต่เบนโซเอตมีข้อดีกว่าคือ ทำให้ฝุ่นจับได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม BBP จะมีราคาถูกกว่า

พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ กลีเซอรอล และไตรเอทิลซิเตรต ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

■ กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล เป็นไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ (Trihydric alcohol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ชนิดพอลิเมอริกพลาสติกไซเซอร์ มีสูตรโมเลกุลคือ $C_3H_8O_3$ มีลักษณะเป็นของเหลวใส หนืดคล้ายน้ำมัน ไม่มีกลิ่น ความหนาแน่นประมาณ 1.26 g/mL มีมวลโมเลกุลประมาณ 92.09 g/mol ซึ่งกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารดูดความชื้น สารปรับสภาพการตกผลึก (Crystallization modifier) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล แสดงดังภาพที่ 10

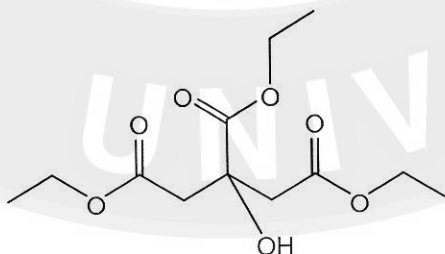


Glycerol

ภาพที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล

■ ไตรเอทิลซิเตรต (Triethyl citrate) (Yang *et al.*, 2014: 200)

ไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอร์ชนิดซิเตริกแอซิดเอสเทอร์ (Citric acid esters) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{12}H_{20}O_7$ ไตรเอทิลซิเตรตมีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ความหนาแน่นประมาณ 1.137 g/mL มีมวลโมเลกุลประมาณ 276.283 g/mol ไตรเอทิลซิเตรตเป็น พลาสติกไซเซอร์ที่ไม่มีอันตราย จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในฟิล์มสำหรับอาหาร หรือใช้งานทางการแพทย์ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของไตรเอทิลซิเตรตแสดงภาพที่ 11

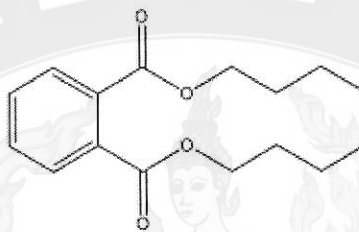


Triethyl citrate (TEC)

ภาพที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของไตรเอทิลซิเตรต

■ ไดบิวทิลฟทาเลต (Dibutyl phthalate) (Yang et al., 2014: 200)

ไดบิวทิลฟทาเลตเป็นพลาสติกไฮเซอรันชนิดฟทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate esters) สามารถรวมตัวได้ดีกับ PVC, VC/VAC, PMMA และอนุพันธ์ของเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{16}H_{22}O_4$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 278.35 g/mol ความหนาแน่น 1.047 g/ml เป็นของเหลวหนืด ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว มีโครงสร้างทางเคมี ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 โครงสร้างทางเคมีของไดบิวทิลฟทาเลต

เปลือกข้าวโพด

แหล่งวัตถุดิบในการผลิตเซลลูโลสในงานวิจัยนี้คือเปลือกข้าวโพด ประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมในแต่ละปีมีผลิตผลด้านการเกษตรเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น ข้าว อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น จากการเพาะปลูกพืชผลทางการเกษตรนี้ ส่งผลให้ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตจะมีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย เปลือกข้าวโพด เป็นต้น ดังนั้นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตเซลลูโลสในงานวิจัยนี้คือเปลือกข้าวโพด ซึ่งจัดเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่หาได้ง่าย และในการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกข้าวโพดพบว่าเปลือกข้าวโพดมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ร้อยละ 38-40 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 28 ลิกนิน ร้อยละ 7-21 และเถ้า ร้อยละ 3.6-7 (Reddy and Yang, 2005) เซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดจึงจัดเป็นแหล่งวัตถุดิบที่น่าสนใจ

ข้าวโพด มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Zea mays* Linn. ชื่ออื่นๆ: ข้าวสาลี สาลี (เหนือ) คง (กระบี่) โพด (ใต้) บือเคะ (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน) เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้ามีลำต้นสูง โดยเฉลี่ย 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น 0.5-2.0 นิ้ว เมล็ดจากฝักใช้เป็นอาหารคนและสัตว์

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ข้าวโพดเป็นพืชจำพวกหญ้า ข้าวโพดเจริญเติบโตได้ประมาณ 7 – 10 วัน รากถาวรจะงอกขึ้นรอบ ๆ ขั้วปลาในระดับใต้พื้นดินประมาณ 1-2 นิ้ว รากถาวรนี้ เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะแผ่ออกไปโดยรอบประมาณ 100 เซนติเมตร รากของข้าวโพดเป็นระบบรากฝอย (Fibrous root system) นอกจากรากที่อยู่ใต้ดินแล้ว ยังมีรากยึดเหนี่ยว (Brace root) ซึ่งเกิดขึ้น

รอบ ๆ ข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน มีลำต้นตั้งตรงแข็งแรง เนื้อภายในฟ้ามคล้ายฟองน้ำสูงประมาณ 1.4 เมตร ลำต้นมีข้อ (Node) และปล้อง (Internode) ปล้องที่อยู่ในดินและใกล้ผิวดินสั้น และจะค่อย ๆ ยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินจะมีจำนวนประมาณ 8-20 ปล้อง ลำต้นสดมีสีเขียว ใบ ยาวรี เป็นเส้นตรงปลายแหลม ยาวประมาณ 30-100 ซม. เส้นกลางของใบจะเห็นได้ชัด ตรงขอบใบมีขนอ่อน ๆ มีเขียวใบ ลักษณะของใบรวมทั้งสีของใบแตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ บางพันธุ์ใบสีเขียว บางพันธุ์ใบสีม่วงและบางพันธุ์ใบลาย จำนวนใบก็เช่นเดียวกันอาจะมีตั้งแต่ 8-48 ใบ ดอกตัวผู้ และดอกตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน ช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วนยอดของลำต้น ช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมาอยู่ระหว่างกาบของใบ และลำต้น ช่อดอกตัวผู้ (Tassel) อยู่ตอนบนสุดของลำต้น ดอกตัวผู้ดอกหนึ่งจะมีอับเกสร (Anther) 3 อับ ส่วนดอกตัวเมียอยู่รวมกันเป็นช่อ เกิดขึ้นตอนข้อกลาง ๆ ลำต้น ฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่เจริญเติบโตแล้ว ฝักอ่อนจะมีสีเขียวพอแก่เป็นสีนวล ลักษณะใบของข้าวโพดแสดงดังภาพที่ 13 (ข้าวโพด , ออนไลน์ เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/ข้าวโพด>)



ภาพที่ 13 ลักษณะใบของข้าวโพด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยหลายงานด้วยกันที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้พลาสติกไซเซอร์ ชนิดต่างๆ เพื่อพัฒนาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ยกตัวอย่างเช่น

Yang and Paulson (2000: 563) ได้ทำการศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์และความชื้นในสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติกันการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเจลาตินที่กินได้ โดยทีมวิจัยพบว่าการเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ชนิดหนึ่งลงไปในเจลาติน ส่งผลให้ฟิล์มเจลาตินที่ได้มีความสามารถในการยืดขยายเพิ่มขึ้นพอสมควรแต่กลับทำให้ความแข็งแรงความทนแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ควรมีการควบคุมปริมาณของกลีเซอรอลที่เติมลงไป เนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลจะส่งผลในทางตรงข้ามกับการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม ปริมาณความ

เข้มข้นต่ำสุดของกลีเซอรอลที่กลีเซอรอลจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ ร้อยละ 60 (เทียบกับน้ำหนักแห้งของฟิล์ม) ซึ่งถ้าใช้ปริมาณของกลีเซอรอลต่ำกว่านี้จะทำให้ฟิล์มเจลาตินที่ได้มีความเปราะและความแข็งแรงลดต่ำลง

Liu and Williams (2002: 31) ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร 2 ชนิดคือ ไดเอทิลฟทาเลต และไตรเอทิลซิเทตที่มีผลต่อฟิล์มเซลลูโลสอซิเทตฟทาเลต (Cellulose acetate phthalate) ซึ่งผลการทดลองพบว่าไตรเอทิลซิเทตทำให้ฟิล์มเซลลูโลสอซิเทตฟทาเลตมีร้อยละการยืดตัวที่เพิ่มขึ้นแต่กลับส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความทนแรงดึงและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ใช้ไดเอทิลฟทาเลตเป็นพลาสติกไซเซอร อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ใช้ไดเอทิลฟทาเลตเป็นพลาสติกไซเซอรจะมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและความชื้นในขณะที่มีการบ่มฟิล์มโดยใช้ความร้อนและความชื้นต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้ไตรเอทิลซิเทตเป็นพลาสติกไซเซอร

Choi and Park (2004: 455) ทำการศึกษาผลของพลาสติกไซเซอรที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 4 ชนิด คือ ไตรเอทิลซิเทต ไดบิวทิลฟทาเลต น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดส์ ที่มีผลต่อฟิล์มพอลิ-3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต (PHBV) ผลการศึกษาพบว่าไตรเอทิลซิเทตและไดบิวทิลฟทาเลตส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของฟิล์ม PHBV ลดต่ำลง ในขณะที่ถั่วเหลืองกลับไปเพิ่มค่าการยืดตัวที่จุดขาดและความทนแรงกระแทกของฟิล์ม PHBV มากกว่าการใช้น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดส์เป็นพลาสติกไซเซอร

Park *et al.* (2004: 2281) ทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตของเซลลูโลสอะซิเตตและดินเหนียวโดยใช้ไตรเอทิลซิเทตเป็นพลาสติกไซเซอร คณะวิจัยพบว่าการใช้ดินเหนียวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการใช้ไตรเอทิลซิเทตในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุเซลลูโลสนาโนคอมพอสิตมีโครงสร้างแบบการสอดแทรก (Intercalation) และโครงสร้างแบบการกระจาย (Exfoliation) ที่ดีกว่าการใช้ไตรเอทิลซิเทตเป็นพลาสติกไซเซอรในปริมาณร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้คณะวิจัยยังพบว่าความทนแรงดึง ค่ามอดูลัส และความเสถียรต่อความร้อนของเซลลูโลสนาโนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยดินเหนียวนี้มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอรจากร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

Talja *et al.* (2007: 288) ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอรชนิดต่างๆ (กลีเซอรอล ไชลิทอล และซอร์บิทอล) และผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้กินได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามการ

เพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณของพลาสติกไซเซอร် คณะนักวิจัยพบว่า การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอร်และความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอร် ในขณะที่ฟิล์มกลับมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

Osés *et al.* (2007) ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บรักษาชิ้นงานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มเวย์โปรตีน (Whey protein isolate, WPI) ที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร်ชนิดพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร်ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าซอร์บิทอล นั่นคือฟิล์มเวย์โปรตีนที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร်จะมีความยืดหยุ่นดีกว่าฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร်ในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกลีเซอรอลและซอร์บิทอลที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นพลาสติกไซเซอร်ของฟิล์มเวย์โปรตีนคือ ร้อยละ 40 และร้อยละ 50 ตามลำดับ ซึ่งถ้าเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร်มากเกินไปจนเกินจุดที่เหมาะสมนี้จะส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นลดลงและมีความอ่อนตัวเพิ่มขึ้น การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บรักษาฟิล์มที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาฟิล์มไม่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพภายนอกและสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร် แต่อย่างไรก็ตามผลการวิจัยพบว่าฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร်จะมีความยืดหยุ่นที่ลดลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาฟิล์มอันเนื่องมาจากการเกิดผลึกของซอร์บิทอล

Behjat *et al.* (2009:243) ทำการเตรียมชิ้นงานไบโอคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนกับเส้นใยปอแก้ว โดยมีพอลิเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร် ทีมวิจัยได้ทำการศึกษาความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดนี้โดยใช้วิธีการฝังดิน (Soil burial test) และทำการศึกษาผลของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและชนิดความหนาแน่นสูงกับเซลลูโลสมีอัตราการย่อยสลายที่ค่อนข้างเด่นชัด และอัตราการสลายตัวทางชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพลาสติกไซเซอร်จะมีอัตราการสลายตัวทางชีวภาพที่เร็วกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร်

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง เปลือกข้าวโพดสด จำนวน 3,00 กรัม

สารเคมี สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
Acetone	CH_3COCH_3	99.5%	RCL Labscan limited
Chloroform	CHCl_3	88.0%	RCL Labscan limited
Dichloromethane	CH_2Cl_2	99.8%	RCL Labscan limited
DMAc	$\text{C}_4\text{H}_9\text{NO}$	99.0%	Fluca Chemic A.G.
Ethanol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	99.8%	กรมสรรพสามิต
Glycerol	$\text{CH}_2\text{OHCHOHCH}_2\text{OH}$	99.5%	Ajax Finechem
Hexane	C_6H_{14}	95.0%	RCL Labscan limited
Hydrochloric acid	HCl	37.0%	RCL Labscan limited
Hydrogen peroxide	H_2O_2	35.0%	QRēC™
Lauroyl chloride	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CClO}$	98.0%	Merck schuchardt
Pyridine	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	99.5%	Merck schuchardt
Sodium hydroxide	NaOH	97.0%	RCL Labscan limited
Toluene	C_7H_8	99.5%	RCL Labscan limited

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Hot plate
2. บีกเกอร์ขนาด 100 250 2,000 และ 5,000 มิลลิลิตร
3. กระบอกตวง 50 และ 100 มิลลิลิตร
4. แท่งแก้วคนสาร
5. เทอร์โมมิเตอร์ 100°C
6. กระจกนาฬิกาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
7. ตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

8. แท่งแม่เหล็กกวนสารขนาดความยาว 2 เซนติเมตร
9. ปีเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
10. กระดาษกรองเบอร์ 4
11. ตู้อบ (hotbox oven size 2) รุ่น GALLENKAMP บริษัท ไทยโพลีเมติก จำกัด
12. เตาไมโครเวฟ ยี่ห้อซัมซุง รุ่น SKU ME711K/XST
13. แม่พิมพ์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆของผงเซลลูโลสและเซลลูโลสดัดแปร
เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆของเซลลูโลสและเซลลูโลสดัดแปร
แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆของเซลลูโลสและเซลลูโลสดัดแปร

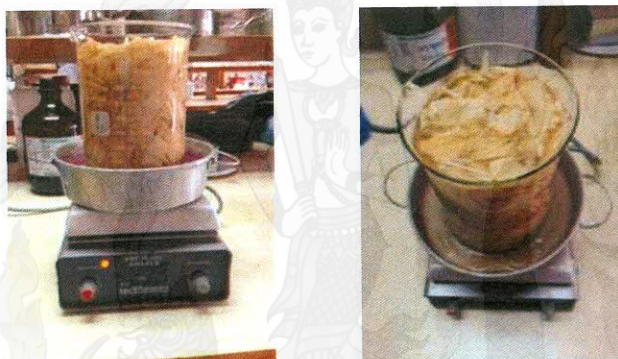
การทดสอบ	เครื่องมือ	รุ่น
โครงสร้างทางเคมี และ สมบัติทางกายภาพ	- พูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)	Spectrum RX
	- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	SEM:JEOL:JSM-5410LV
สมบัติทางความร้อน	- ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริ มิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)	PYRIS Diamond DSC
	- เทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)	Thermoplus TG8120
สมบัติเชิงกล	- Universal Testing Machine, UTM	LF PLUS Tensile Taster

ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน ซึ่งมีรายละเอียดของการทดลองดังต่อไปนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดเป็นขั้นตอนของการกำจัดลิกนิน (Delignification) และการฟอกขาว (Bleaching) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ต้มเปลือกข้าวโพดเป็นชิ้นเล็กๆ นำเปลือกข้าวโพดต้ม (Pre-treatment) ด้วยน้ำกลั่น 100°C โดยที่เติมน้ำกลั่นให้ท่วมเปลือกข้าวโพด ต้มนาน 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วนำไปกรอง ดังภาพที่ 14 ซึ่งแสดงการต้มเปลือกข้าวโพดด้วยน้ำกลั่น



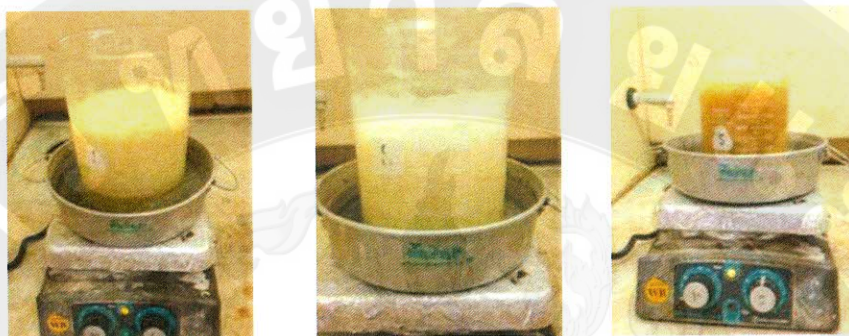
ภาพที่ 14 การต้มเปลือกข้าวโพดด้วยน้ำกลั่น

- ต้มเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลาย 0.5 M NaOH ที่อุณหภูมิ 100°C ต้มนาน 4 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นนำไปกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดลิกนิน จะได้เปลือกข้าวโพดที่ถูกกำจัดลิกนินออกไปและมีลักษณะคล้ายเส้นใยเรียกว่าเยื่อเปลือกข้าวโพด การทำเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วย แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การทำเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- นำเยื่อเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการกำจัดลิกนินมาต้มและคนเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลาย 5% v/v H_2O_2 ในสารละลาย 0.5 M NaOH เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อทำการฟอกขาวเส้นใยเปลือกข้าวโพด จากนั้นนำไปกรองและล้างสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และด่างออกด้วยน้ำกลั่น แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การฟอกขาวเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วย 5% v/v H_2O_2 ใน 0.5 M NaOH

- ทำการย่อยเยื่อเปลือกข้าวโพดที่ได้จากขั้นตอนการฟอกขาวโดยนำมาต้มด้วยสารละลายกรด HCl 2N ที่จุดเดือด เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นนำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ล้างมีความเป็นกลาง ทดสอบด้วยการกระดาษวัดค่า pH แสดงดังภาพที่ 17 นำผลิตภัณฑ์หลังการกรองที่ได้ไปอบแห้งในที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 คืน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงเซลลูโลส ลักษณะหยาบจึงต้องนำมาบดเพื่อให้ได้ผงเซลลูโลสที่ละเอียดยิ่งขึ้น เซลลูโลสที่บดละเอียดแล้ว แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 การย่อยเยื่อเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก



ภาพที่ 18 ผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด

- จากนั้นทำการหาปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในเปลือกข้าวโพด (% Cellulose content) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 1 ดังนี้คือ

$$\% \text{ Cellulose content} = \frac{\text{น้ำหนักผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่สกัดได้ (g)}}{\text{น้ำหนักเปลือกข้าวโพดแห้งก่อนการสกัด (g)}} \times 100 \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2 การดัดแปรเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด มีรายละเอียดดังนี้

- นำผงเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนที่ 1 แล้วจำนวน 2 กรัม มาละลายในตัวทำละลายโทลูอินจำนวน 50 มิลลิลิตร ทำการคนด้วยการเปิด Stirrer เป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นปรับอุณหภูมิให้ได้ 80°C แล้วจึงเติมลอโรอิลคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร และใช้ไพรีดีน 5 มิลลิลิตรเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการปั่นกวนเซลลูโลสในของผสมโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยมีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C
- หลังจากครบ 12 ชั่วโมงแล้ว หยุดปฏิกิริยาด้วยการตกตะกอนและล้างผงเซลลูโลสดัดแปรด้วยเอทานอล หลังจากนั้นทำการและล้างกรองผงเซลลูโลสดัดแปรที่สังเคราะห์ได้ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ชั่งน้ำหนักผงเซลลูโลสดัดแปรที่ได้หลังจากนั้นเก็บผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรแล้วลงในโถดูดความชื้น (Desicator) ทำการคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น (% Weight Increase) ได้จากสมการ 2

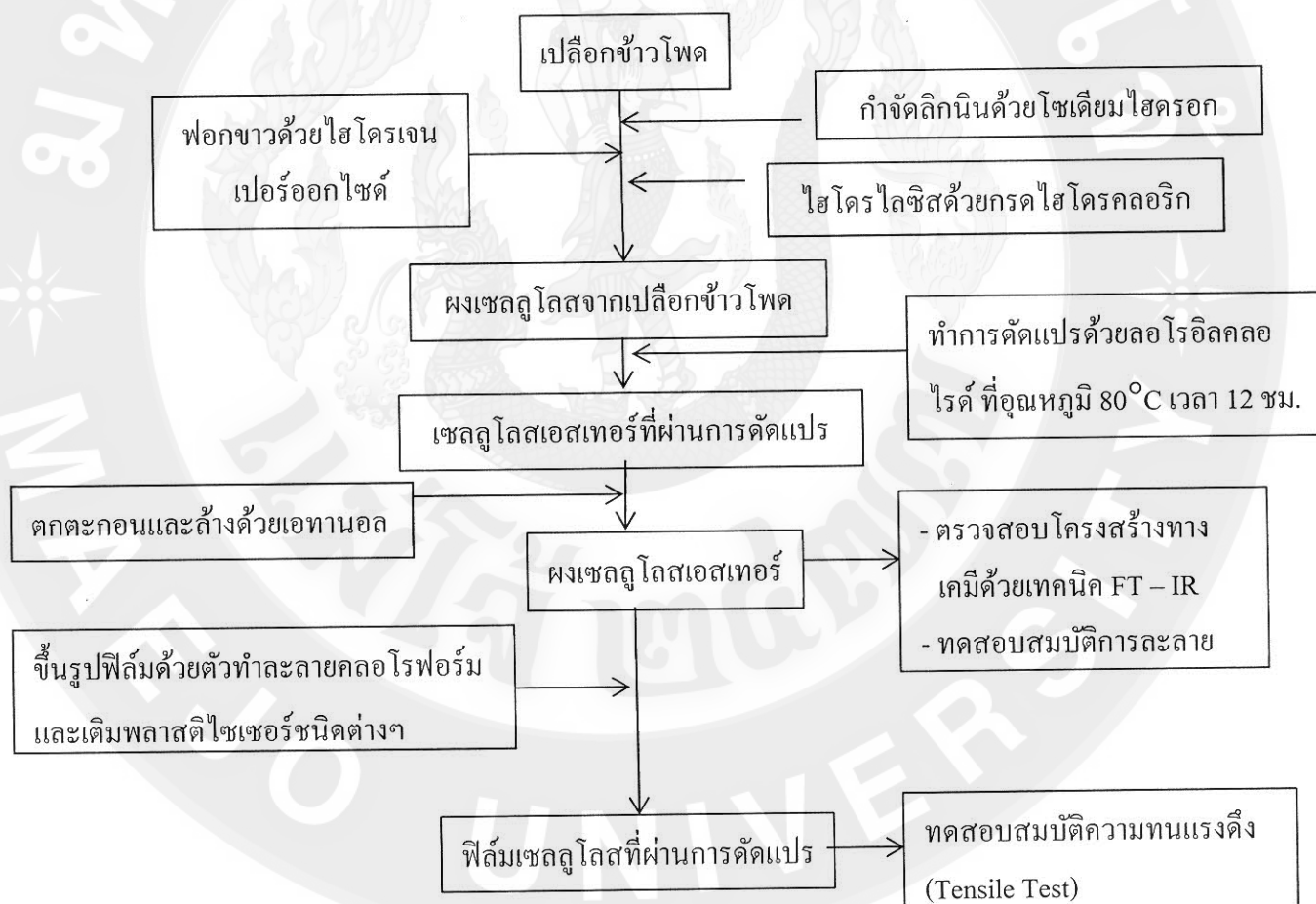
$$\% \text{ Weight increase} = \frac{\text{น้ำหนักเซลลูโลสหลังดัดแปร (g)} - \text{น้ำหนักเซลลูโลสก่อนดัดแปร (g)}}{\text{น้ำหนักเซลลูโลสก่อนดัดแปร (g)}} \times 100 \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มเซลลูโลสตัดแปร

นำผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรแล้วซึ่งมาประมาณ 2 กรัม ละลายในสารละลายคลอโรฟอร์ม 20 มิลลิลิตร คนให้ผงเซลลูโลสตัดแปรละลายในคลอโรฟอร์ม จากนั้นจึงทำการเติมพลาสติกไซเซอร์คือกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้คือ 0 1 2 4 6 8 และ 10 %w/w เทียบกับน้ำหนักแห้งของผงเซลลูโลสเอสเตอร์นำมาเทขึ้นรูปในแม่พิมพ์แก้ว ทำการทดลองซ้ำตามข้อ โดยเปลี่ยนชนิดของพลาสติกไซเซอร์ จากกลีเซอรอลเป็นไตรเอทิลซิเตทและไดบิวทิลพทาเต

สำหรับขั้นตอนการทดลองโดยรวมของการสังเคราะห์เซลลูโลสเอสเตอร์และการเตรียมฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรจากเปลือกข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่

19



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทดลองโดยรวมของการเตรียมฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรจากเปลือกข้าวโพด

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของผงเซลลูโลสดัดแปร

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)

นำผงเซลลูโลสที่ผ่านการดัดแปรแล้วผสมเข้ากับ KBr ในโริงบดสารในอัตราส่วน 1:10 โดยให้เซลลูโลสมีความเข้มข้น ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียด จากนั้นใส่ผงเซลลูโลสกับ KBr ที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ 15,000 กิโลกรัม 1-2 นาที จึงถอดตัวประกอบแม่พิมพ์ออก เซลลูโลสจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส และจะกระจายอยู่บน KBr จากนั้นนำไปตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$

การหาอัตราการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส

การหาระดับการแทนที่ที่สามารถหาได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$DS (\text{ester linkage}) = \frac{A_{1744}}{A_{1071}} \quad (3)$$

โดยที่ A_{1744} เป็นค่าของพื้นที่ใต้พีคของพันธะเอสเทอร์ ที่ความยาวคลื่น 1744 cm^{-1}
 A_{1071} เป็นค่าของพื้นที่ใต้พีคของ C-O ของวงน้ำตาล ที่ความยาวคลื่น 1071 cm^{-1}

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

นำผงเซลลูโลสที่ผ่านการดัดแปรแล้วมาละลายในเอทานอล หยดเซลลูโลสลงบนแท่นติดสารตัวอย่าง นำไปอบเพื่อให้เอทานอล ระเหยออกไปจากนั้นนำไปเคลือบด้วยทองที่ความหนา 15 นาโนเมตร และทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กระแส 5 กิโลโวลต์ ปรับกำลังขยายและความคมชัดของภาพที่แสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ บันทึกภาพที่ได้

สมบัติการละลายของผงเซลลูโลสดัดแปร

ทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสโดยใช้ตัวทำละลาย 5 ชนิด คือ โทลูอีน (Toluene), คลอโรฟอร์ม (Chloroform), ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane), อะซิโตน (Acetone) และไดเมทิลอะซิโนไพรดีน (DMAc) โดยใช้ปริมาณของเซลลูโลสดัดแปร 0.1 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 10 มิลลิลิตร โดยทำการละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที สังเกตการณ์ละลายของผงเซลลูโลสดัดแปรและบันทึกผล

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัว

วิเคราะห์และตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของผงเซลลูโลสก่อนและหลังการดัดแปร ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis : TGA) โดยการนำสารตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการให้ความร้อนด้วยอัตราเร็ว 10°C ต่อ 1 นาที โดยให้อุณหภูมิจาก 25°C ไปจนถึง 600°C ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนและช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสโดยดูจากน้ำหนักที่หายไปของเซลลูโลส

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการหลอมเหลว

วิเคราะห์และตรวจสอบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการหลอมเหลวของผงเซลลูโลสก่อนและหลังการดัดแปร ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 5-10 มิลลิกรัม มาบรรจุในถาดอะลูมิเนียม (Aluminium pan) จากนั้นจึงทำการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25°C ถึง 150°C อัตราในการให้ความร้อน 10°C ต่อ 1 นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

การทดสอบสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร

การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 โดยใช้ฟิล์มที่มีขนาด 0.8×7.5 เซนติเมตร ใช้ระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นส่วนทดสอบ 5 เซนติเมตร และทำการดึงด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาทีด้วยแรง 50 นิวตัน แล้วรายงานค่าความทนแรงดึง ค่ามอดูลัสและค่าร้อยละการยืดตัวที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัยในส่วนของงานวิจัยในปีงบประมาณ 2558 ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อเนื่องมาจากงานวิจัยในปีงบประมาณ 2557 โดยที่งานวิจัยที่จะนำเสนอต่อไปนี้มีวัตถุประสงค์ของการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์เซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพด โดยใช้พลังงานความร้อนด้วยวิธีปกติ คือการให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer) เพื่อนำเซลลูโลสเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นพลาสติกที่ใช้ทดแทนพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเคมี ในการทดลองนี้เราจะทำการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด จากนั้นนำเซลลูโลสที่ได้ไปดัดแปรโครงสร้างทางเคมีที่ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงเซลลูโลสดัดแปรที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงเซลลูโลสดัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และทดสอบสมบัติการละลาย จากนั้นนำผงเซลลูโลสดัดแปรที่สังเคราะห์ได้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย (Solvent casting) และทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และ ไตรเอทิลซิเตรต ที่ความเข้มข้น 0 1 2 4 6 8 และ 10 %w/w เทียบกับน้ำหนักแห้งของผงเซลลูโลสเอสเทอร์ เพื่อทำการศึกษาถึงผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้ โดยผลการวิเคราะห์และทดสอบต่างๆ แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

1. การหาปริมาณเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด (% Cellulose content)

การทดลองนี้ทำการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสและใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกในการย่อยเซลลูโลส ในการทำการทดลองใช้เปลือกข้าวโพดแห้งครั้งละ 100 กรัม จากนั้นทำการหาปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในเปลือกข้าวโพด (% Cellulose content) จากสมการ (1)

จากสมการ (1) สามารถหาปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในเปลือกข้าวโพด โดยผลการทดลองแสดงดังตาราง 3

ตาราง 3 น้ำหนักเปลือกข้าวโพดแห้ง น้ำหนักผงเซลลูโลสที่สกัดได้ และปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในเปลือกข้าวโพด

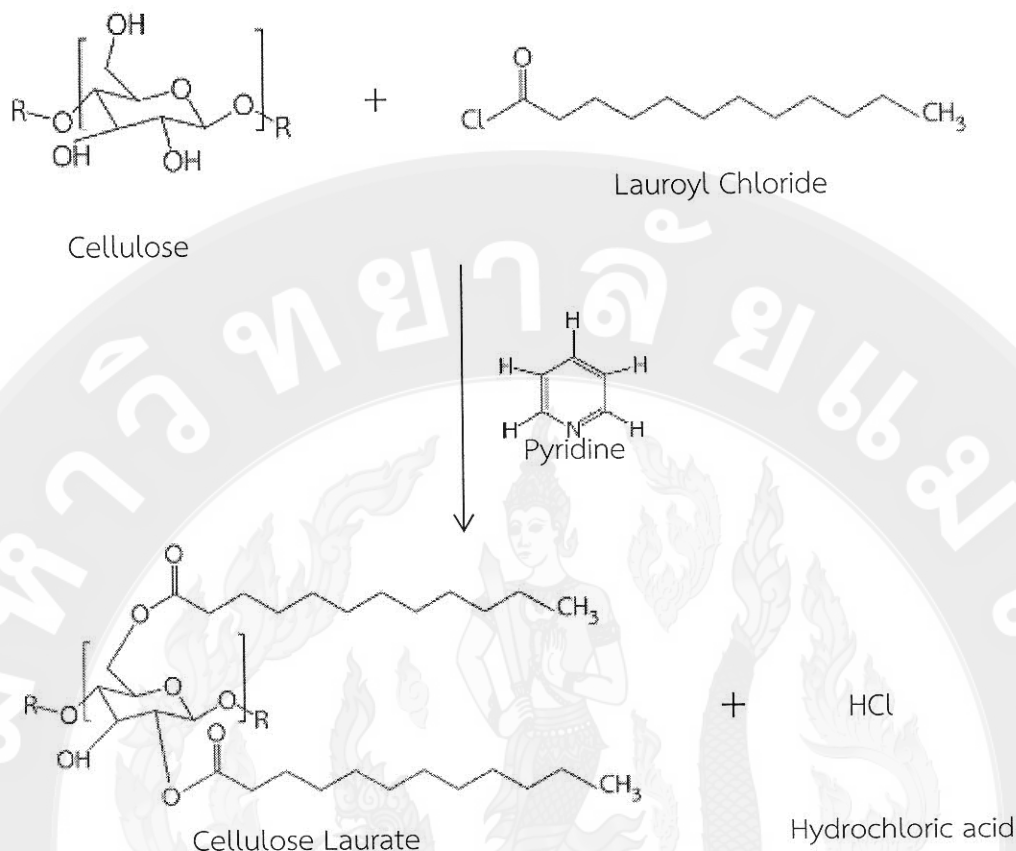
การทำปฏิกิริยา ครั้งที่	น้ำหนักเปลือก ข้าวโพดแห้ง (กรัม)	น้ำหนักผงเซลลูโลส ที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละปริมาณเซลลูโลสที่อยู่ใน เปลือกข้าวโพด
1	100	23.10	23.10
2	100	25.46	25.46
3	100	24.63	24.63
4	100	23.14	23.14
5	100	25.92	25.92
6	250	63.73	25.49
7	250	65.24	26.10
เฉลี่ย	-	-	24.83
SD	-	-	1.26

จากการทดลองสกัดเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดแห้งเป็นจำนวน 7 ครั้ง จะได้ค่าเฉลี่ยของร้อยละปริมาณเซลลูโลสที่อยู่ในเปลือกข้าวโพดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 24.83

2. การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและค่าร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%Weight Increase)

ปฏิกิริยาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสด้วยลอโรอิลคลอไรด์แสดงดังภาพที่ 20 โดยในการทดลองนี้ใช้สภาวะ คือ ใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทดลอง 12 ชั่วโมง ภายหลังจากดัดแปรโครงสร้างทางเคมีจะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสมีการเปลี่ยนแปลง โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้น คือเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ของกรดไขมันชนิดลอโรอิลคลอไรด์ และมี ไพรีดินเป็นตัวเร่ง ได้ผลิตภัณฑ์คือเซลลูโลสเอสเทอร์ชนิดเซลลูโลสลอเรต (Cellulose laurate)

จากปฏิกิริยา (ภาพที่ 20) จะเห็นได้ว่า สายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์เข้าไปแทนที่ที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสเกิดเป็นเซลลูโลสลอเรต ซึ่งการแทนที่ของสารดัดแปรส่งผลทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเซลลูโลสลดลง และทำให้เซลลูโลสภายหลังจากดัดแปรมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิม



ภาพที่ 20 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของเซลลูโลส

ทั้งนี้การคำนวณหาค่าร้อยละน้ำหนักเซลลูโลสดัดแปรที่เพิ่มขึ้น (%Weight increase) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

จากสมการ 2 สามารถหาค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสดัดแปรได้ โดยผลการทดลองแสดงดังตาราง 4 ซึ่งจากตาราง 4 ผลการทดลองพบว่าเซลลูโลสดัดแปรที่มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 152.47

ตาราง 4 น้ำหนักของเซลลูโลสก่อนและหลังตัดแปรร และร้อยละน้ำหนักเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น

การทำปฏิกิริยา ครั้งที่	น้ำหนักเซลลูโลสก่อน ตัดแปรร (กรัม)	น้ำหนักเซลลูโลสหลัง ตัดแปรร (กรัม)	ร้อยละน้ำหนัก เซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น
1	2.00	5.07	153.5
2	2.00	5.53	176.5
3	2.00	4.80	140.0
4	2.00	5.24	162.0
5	2.00	5.08	154.0
6	2.00	5.01	150.5
7	2.00	4.72	136.0
8	2.00	4.95	147.5
9	2.00	4.67	133.5
10	2.00	5.28	164.0
11	2.00	4.93	146.5
12	2.00	4.51	125.5
13	2.00	5.32	166.0
14	2.00	5.51	175.5
15	2.00	5.12	156.0
เฉลี่ย	2.00	5.05	152.47
SD	0	0.30	14.90

3. การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส และเซลลูโลสตัดแปรรจากเปลือกข้าวโพดทำได้โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการที่ว่าหมู่ฟังก์ชันของสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและอินฟราเรด

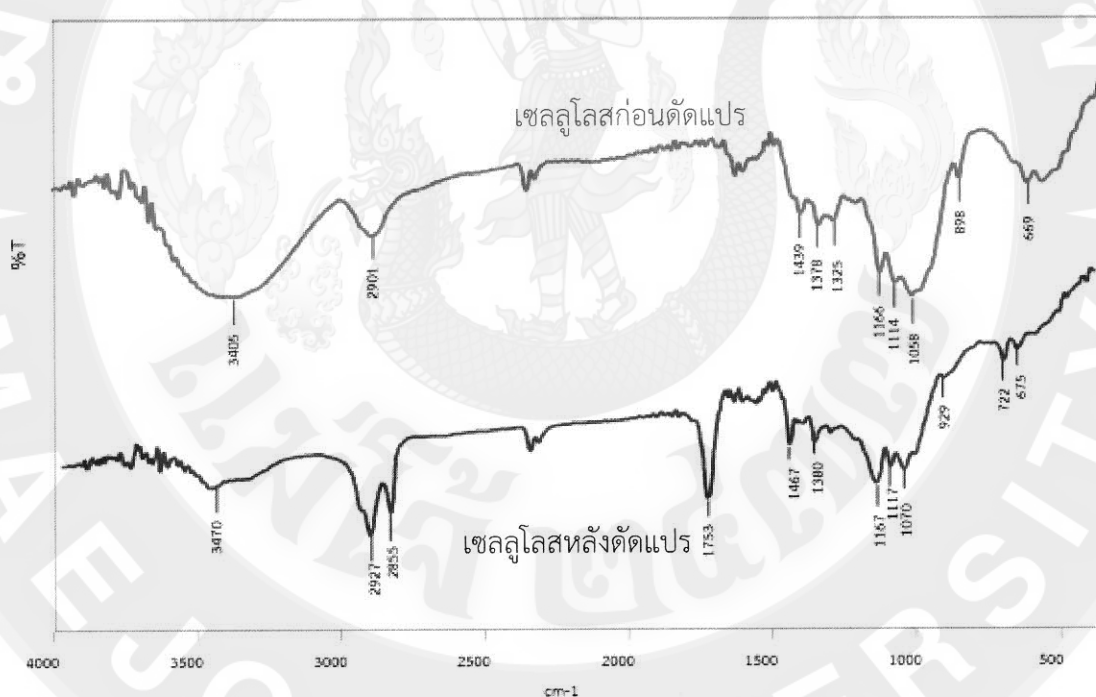
สเปกตรัมของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปร (เซลลูโลส) และเปลือกข้าวโพดหลังดัดแปร (เซลลูโลสลดเรต) แสดงดังตาราง 5 และอินฟราเรดสเปกตรัมภาพที่ 21

ตาราง 5 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปรและหลังดัดแปร

ตัวอย่าง	Wavenumber (cm ⁻¹)	Band Assignments
เซลลูโลส	3405	Alcohol -OH stretching
	2901	Alkyl C-H stretching
	1439, 1378, 1325	C-H bending
	1166, 1114	C-O-C stretching
	1058	C-O stretching
	898	β- glucosidic bond
	669	O-H bending
เซลลูโลสลดเรต	3470	Alcohol -OH stretching
	2927, 2855	Alkyl C-H stretching
	1753	Ester C=O stretching
	1467	CH ₂ Bending
	1380	C-H bending
	1167, 1117	C-O-C stretching
	1070	C-O stretching
	929, 722	β- glucosidic bond
	675	O-H bending

จากภาพที่ 21 จะเห็นว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปร แสดงพีคที่เด่นชัดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่ตำแหน่ง 3405 cm⁻¹ และพีค C-H stretching ของ CH₂ ที่ตำแหน่ง 2901 cm⁻¹

ในขณะที่ภายหลังตัดแปรงเซลลูโลสด้วยสารดัดแปรงลอโรอิลคอลลอยด์แล้ว จะเห็นความแตกต่างของพิกัดขึ้นอย่างชัดเจน 3 ตำแหน่ง โดยพบว่า พิกัดตำแหน่ง 3470 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างเซลลูโลสมีความสูงของพิกัดต่ำลง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสลดจำนวนลงเพราะถูกแทนที่ด้วยสายโซ่ของลอโรอิลคอลลอยด์ นอกจากนี้สเปกตรัมของเซลลูโลสเอสเทอร์ยังแสดงตำแหน่งของพิกัดที่เด่นชัด คือที่ตำแหน่ง 2855 และ 2927 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่เมทิล (C-H stretching) ในสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคอลลอยด์ที่เพิ่มเข้ามาและเซลลูโลสหลังการดัดแปรงยังแสดงพิกัดที่สำคัญที่ตำแหน่ง 1753 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของลอโรอิลคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสารดัดแปรงที่เข้ามาแทนที่ตรงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลส ผลการทดลองจากอินฟราเรดสเปกตรัมนี้ จึงเป็นการยืนยันได้ว่าการดัดแปรงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ลอโรอิลคอลลอยด์เป็นสารดัดแปรงนี้เกิดขึ้นจริง



ภาพที่ 21 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซลลูโลสก่อนการดัดแปรงเปรียบเทียบกับเซลลูโลสภายหลังการดัดแปรง

4. ระดับการแทนที่ (Degree of substitution; DS) ของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส

สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพันธะเอสเทอร์ (C=O) ที่มีความยาวคลื่น 1753 cm^{-1} และพื้นที่ใต้พีคการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ C-O ของวงน้ำตาลในโมเลกุลของเซลลูโลสที่มีความยาวคลื่น 1070 cm^{-1} จากสมการ (3)

จากผลการคำนวณพื้นที่ใต้พีค ณ ตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาค่า DS ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{DS (ester linkage)} &= \frac{1075.55}{577.66} \\ &= 2.04\end{aligned}$$

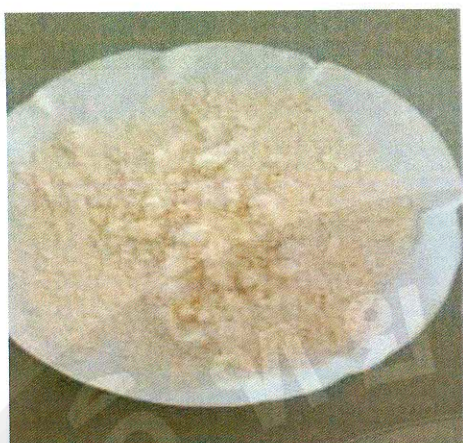
ดังนั้นค่าระดับการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส เท่ากับ 2.04

5. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะทางกายภาพเมื่อมองด้วยตาเปล่าของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด (ก) ก่อนดัดแปร และ (ข) หลังดัดแปร จากรูปจะเห็นว่าเมื่อมองด้วยตาเปล่าเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปรจะมีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ส่วนเซลลูโลสหลังการดัดแปรด้วยลอไรลคลอไรด์แล้วจะพบว่ามีลักษณะเป็นผงฟูสีคล้ำลงกว่าเดิม

เมื่อนำผงเซลลูโลสตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการดัดแปรไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดผลแสดงภาพที่ 23 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดแตกต่างกัน ภาพที่ 23 (ก) พบว่าเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปรมีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) หรือเป็นแท่งสั้นๆ มีขนาดความกว้าง $20\text{--}22\text{ }\mu\text{m}$ และมีความยาวประมาณ $109\text{--}111\text{ }\mu\text{m}$

ในขณะที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสหลังการดัดแปรแสดงดังภาพที่ 23 (ข) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสก่อนการดัดแปรกับเซลลูโลสภายหลังจากการดัดแปรที่กำลังขยายเท่ากัน จะพบว่าเซลลูโลสดัดแปรจะมีลักษณะที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีพื้นผิวที่ขรุขระ คือมีขนาดความกว้าง $26\text{--}27\text{ }\mu\text{m}$ และมีความยาว $144\text{--}146\text{ }\mu\text{m}$ ทั้งนี้เนื่องมาจากการแทนที่ของสารดัดแปรในหมู่ไฮดรอกซิลภายในโครงสร้างของเซลลูโลส ส่งผลให้เซลลูโลสดัดแปรมีลักษณะเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีพื้นผิวที่ขรุขระขึ้นนั่นเอง



(ก)



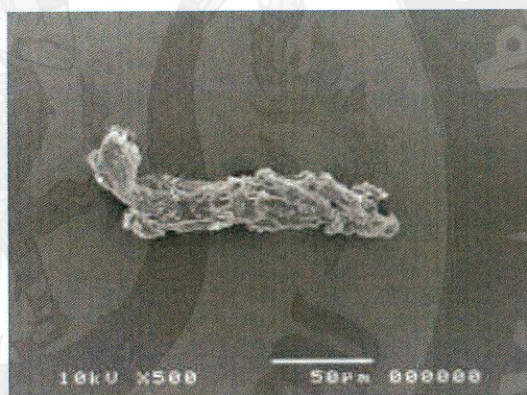
(ข)

ภาพที่ 22 ลักษณะผงเซลลูโลสที่สกัดได้จากเปลือกข้าวโพดเมื่อสังเคราะห์ด้วยตาเปล่า

(ก) ก่อนการดัดแปร และ (ข) หลังการดัดแปร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงเซลลูโลสที่สกัดได้จากเปลือกข้าวโพดโดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning Electron Microscopy) (ก) ก่อนการดัดแปร และ (ข) ภายหลังการดัดแปร

6. การทดสอบสมบัติการละลาย (Solubility Test)

เพื่อหาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเซลลูโลสดัดแปรเป็นแผ่นฟิล์มจึงทำการทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสดัดแปรด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ โดยผลการทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสก่อนและหลังดัดแปรโครงสร้างทางเคมี แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 ความสามารถในการละลายของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดและเซลลูโลสภายหลังตัดแปรในทำตัวละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	เซลลูโลสก่อนการตัดแปร	เซลลูโลสหลังการตัดแปร	
		อุณหภูมิห้อง	60°C
ตัวทำละลายไม่มีขี้	Chloroform	-	-
	Toluene	-	-
	Hexane	-	-
	Dichloromethane	-	-
ตัวทำละลายมีขี้	Ethanol	-	-
	Methanol	-	-
	Acetone	-	-
	Dimethylacetamide	-	-
ไม่ใช่ตัวทำละลายอินทรีย์	Sodium hydroxide	-	-
	Hydrochloric acid	-	-
	water	-	-

* โดยใช้ปริมาณเซลลูโลสก่อนตัดแปรหรือเซลลูโลสตัดแปร 10 mg ละลายในตัวทำละลาย 1 ml

** สัญลักษณ์ ++ หมายถึง ละลายได้ดี + ละลายบางส่วน และ - ไม่ละลาย

จากการทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสตัดแปรด้วยตัวทำละลาย 11 ชนิด แบ่งเป็นตัวทำละลายชนิดไม่มีขี้ 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม โทลูอีน เฮกเซน ไดคลอโรมีเทน ตัวทำละลายชนิดมีขี้ 4 ชนิด ได้แก่ เอทานอล เมทานอล อะซิโตน ไดเมทิลอะเซตาไมด์ และสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริกและน้ำ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60°C เมื่อเทียบระหว่างเซลลูโลสก่อนตัดแปรและเซลลูโลสภายหลังการตัดแปร ผลการทดลองพบว่าเซลลูโลสก่อนการตัดแปรไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60°C นั้นเป็นเพราะหมู่ไฮดรอกซิลที่มีจำนวนมากในโครงสร้างของเซลลูโลสจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลส่งผลให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง เซลลูโลสจึงไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไปได้ เมื่อเราสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลได้ โดยการตัดแปร โครงสร้างกับลอโรอิลคลอไรด์ก็จะได้เซลลูโลสที่มีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น โดยเซลลูโลสภายหลังการตัดแปรแล้ว

สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกสายโซ่ของสารคัดแปรลอโรอิลคอลลอยด์เข้ามาแทนที่ ทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนและความมีขั้วของเซลลูลอสลดลง จึงสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและพบว่าคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุด

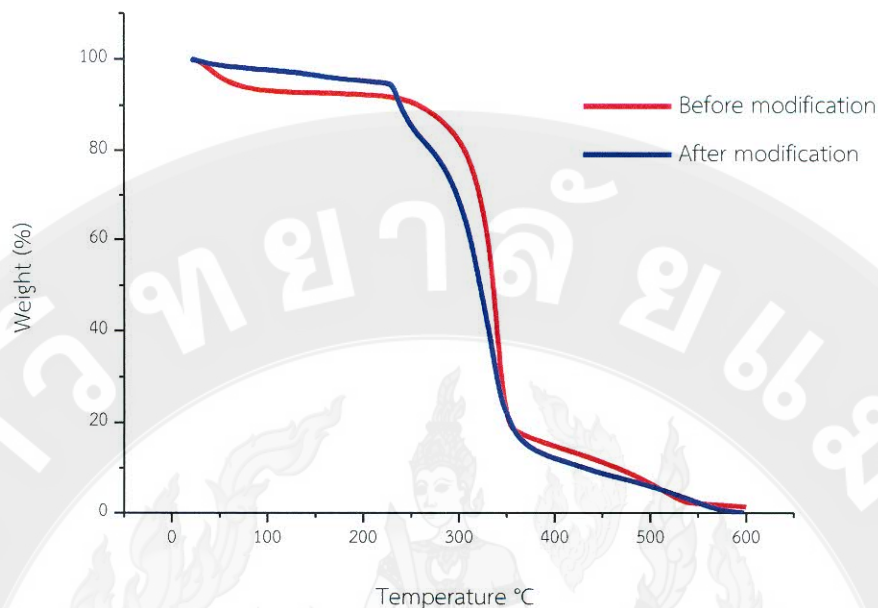
ในการขึ้นรูปเซลลูลอสคัดแปรเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกจึงเลือกใช้ตัวทำละลายเป็นคลอโรฟอร์ม เนื่องจากคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และสามารถละลายเซลลูลอสได้ดี

7. การทดสอบสมบัติทางความร้อนของผงเซลลูลอสก่อนและหลังการคัดแปร

7.1 เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)

อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature; T_d) ของเซลลูลอสก่อนและหลังคัดแปรจากเปลือกข้าวโพด สามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (TGA) โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ ให้อุณหภูมิตั้งแต่ 25-600°C อัตราการให้ความร้อนที่ 10°C/นาที ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่น้ำหนักของเซลลูลอสหายไป 5% (Thermal degradation temperature at 5% weight loss, T_{d5}) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังเทอร์โมแกรมภาพที่ 24

จากเทอร์โมแกรมของผงเซลลูลอสจากเปลือกข้าวโพดก่อนคัดแปรและหลังคัดแปรพบว่า ผงเซลลูลอสก่อนการคัดแปรมีการสูญเสียน้ำหนักสองช่วง คือช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C (ประมาณ 60°C) เกิดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในโครงสร้างของเซลลูลอส หลังจากนั้นจะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ เซลลูลอสจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักในช่วงที่สอง คือที่อุณหภูมิ 235°C ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิการสลายตัว (T_{d5}) ของเซลลูลอสจากเปลือกข้าวโพดก่อนการคัดแปร สำหรับผงเซลลูลอสจากเปลือกข้าวโพดภายหลังการคัดแปรพบว่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่สองช่วง ไม่พบการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างถูกแทนที่ด้วยสารคัดแปรลอโรอิลคอลลอยด์ การดูดความชื้นจึงน้อยลง ในการทดลองพบอุณหภูมิการสลายตัวช่วงแรกที่อุณหภูมิ 216°C เป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการสลายตัวของสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคอลลอยด์ และช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 272°C เป็นช่วงที่เซลลูลอสคัดแปรเกิดการสลายตัว

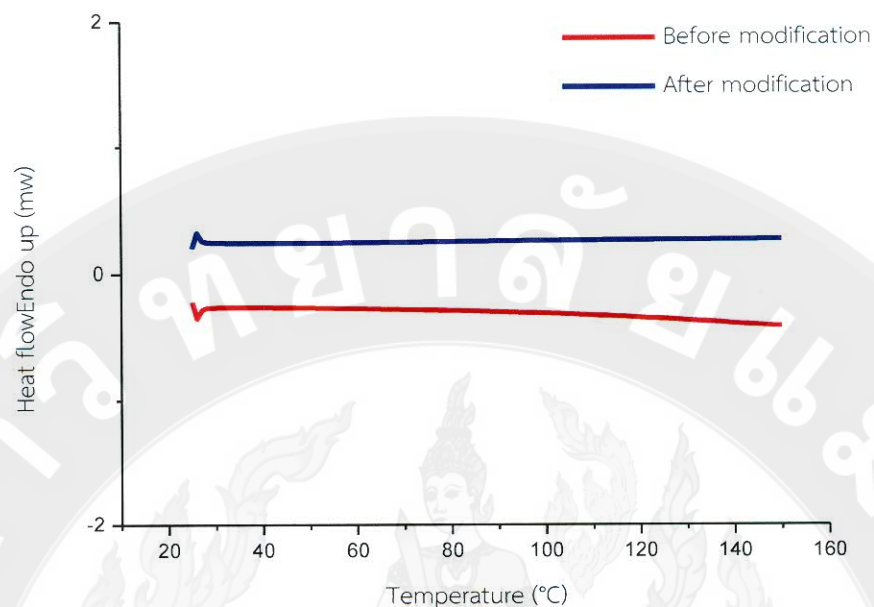


ภาพที่ 24 เทอร์โมแกรมอุณหภูมิการสลายตัวของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปรและหลังดัดแปร

จากผลการทดลองพบว่าภายหลังการดัดแปร เซลลูโลสมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลง โดยพบว่าเซลลูโลสภายหลังการดัดแปรมีอุณหภูมิการสลายตัว (T_{d5}) ที่ต่ำกว่าเซลลูโลสก่อนดัดแปรประมาณ 19°C นอกจากนี้ยังพบว่าผงเซลลูโลสทั้งก่อนและหลังการดัดแปรเกิดการสลายตัวหมดไม่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเหลืออยู่หลังจากการให้ความร้อนจนถึง 600°C

7.2 เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนการดัดแปรและภายหลังการดัดแปรสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ $25-150^{\circ}\text{C}$ ให้ความร้อนด้วยอัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 DSC เทอร์โมแกรมของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนและหลังดัดแปร

ภาพที่ 25 แสดงเทอร์โมแกรมของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนและหลังดัดแปร จากทฤษฎีการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) จะพบในโครงสร้างของพอลิเมอร์ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) เท่านั้น และจะไม่พบ T_g ในส่วนโครงสร้างที่มีความเป็นผลึก ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) จะพบในส่วนที่โครงสร้างมีความเป็นผลึก จากการทดลองพบว่าผงเซลลูโลสก่อนการดัดแปรไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของเทอร์โมแกรมตลอดช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือไม่พบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และไม่พบอุณหภูมิการหลอมเหลว เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสก่อนดัดแปรมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้มีความเป็นผลึกสูง จึงอาจทำให้ไม่พบ T_g และนอกจากนี้ยังไม่สามารถพบ T_m ของเซลลูโลสได้ อาจเพราะเซลลูโลสมีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองและนอกจากนี้อาจเกิดการสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลวของเซลลูโลส อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นร่างแหด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส

สำหรับเซลลูโลสภายหลังการดัดแปรนั้นคาดว่าจะพบ T_g เนื่องจากโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปจากการถูกแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลด้วยสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์ ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีความเป็นกึ่งผลึก (Semi-crystalline) มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบเช่นกัน จึงคาดว่าเซลลูโลสดัดแปรนี้

ยังคงมีอุณหภูมิการหลอมเหลวใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัว เช่นเดียวกับผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนการดัดแปร

8 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร

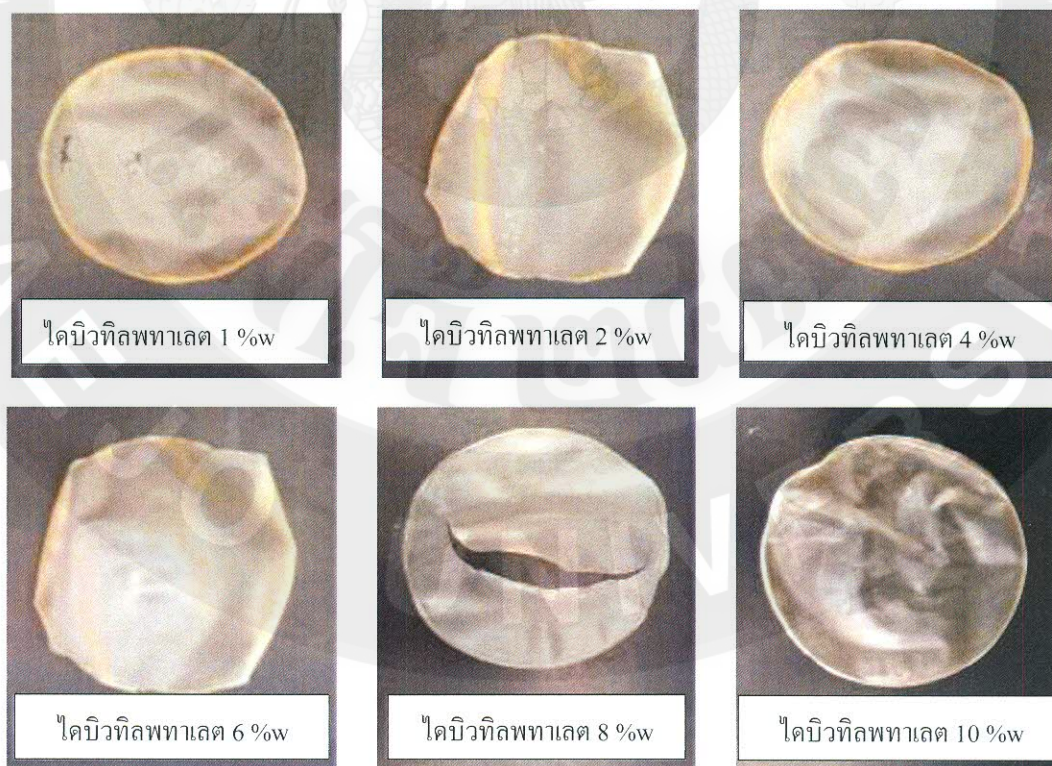
ภายหลังจากการขึ้นย่นโครงสร้างเซลลูโลสดัดแปรแล้ว ผงเซลลูโลสดัดแปรจากเปลือกข้าวโพดที่เตรียมได้จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting) โดยการละลายในคลอโรฟอร์ม จากนั้นเติมพลาสติกไซเซอร์คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และ ไตรเอทิลซีเตรต ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 1 2 4 6 8 และ 10 % w/w ตามลำดับ แล้วทำการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายในงานเพาะเชื้อ ผลการทดลองพบว่าลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์จะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มผิวเรียบ สีขาวนุ่น มีฟองอากาศเล็กน้อยซึ่งแสดงดังภาพที่ 26 และลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เติม พลาสติกไซเซอร์ทั้ง 3 ชนิด คือกลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และ ไตรเอทิลซีเตรต ฟิล์มจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองนุ่น มีพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ และม้วนงอ และจะมีพลาสติกไซเซอร์เยิ้มออกมาบริเวณผิวของแผ่นฟิล์มเมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 27 28 และ 29 ตามลำดับ



ภาพที่ 26 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 27 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 28 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรที่ใช้ไคบิวทิลพทาเลตเป็นพลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 29 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรที่ใช้ไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอร์

9 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสตัดแปร (Tensile Properties)

การทดสอบการทนแรงดึงของฟิล์มที่ได้จากเซลลูโลสตัดแปรจากเปลือกข้าวโพดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 ทำได้โดยตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 7.50×0.80 เซนติเมตร² ดังภาพที่ 30 และทำการวัดความหนาและคำนวณพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม จากนั้นนำเข้าเครื่องทดสอบความทนแรงดึง ใช้ระยะห่างระหว่างตัวจับขึ้นทดสอบ 5 เซนติเมตร และทำการดึงด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งฟิล์มขาดจากกันหลังจากนั้นจึงนำค่าพื้นที่หน้าตัด ค่าแรงดึงของแผ่นฟิล์ม และค่าระยะยืด (แสดงดังตาราง 7) มาคำนวณหาค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus)



ภาพที่ 30 फिल्मเซลลูโลสตัดแปรจากเปลือกข้าวโพดขนาด 7.50 x 0.80 เซนติเมตร

ตาราง 7 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม

พลาสติกไซเซอร์	ฟิล์ม เซลลูโลส	พื้นที่หน้าตัด (m^2)	แรงดึง แผ่นฟิล์ม (N)	ระยะยืด (mm)
ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	1	0.85×10^{-6}	10.27	9.86
	2	0.90×10^{-6}	9.13	7.64
	3	0.85×10^{-6}	8.47	5.68
	SD	0.03×10^{-6}	0.91	2.09
กลีเซอรอล 1 %w	1	3.80×10^{-6}	13.88	13.91
	2	1.35×10^{-6}	9.44	8.28
	SD	1.73×10^{-6}	3.14	3.98
กลีเซอรอล 2 %w	1	1.85×10^{-6}	13.65	14.33
	2	2.15×10^{-6}	9.28	6.76
	SD	0.21×10^{-6}	3.09	5.35
กลีเซอรอล 4 %w	1	1.40×10^{-6}	8.95	5.59
	2	1.10×10^{-6}	8.52	5.61
	3	1.25×10^{-6}	6.82	4.16
	4	0.95×10^{-6}	4.62	1.61
	5	1.15×10^{-6}	4.71	1.61
	6	1.00×10^{-6}	6.41	3.57
	SD	0.17×10^{-6}	1.83	1.80

ตาราง 7 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

พลาสติกไฮเซอร์	ฟิล์ม	พื้นที่หน้าตัด	แรงดึง	ระยะยืด
	เซลลูโลส	(m ²)	แผ่นฟิล์ม (N)	(mm)
กลีเซอรอล 6 %w	1	1.10x10 ⁻⁶	7.42	2.42
	2	1.10x10 ⁻⁶	8.13	3.51
	3	1.10x10 ⁻⁶	8.92	2.99
	4	1.10x10 ⁻⁶	9.65	4.13
	5	1.05x10 ⁻⁶	7.78	2.34
	SD	0.02x10 ⁻⁶	0.90	0.75
กลีเซอรอล 8 %w	1	1.10x10 ⁻⁶	6.98	2.67
	2	1.20x10 ⁻⁶	9.16	2.90
	3	1.00x10 ⁻⁶	7.09	2.31
	4	1.00x10 ⁻⁶	6.74	2.84
	5	1.00x10 ⁻⁶	6.60	2.68
	6	1.05x10 ⁻⁶	7.79	3.37
	SD	0.08x10 ⁻⁶	0.96	0.35
กลีเซอรอล 10 %w	1	1.05x10 ⁻⁶	8.15	4.18
	2	1.30x10 ⁻⁶	7.96	4.42
	3	1.25x10 ⁻⁶	8.18	5.84
	4	3.65x10 ⁻⁶	8.50	6.19
	5	1.20x10 ⁻⁶	8.10	5.12
	6	1.10x10 ⁻⁶	8.32	5.86
	SD	1.01x10 ⁻⁶	0.19	0.83
ไคบิวทิลพทาเลต 1 %w	1	0.95x10 ⁻⁶	11.02	4.90
	2	1.60x10 ⁻⁶	11.76	5.15
	3	1.68x10 ⁻⁶	11.55	4.79
	4	1.28x10 ⁻⁶	10.85	4.51
	5	1.60x10 ⁻⁶	11.12	4.59
	SD	0.30x10 ⁻⁶	0.38	0.25

ตาราง 7 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

พลาสติกไฮเซอร์	ฟิล์ม	พื้นที่หน้าตัด	แรงดึง	ระยะยืด
	เซลลูโลส	(m ²)	แผ่นฟิล์ม (N)	(mm)
ไคบิวทิลพทาเลต 2 %w	1	1.60x10 ⁻⁶	10.20	4.56
	2	2.08x10 ⁻⁶	12.00	6.43
	3	1.76x10 ⁻⁶	12.15	6.25
	4	1.52x10 ⁻⁶	11.52	5.73
	5	1.44x10 ⁻⁶	10.96	5.01
	SD	2.53x10 ⁻⁶	0.80	0.80
ไคบิวทิลพทาเลต 4 %w	1	2.24x10 ⁻⁶	9.64	2.90
	2	2.08x10 ⁻⁶	9.71	5.05
	3	2.48x10 ⁻⁶	10.94	3.54
	4	2.48x10 ⁻⁶	11.50	4.19
	5	2.00x10 ⁻⁶	9.76	4.82
	SD	0.22x10 ⁻⁶	0.85	0.89
ไคบิวทิลพทาเลต 6 %w	1	1.68x10 ⁻⁶	6.78	3.62
	2	1.68x10 ⁻⁶	5.20	1.56
	3	1.84x10 ⁻⁶	7.84	3.65
	4	1.84x10 ⁻⁶	7.69	3.03
	5	1.28x10 ⁻⁶	7.21	5.02
	SD	0.23x10 ⁻⁶	1.06	1.25
ไคบิวทิลพทาเลต 8 %w	1	1.84x10 ⁻⁶	7.60	4.55
	2	1.84x10 ⁻⁶	6.07	2.25
	3	2.16x10 ⁻⁶	9.49	5.07
	4	2.00x10 ⁻⁶	7.73	4.58
	5	1.84x10 ⁻⁶	6.70	3.27
	SD	0.14x10 ⁻⁶	1.29	1.16

ตาราง 7 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

พลาสติกไฮเซอร์	ฟิล์ม	พื้นที่หน้าตัด	แรงดึง	ระยะยืด
	เซลล์โอส	(m ²)	แผ่นฟิล์ม (N)	(mm)
ไคบิวทิลพทาเลต 10 %w	1	1.92x10 ⁻⁶	8.32	8.19
	2	2.32x10 ⁻⁶	8.74	8.83
	3	2.08x10 ⁻⁶	8.31	7.12
	4	2.16x10 ⁻⁶	8.34	7.63
	5	2.08x10 ⁻⁶	7.55	7.00
	SD	0.14x10 ⁻⁶	0.43	0.76
ไตรเอทิลซีเตรต 1 %w	1	1.20x10 ⁻⁶	8.90	4.74
	2	1.28x10 ⁻⁶	8.64	4.29
	3	1.36x10 ⁻⁶	7.42	3.67
	4	1.20x10 ⁻⁶	8.09	4.59
	5	1.36x10 ⁻⁶	8.20	3.57
	SD	0.08x10 ⁻⁶	0.57	0.53
ไตรเอทิลซีเตรต 2% w	1	1.68x10 ⁻⁶	9.94	5.65
	2	1.84x10 ⁻⁶	9.44	3.22
	3	1.84x10 ⁻⁶	9.53	3.41
	4	1.60x10 ⁻⁶	9.90	3.77
	5	1.76x10 ⁻⁶	9.76	3.91
	SD	0.10x10 ⁻⁶	0.22	0.97
ไตรเอทิลซีเตรต 4 %w	1	3.28x10 ⁻⁶	12.35	4.32
	2	1.92x10 ⁻⁶	9.65	5.50
	3	2.32x10 ⁻⁶	9.86	4.02
	4	1.84x10 ⁻⁶	9.30	5.25
	5	2.08x10 ⁻⁶	9.06	4.97
	SD	0.58x10 ⁻⁶	1.32	0.62

ตาราง 7 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

พลาสติกไซเซอร์	ฟิล์ม	พื้นที่หน้าตัด	แรงดึง	ระยะยืด
	เซลลูโลส	(m^2)	แผ่นฟิล์ม (N)	(mm)
ไตรเอทิลไซเตรต 6 %w	1	2.24×10^{-6}	8.27	3.47
	2	2.00×10^{-6}	8.29	3.79
	3	2.00×10^{-6}	7.56	3.56
	4	1.84×10^{-6}	8.77	3.85
	5	1.92×10^{-6}	7.63	3.56
	SD	0.15×10^{-6}	0.51	0.16
ไตรเอทิลไซเตรต 8 %w	1	1.92×10^{-6}	8.71	4.72
	2	1.92×10^{-6}	7.70	3.68
	3	1.84×10^{-6}	7.95	3.67
	4	2.00×10^{-6}	7.90	3.00
	5	2.00×10^{-6}	8.85	4.25
	SD	0.07×10^{-6}	0.52	0.65
ไตรเอทิลไซเตรต 10 %w	1	1.44×10^{-6}	5.40	3.59
	2	1.76×10^{-6}	5.17	2.08
	3	1.68×10^{-6}	6.11	4.25
	4	1.92×10^{-6}	5.75	2.10
	5	2.00×10^{-6}	6.73	3.90
	SD	0.22×10^{-6}	0.62	1.02

จากตาราง 7 เมื่อทราบค่าพื้นที่หน้าตัด (A) ค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม (F) และค่าระยะยืด (ΔL) ของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ชนิดและปริมาณต่างๆ แล้ว สามารถนำไปคำนวณหาค่าความทนแรงดึง (ความเค้น, σ) ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยัง (Y) ได้จากสูตรด้านล่าง โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังตาราง 8-26

$$\text{ความเค้น } (\sigma) = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}}$$

$$\% \text{ Elongation} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป } (\Delta L)}{\text{ความยาวเดิม (L)}} \times 100$$

$$\text{ความเครียด } (\epsilon) = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป } (\Delta L)}{\text{ความยาว (L)}}$$

$$\text{มอดุลัสของยัง (Y)} = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\epsilon)}$$

ตาราง 8 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสชนิดไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	12.08	19.72	353.06
2	10.14	15.28	341.84
3	9.96	11.73	329.61
เฉลี่ย	10.73	15.58	341.50
SD	1.18	4.00	11.73

ตาราง 9 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 1 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	3.65	27.83	89.95
2	6.25	16.57	226.78
เฉลี่ย	4.95	22.20	158.37
SD	1.84	7.96	96.75

ตาราง 10 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่
เติมกลีเซอรอล 2 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	7.38	28.66	108.17
2	4.31	13.52	122.24
เฉลี่ย	5.85	21.09	115.21
SD	2.17	10.71	9.95

ตาราง 11 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่
เติมกลีเซอรอล 4 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	6.39	11.17	219.23
2	7.74	11.21	252.43
3	5.46	8.31	216.71
4	4.86	3.22	337.11
5	4.09	3.23	230.86
6	6.41	7.15	289.87
เฉลี่ย	5.84	7.38	257.70
SD	1.27	3.59	47.43

ตาราง 12 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่
เติมกลีเซอรอล 6 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	โมดูลัสของยัง (MPa)
1	6.74	4.84	450.70
2	7.39	7.03	362.89
3	8.11	5.98	547.60
4	8.78	8.25	395.37
5	7.41	4.68	555.08
เฉลี่ย	7.69	6.16	462.33
SD	0.78	1.51	87.15

ตาราง 13 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
กลีเซอรอล 8 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	โมดูลัสของยัง (MPa)
1	6.98	5.34	394.70
2	7.63	5.81	387.19
3	7.09	4.62	373.89
4	6.74	5.67	321.99
5	6.60	5.36	471.94
6	7.41	6.75	339.38
เฉลี่ย	7.08	5.59	381.52
SD	0.39	0.70	42.46

ตาราง 14 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
กลีเซอรอล 10 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	7.76	10.06	296.38
2	6.12	8.84	249.04
3	6.54	11.69	204.54
4	2.33	12.38	74.39
5	6.75	10.25	247.10
6	7.56	11.73	249.46
เฉลี่ย	6.18	10.83	220.15
SD	1.98	1.33	77.10

ตาราง 15 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
ไดบัวทิวพทาเลต 1 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	11.60	9.80	510.55
2	7.35	10.30	333.50
3	6.87	9.59	331.06
4	8.47	9.02	390.76
5	6.95	9.17	329.10
เฉลี่ย	8.25	9.58	378.99
SD	1.77	0.45	69.72

ตาราง 16 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
ไคบิวทิวพทาเลต 2 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	6.37	9.12	295.55
2	5.77	12.87	256.62
3	6.90	12.49	281.46
4	7.58	11.45	356.59
5	7.61	10.02	332.24
เฉลี่ย	6.84	11.19	304.49
SD	0.71	1.43	35.74

ตาราง 17 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
ไคบิวทิวพทาเลต 4 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	4.03	5.81	215.67
2	4.67	10.01	204.65
3	4.41	7.09	185.07
4	4.64	8.38	186.77
5	4.88	9.65	203.01
เฉลี่ย	4.58	8.20	204.43
SD	0.20	1.59	17.13

ตาราง 18 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
ไคบิวทิวพทาเลต 6 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	4.04	6.51	238.77
2	4.04	7.26	165.15
3	4.21	7.31	218.35
4	4.18	6.07	206.69
5	5.63	8.04	287.02
เฉลี่ย	4.42	7.04	223.20
SD	0.61	0.68	39.95

ตาราง 19 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
ไคบิวทิวพทาเลต 8 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	4.13	9.11	171.80
2	4.39	10.16	196.60
3	3.86	9.17	141.41
4	3.63	6.55	151.84
5	3.51	5.91	160.07
เฉลี่ย	3.90	8.18	164.34
SD	0.32	1.65	18.95

ตาราง 20 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไคบิวทิวพทาเลต 10 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	4.33	16.39	147.31
2	3.77	17.67	135.82
3	3.99	14.26	132.13
4	3.86	15.27	127.44
5	3.63	13.99	139.32
เฉลี่ย	3.92	15.52	136.40
SD	0.24	1.37	6.73

ตาราง 21 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 1 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	7.42	9.49	343.27
2	6.75	8.85	313.94
3	5.46	7.34	333.69
4	6.75	9.18	383.27
5	6.03	7.14	316.40
เฉลี่ย	6.48	8.35	338.11
SD	0.67	0.95	25.06

ตาราง 22 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 2 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	5.92	11.31	268.87
2	5.13	6.45	254.00
3	5.17	6.82	260.55
4	6.19	7.54	287.23
5	5.55	7.81	277.62
เฉลี่ย	5.59	7.98	269.65
SD	0.41	1.73	11.84

ตาราง 23 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 4 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	3.76	8.63	117.72
2	5.02	10.99	243.43
3	4.25	8.04	173.70
4	5.05	10.50	210.87
5	4.35	9.95	164.74
เฉลี่ย	4.49	9.62	194.09
SD	0.49	1.12	29.19

ตาราง 24 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 6 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	3.69	6.94	164.14
2	4.14	7.58	191.85
3	3.78	7.13	189.99
4	4.77	7.70	222.52
5	3.97	7.12	187.91
เฉลี่ย	4.07	7.30	191.28
SD	0.38	0.29	18.58

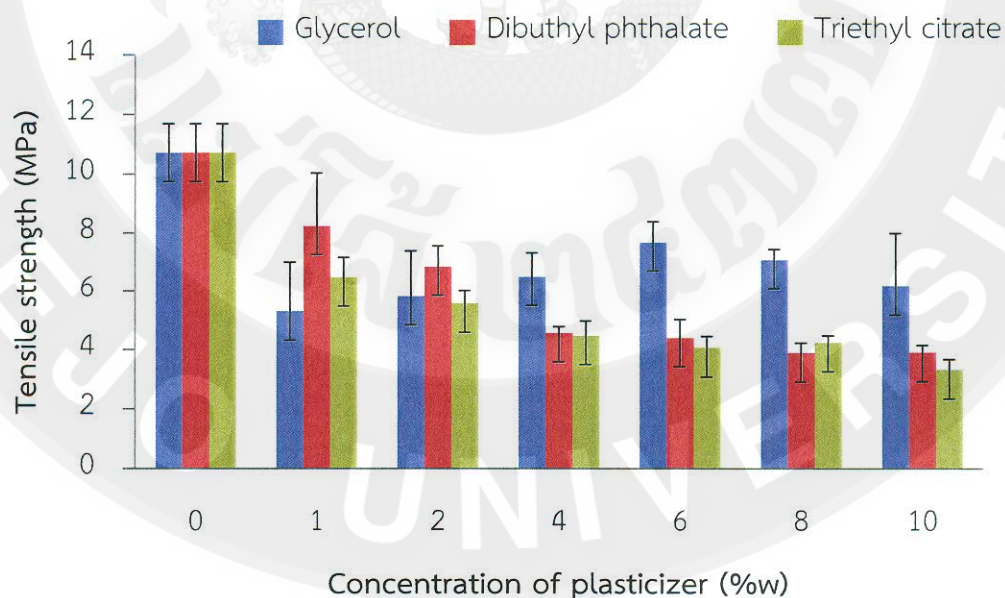
ตาราง 25 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 8 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	4.54	9.43	187.38
2	4.01	7.36	169.79
3	4.32	7.34	195.01
4	3.95	5.99	216.04
5	4.42	8.30	195.70
เฉลี่ย	4.25	7.69	192.79
SD	0.23	1.14	14.92

ตาราง 26 ความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด และ มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 10 %w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	3.75	7.18	186.86
2	2.94	4.17	157.67
3	3.63	8.49	159.94
4	2.99	4.20	164.10
5	3.37	7.80	159.76
เฉลี่ย	3.34	6.37	165.67
SD	0.33	1.83	10.80

กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึง ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด และค่ามอดุลัสของฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรรูปที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรและฟิล์มเซลลูโลสที่เติมพลาสติกไซเซอรที่ปริมาณต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 31-33 ตามลำดับ



ภาพที่ 31 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรและที่เติมพลาสติกไซเซอรที่ชนิดและปริมาณต่างๆ

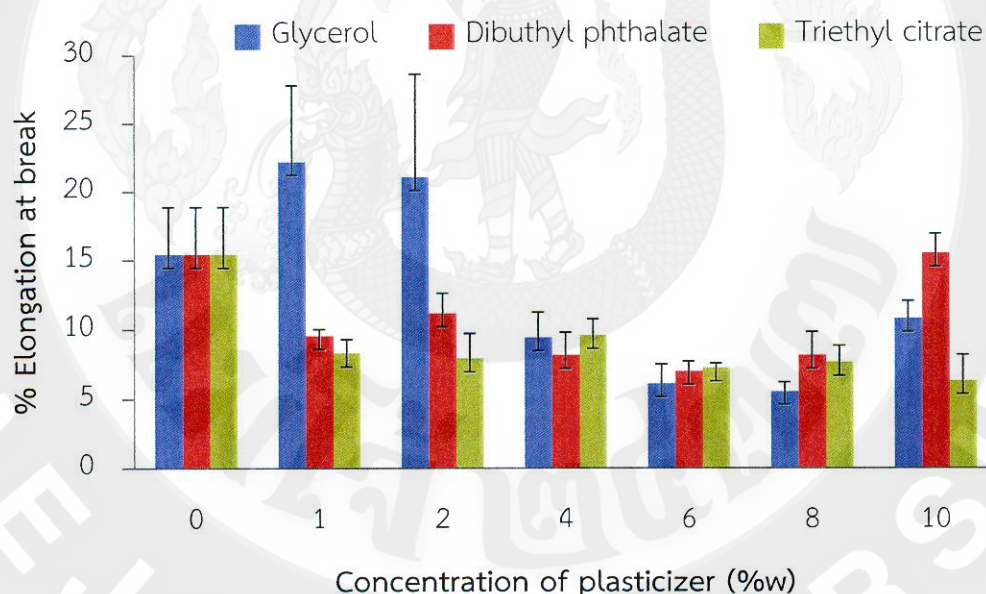
จากภาพที่ 31 เป็นการเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด จากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า เมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซอรลงในพอลิเมอร์ จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ลดลง และค่าความทนแรงดึงจะแปรผันตามปริมาณของพลาสติกไซเซอรที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอรที่ปริมาณต่างๆ มีค่าความทนแรงดึงที่ลดลงจากฟิล์มที่ไม่ได้เติมพลาสติกไซเซอร ซึ่งฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรมีค่าความทนแรงดึงของฟิล์มที่ดีที่สุดคือ 10.73 MPa และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกไซเซอรทั้ง 3 ชนิด พบว่าการใช้ไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอรส่งผลให้ฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดมีค่าความทนแรงดึงที่ต่ำลงมากกว่าการใช้กลีเซอรอลและไดบิวทิลพทาเลตเป็น พลาสติกไซเซอร และพบว่าการใช้ไดบิวทิลพทาเลต ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (1-2 %w) เป็นพลาสติกไซเซอรฟิล์มเซลลูโลสมีค่าความทนแรงดึงลดลงน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรขึ้น (4-10 %w) พบว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรจะทำให้ฟิล์มเซลลูโลสมีความทนแรงดึงลดลงน้อยกว่าการใช้ไดบิวทิลพทาเลตและไตรเอทิลซิเตรต

การเติมพลาสติกไซเซอรจะส่งผลต่อค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลส คือส่งผลให้ฟิล์มเซลลูโลสมีค่าความทนแรงดึงที่ลดลงอาจเนื่องมาจากการใช้พลาสติกไซเซอรจะทำให้เกิดที่ว่าง หรือ ปริมาตรอิสระ (Empty internal space or free volume) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้พลาสติกไซเซอรยังไปทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างจากกัน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลงนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอรทั้งสามชนิด พบว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรที่มีโครงสร้างทางเคมีที่มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างของไตรเอทิลซิเตรตและไดบิวทิลพทาเลต ดังนั้นจึงก่อให้เกิดที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์น้อยที่สุด โมเลกุลของเซลลูโลสตัดแปรที่เติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรจึงสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบมากกว่า จึงส่งผลให้ฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรมีความทนแรงดึงที่สูงกว่าการใช้ไตรเอทิลซิเตรตและไดบิวทิลพทาเลตเป็นพลาสติกไซเซอร

ภาพที่ 32 แสดงการย่อยสลายการยึดที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่เติมและไม่เติม พลาสติกไซเซอร จากหลักการและหน้าที่ของพลาสติกไซเซอร ซึ่งเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่เติมลงไปในพลาสติกเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรที่เตรียมได้ แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองกลับพบว่า ฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอรลงไปทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าร้อยละการยึดที่จุดขาดต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร ยกเว้นฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร

ที่ความเข้มข้น 1-2 %w จะมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) สูงขึ้นกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ สาเหตุที่ฟิล์มเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอร์มีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดลดลง อาจเนื่องมาจากการที่พลาสติกไซเซอร์เข้าร่วมตัวเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้อย่างไม่สมบูรณ์ และมีลักษณะที่ค่อยๆ เยิ้ม (Exude) ออกมาที่พื้นผิวฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้แข็งเปราะ และมีความอ่อนตัวลดลง จึงเป็นสาเหตุที่ฟิล์มเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มลดลง และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 3 ชนิด จะพบว่าการใช้กลีเซอรอลที่ปริมาณเพียงเล็กน้อย (1-2 %w) เป็นพลาสติกไซเซอร์ส่งผลทำให้ฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมไดบิวทิลพทาเลตและไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอร์ ส่วนการใช้ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้นสูงๆ (8-10 %w) พบว่า ไดบิวทิลพทาเลตเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ส่งผลให้ฟิล์มมีร้อยละการยืดที่จุดขาดลดลงน้อยกว่าการใช้กลีเซอรอลและไตรเอทิลซิเตรต

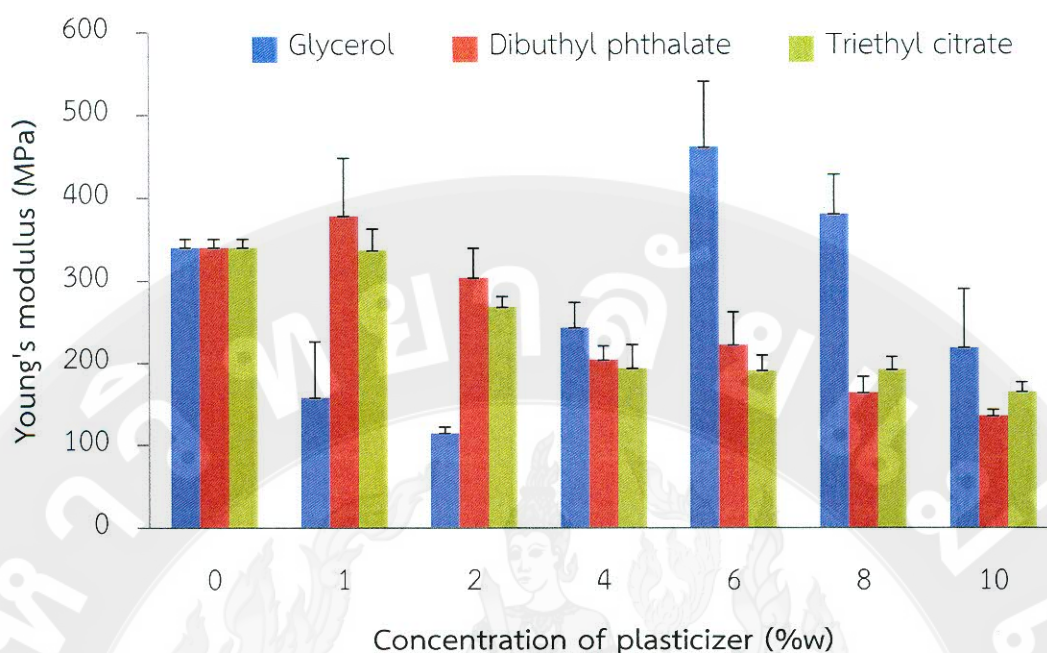


ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดและปริมาณต่างๆ

ภาพที่ 33 แสดงการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดและปริมาณต่างๆ จากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่าค่ามอดูลัสจะลดลงและแปรผันตามปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มเซลลูโลสที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์มีค่ามอดูลัส เท่ากับ 341.50 MPa ส่วนการเติมพลาสติก

ไซเซอรจะทำให้ค่ามอดุลัสของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดมีแนวโน้มลดลงและเมื่อเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกไซเซอรทั้ง 3 ชนิด พบว่า การเติมไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอรส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสของยังมียาลดลงต่ำกว่าฟิล์มที่เติมไดบิวทิลพทาเลตและกลีเซอรอล อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองกลับพบว่า การใช้พลาสติกไซเซอรชนิดกลีเซอรอลจะทำให้ฟิล์มเซลลูโลสมีค่ามอดุลัสดีที่สุดในเมื่อเติม กลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 6 %w โดยให้ค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 462.33 MPa เนื่องจากค่ามอดุลัสของยังเป็นผลมาจากค่าความทนแรงดึงหารด้วยค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด ซึ่งเมื่อเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 6 %w นี้ให้ค่าความทนแรงดึงที่มากและให้ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดน้อย จึงทำให้ค่า มอดุลัสของยังที่ความเข้มข้นนี้มีค่าสูง

ในงานวิจัยนี้คาดหวังว่าผลของการเติมพลาสติกไซเซอรจะสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มได้ ซึ่งจากผลการทดลองการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดพบว่า ฟิล์มที่มีการเติมพลาสติกไซเซอรชนิดกลีเซอรอลสามารถปรับปรุงค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดได้จริง โดยที่กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรที่ดีที่สุดซึ่งสามารถให้ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดสูงที่สุดที่ความเข้มข้น 1-2 %w ในส่วนของไดบิวทิลพทาเลตและไตรเอทิลซิเตรตนั้นไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติดังกล่าวได้ อาจเนื่องมาจากพลาสติกไซเซอรชนิดนี้ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ ซึ่งจะเห็นได้จากการเย็บบริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์มเมื่อตัวทำละลายระเหยออกหมด จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอรทั้งสองชนิดจะมีลักษณะเปราะ แข็ง และส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง

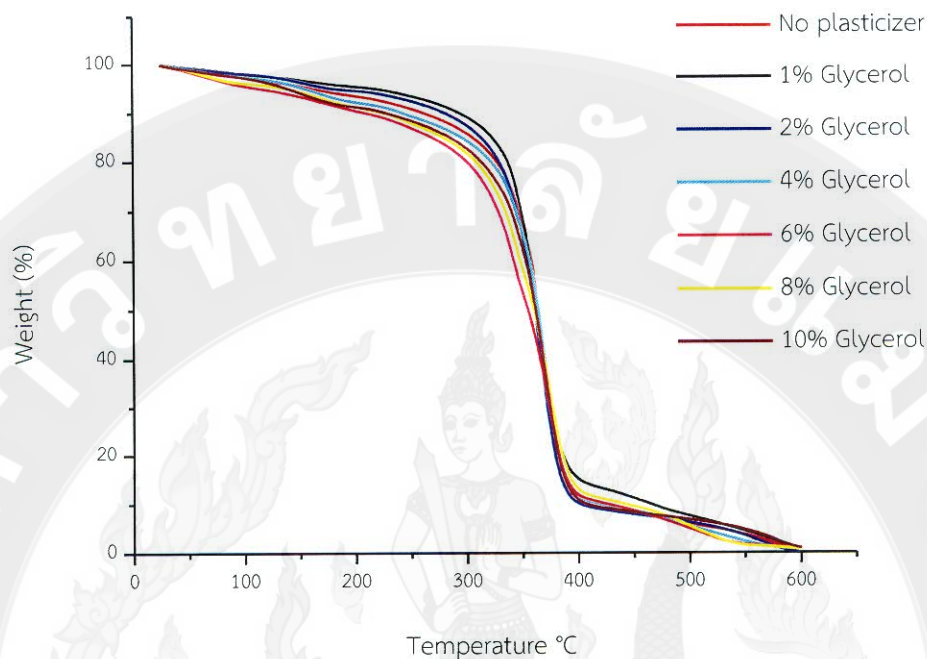


ภาพที่ 33 กราฟเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และที่เติมพลาสติกไซเซอร์ที่ชนิดและปริมาณต่างๆ

10 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ชนิดและปริมาณต่างๆ

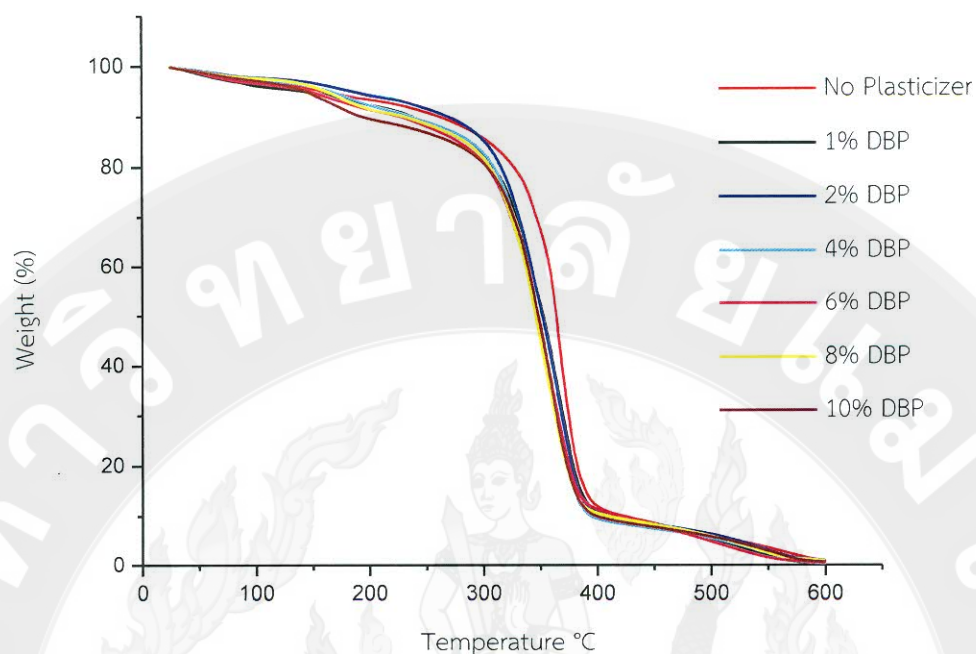
10.1 เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)

ภาพที่ 34 แสดงเทอร์โมแกรมเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเซลลูโลสที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์กับฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์มีการสูญเสียน้ำหนักเพียงช่วงเดียวโดยมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเมื่อน้ำหนักเซลลูโลสหายไปร้อยละ 5 ($T_{5\%}$) แสดงดังตาราง 27 ผลการทดสอบพบว่า ฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์จะเกิดการสลายตัว ($T_{5\%}$) ที่อุณหภูมิ 219°C ในส่วนของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 1 2 4 6 8 และ 10 %w จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 229 226 190 152 165 และ 180°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าฟิล์มเซลลูโลสที่เติม พลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 1-2 %w ส่งผลให้ฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรมีอุณหภูมิการสลายตัวที่เพิ่มขึ้นประมาณ 10°C แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็น 4 %w ขึ้นไป กลับส่งผลให้ฟิล์มเซลลูโลสมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมพลาสติกไซเซอร์ ดังนั้นการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้นสูงส่งผลทำให้ฟิล์มเซลลูโลสมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลง



ภาพที่ 34 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

ภาพที่ 35 แสดงเทอร์โมแกรมทางความร้อนเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์กับฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไดบิวทิลพทาเลต (DBP) จากเทอร์โมแกรม พบว่าฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เติมไดบิวทิลพทาเลตที่ความเข้มข้น 1 2 4 6 8 และ 10 %w จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 209 200 197 192 178 และ 164°C ตามลำดับ (ตาราง 27) จะเห็นได้ว่าฟิล์มเซลลูโลสที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไดบิวทิลพทาเลตนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ลดลงแปรผันตามความเข้มข้นของไดบิวทิลพทาเลต ดังนั้นการใช้ไดบิวทิลพทาเลตเป็นพลาสติกไซเซอร์ส่งผลทำให้ฟิล์มเซลลูโลสมีการทนความร้อนที่ลดลงเช่นเดียวกับการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์



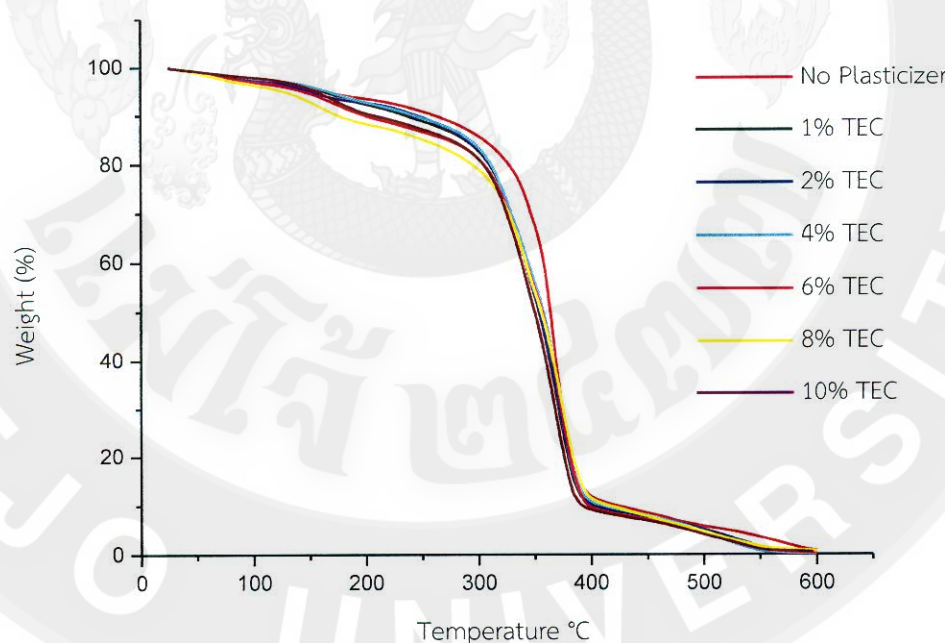
ภาพที่ 35 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูลอสไฮดรอกไซด์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไดบิวทิลพทาเลตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

ตาราง 27 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเมื่อน้ำหนักเซลลูลอสหายไปร้อยละ 5 (T_{d5}) ของฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์และฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต (DBP) และไตรเอทิลซีเตรต (TEC) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (%w)	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่น้ำหนักของเซลลูลอสหายไป 5% (°C)		
	Glycerol	DBP	TEC
0	219	219	219
1	229	209	213
2	226	200	208
4	190	197	190
6	152	192	181
8	165	178	167
10	180	164	162

ภาพที่ 36 แสดง TGA เทอร์โมแกรมเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเซลลูโลสที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์กับฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เติมไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้น 1 2 4 6 8 และ 10 %w จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 213 208 190 181 167 และ 162°C ตามลำดับ (ตาราง 3.3) จะเห็นได้ว่าฟิล์มเซลลูโลสที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไตรเอทิลซิเตรตนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ลดลงตามความเข้มข้นของไตรเอทิลซิเตรตที่เพิ่มขึ้น หมายความว่า การใช้ไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอร์ส่งผลทำให้ฟิล์มเซลลูโลสมีการทนความร้อนที่ลดลงเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า ฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติม พลาสติกไซเซอร์จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 219°C และฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร์ทั้งสามชนิด คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลตและกลีเซอรอลนั้นจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ ยกเว้นฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้น 1-2 %w



ภาพที่ 36 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

10.2 เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอร 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร แสดงดังรูป 37-39

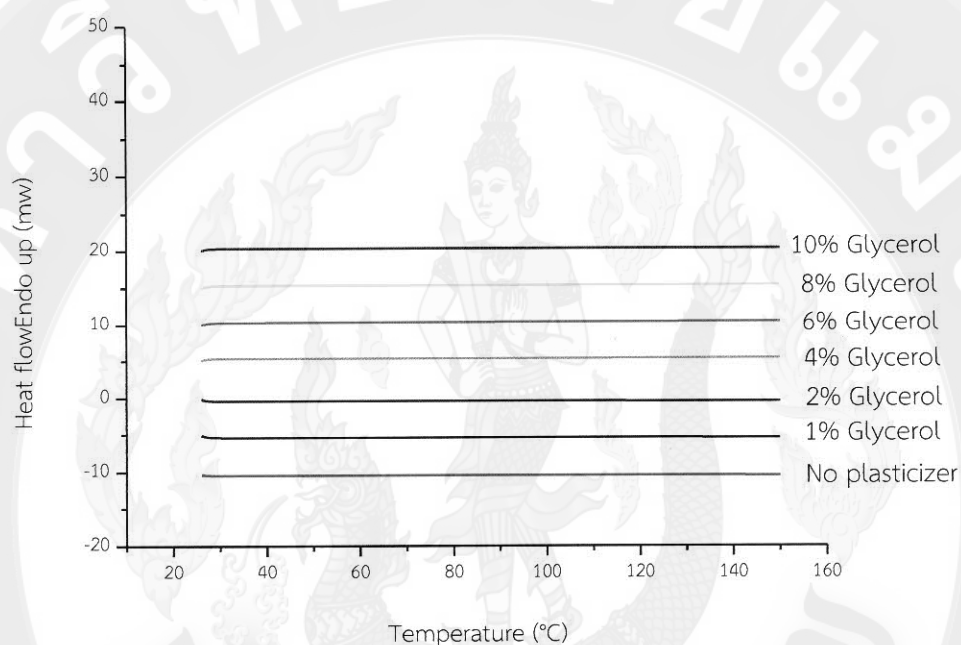
จากทฤษฎีได้กล่าวว่า การเติมพลาสติกไซเซอรจะช่วยให้อุณหภูมิ T_g ของพอลิเมอร์ลดลง อันเนื่องมาจากทฤษฎีได้กล่าวไว้ในหัวข้อพลาสติกไซเซอร เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิ T_g (ธีระพล, 2556) ของพลาสติกไซเซอรที่ใช้ในงานวิจัย คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และไตรเอทิลซิเตรต จะเห็นได้ว่า โครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกไซเซอรชนิดกลีเซอรอล (ภาพที่ 10) ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอรชนิดพอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (มวลโมเลกุลประมาณ 92.09 g/mol) ซึ่งทำงานตามกลไก Lubricity theory ทฤษฎีนี้อธิบายการทำงานของพลาสติกไซเซอรว่าทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น จึงทำให้ T_g ของพอลิเมอร์ลดลง

ส่วนพลาสติกไซเซอรชนิดไดบิวทิลพทาเลต (ภาพที่ 12) ประกอบไปด้วยวงแหวนอะโรมาติกที่มีผลทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสแยกห่างออกจากกัน แล้วส่งผลให้ปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์มีเพิ่มขึ้น หมู่เอสเทอร์ที่มีผลทำให้แรงกระทำโคโพลระหว่างสายโซ่ลดลง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ไดบิวทิลพทาเลตยังมีหมู่อัลคิลที่เป็นสายโซ่ตรงจึงทำให้พอลิเมอร์สามารถหมุนตัวได้สะดวก โดยพลาสติกไซเซอรชนิดไดบิวทิลพทาเลตทำงานตามกลไก Gel theory และ Free-volume theory ส่งผลทำให้ค่า T_g ของพอลิเมอร์ที่เติมพลาสติกไซเซอร ชนิดนี้ลดลง

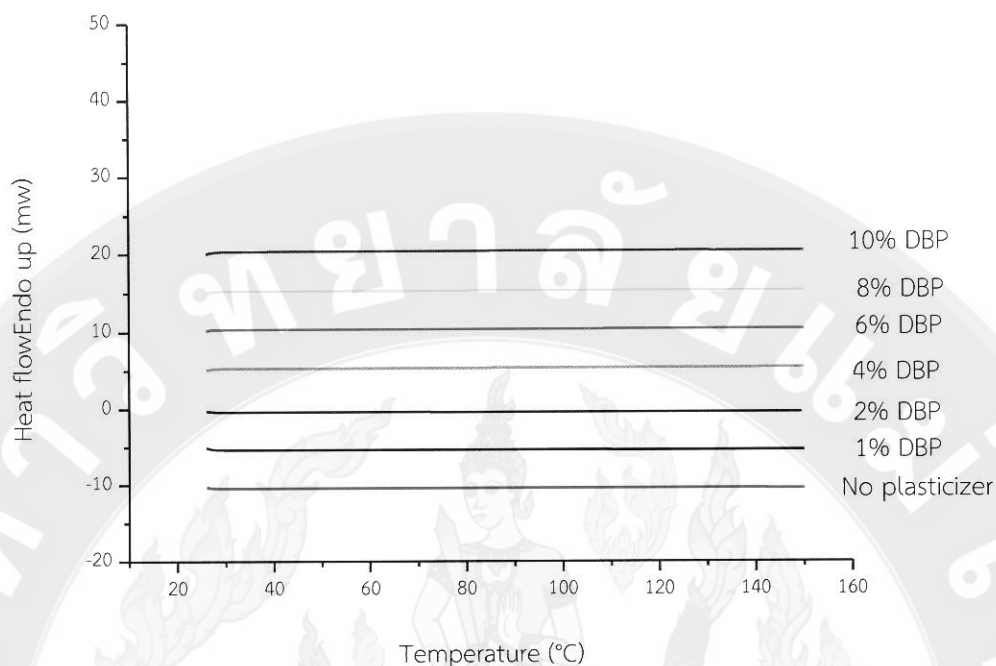
และสำหรับพลาสติกไซเซอรชนิดไตรเอทิลซิเตรตก็มีกลไกการทำงานคล้ายไดบิวทิล พทาเลต ที่ในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ 3 หมู่ โมเลกุลจึงมีขนาดใหญ่พอสมควรจึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกันแล้วเกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จึงทำงานตามกลไก Free-volume theory ส่งผลทำให้ค่า T_g ของพอลิเมอร์ลดลง

จากทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้คาดหวังว่าการเติมพลาสติกไซเซอรจะช่วยลดอุณหภูมิ T_g ของเซลลูโลสดัดแปรและทำให้ฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรมีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลับไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (อุณหภูมิ 25-150°C) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรมีอุณหภูมิ T_g มีอยู่ในช่วงติดลบ จากงานวิจัยของ Jae Shin Choi และ Won Ho Park (Jae Shin and Won Ho, 2014) ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอรที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล ของ poly (3-hydroxybutyrate-co -3-hydroxyvalerate) (PHBV) ซึ่งโครงสร้างของ PHBV มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์คล้ายกับเซลลูโลส

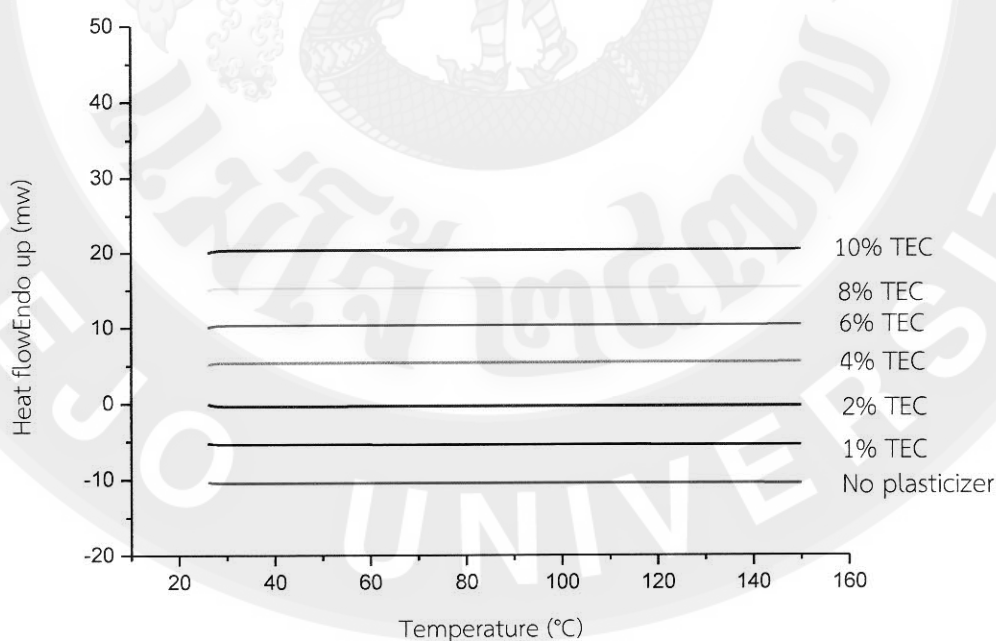
ลอเรต จากการศึกษพบว่า T_g ของ PHBV ที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์มีค่าเท่ากับ -6.6°C เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ชนิด DBP และ TEC ที่ความเข้มข้น 20 %w ส่งผลให้ค่า T_g ลดต่ำลงมีค่าเท่ากับ -28.5°C และ -30°C ตามลำดับ แต่เนื่องจากเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25°C เป็นต้นไปจึงทำให้ไม่พบอุณหภูมิดังกล่าว



ภาพที่ 37 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 38 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอรชนิดไดบิวทิลพทาเลตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร



ภาพที่ 39 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากเปลือกข้าวโพดที่เติมพลาสติกไซเซอรชนิดไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์เซลลูโลสเอสเทอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มพลาสติกทดแทนการใช้พลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดจากวัตถุดิบประเภทปิโตรเคมีซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด โดยทำการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด ซึ่งจะพบว่าเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าวโพดมีลักษณะเป็นผงสีขาวและมีปริมาณเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าวโพดคิดเป็นร้อยละ 24.83 หลังจากนั้นทำการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับลอโรอิลคลอไรด์ โดยที่มีโทลูอินเป็นตัวทำละลายและมีไพรีดินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาหาค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%Weight increase) และค่าระดับการแทนที่ (Degree of substitution ; DS) โดยใช้สภาวะในการทำปฏิกิริยา คือ ที่อุณหภูมิ 80°C ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ได้ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสหลังผ่านการดัดแปรเท่ากับร้อยละ 152.47 และค่าระดับการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสเท่ากับ 2.04 การที่เซลลูโลสดัดแปรนี้มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกแทนที่ด้วยสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์ เกิดเป็นเซลลูโลสลอเรต (Cellulose laurate) การแทนที่ของสายโซ่นี้จะส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนลดลง และส่งผลให้น้ำหนักของเซลลูโลสดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น

จากนั้นทำการยืนยันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผงเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ด้วยผลของอินฟราเรดสเปกตรัมจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ซึ่งพบว่าหลังจากเซลลูโลสถูกดัดแปรโครงสร้างด้วย ลอโรอิลคลอไรด์แล้ว เซลลูโลสดัดแปรจะแสดงพิกที่แตกต่างไปจากพิกเดิมของเซลลูโลสก่อนดัดแปร 3 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่ง 2855 และ 2927 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่เมทิล (C-H stretching) ในสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์ ที่ตำแหน่ง 1753 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในหมู่ฟังก์ชัน เอสเทอร์ของลอโรอิลคลอไรด์ และพิกที่ตำแหน่ง 3470 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสมีความสูงของพิกต่ำลง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสลดจำนวนลงเพราะถูกแทนที่ด้วยสายโซ่ของลอโรอิลคลอไรด์

การวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของผงเซลลูโลสก่อนและหลังการตัดแปรร เมื่อมองด้วยตาเปล่า จะพบว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว แต่เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบว่ามีลักษณะเป็นแท่งสั้นๆ และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสก่อนการตัดแปรรและเซลลูโลสภายหลังกการตัดแปรรนั้น จะพบว่าเซลลูโลสภายหลังกการตัดแปรรมีลักษณะแตกต่างไปจากเซลลูโลสก่อนดัดแปรร คือ จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอัลคิลไฮโดรคาร์บอนมาเกาะบริเวณพื้นผิว

การทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสดัดแปรรซึ่งใช้ตัวทำละลาย 11 ชนิด แบ่งเป็นตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้ว 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม โทลูอิน เฮกเซน ไดคลอโรมีเทน ตัวทำละลายชนิดมีขั้ว 4 ชนิด ได้แก่ เอทานอล เมทานอล อะซิโตน ไดเมทิลอะเซตาไมด์ และสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และ น้ำ พบว่าเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและละลายได้ดีที่สุดในคลอโรฟอร์ม

การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของผงเซลลูโลสก่อนและหลังดัดแปรรจากเปลือกข้าวโพด โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (TGA) โดยพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่น้ำหนักของเซลลูโลสหายไป 5% (Thermal degradation temperature at 5% weight loss, T_{d5}) จากผลการทดลองพบว่า ผงเซลลูโลสก่อนดัดแปรรจะเกิดการสลายตัวอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีอุณหภูมิประมาณ 60°C และช่วงที่สองที่มีอุณหภูมิ 235°C สำหรับผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดภายหลังกการดัดแปรรพบว่ามี การสูญเสีย น้ำหนักอยู่สองช่วง ช่วงแรกที่มีอุณหภูมิ 216°C เป็นการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการสลายตัวของสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอัลคิลไฮโดรคาร์บอน และช่วงที่สองที่มีอุณหภูมิ 272°C เป็นช่วงที่เซลลูโลสดัดแปรรเกิดการสลายตัว นั่นคือเซลลูโลสหลังดัดแปรรมีสมบัติทางความร้อนที่ลดลง โดยพบว่าเซลลูโลสภายหลังกการดัดแปรรมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าเซลลูโลสก่อนดัดแปรรประมาณ 19°C ในส่วนของฟิล์มเซลลูโลสนั้นพบว่า ฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพดที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์จะเกิดการสลายตัวที่มีอุณหภูมิประมาณ 219°C และฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร์ทั้งสามชนิด คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลทาเลต และ ไตรเอทิลซิเตรตนั้น จะเกิดการสลายตัวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ ยกเว้นฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้น 1-2 %w

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของผงเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนและหลังดัดแปร โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ คือ 25-150°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที ผลการทดลองพบว่า เซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปรไม่พบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เนื่องจากมีความเป็นผลึกสูง และไม่พบอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อาจเพราะเซลลูโลสมีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองและนอกจากนี้อาจเกิดการสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลวของเซลลูโลส และสำหรับเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดหลังดัดแปรก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน อาจเป็นเพราะเซลลูโลสหลังดัดแปรยังคงมีอุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงอุณหภูมิสลายตัวอยู่ สำหรับฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่ไม่เติมและเติม พลาสติไซเซอร์ พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ เช่นกัน

จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากเปลือกข้าวโพด พบว่าฟิล์มที่ไม่มีการเติมพลาสติไซเซอร์จะมีค่าความทนแรงดึง ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดและค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 10.73 MPa ร้อยละ 15.46 และ 341.50 MPa ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้คาดหวังว่าผลของการเติมพลาสติไซเซอร์จะสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มได้ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้มีสามชนิด คือ กลีเซอรอล ไดบิวทิลพทาเลต และ ไตรเอทิลซิเตรต ซึ่งจากการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมกลีเซอรอลพลาสติไซเซอร์สามารถปรับปรุงค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดได้ที่มีความเข้มข้น 1-2 %w โดยที่ค่าความเข้มข้นเพียง 1 %w ก็ให้ค่าให้ร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 22.20 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้นกลับพบว่าฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้ พลาสติไซเซอร์ที่มากเกินไปทำให้พลาสติไซเซอร์รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับเซลลูโลสได้อย่างไม่สมบูรณ์ เกิดการเยิ้มบริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์มเมื่อตัวทำละลายระเหยออกหมด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้แข็ง เปราะ และมีความอ่อนตัวลดลง

จากการทดลองพลาสติไซเซอร์ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม โดยให้ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติไซเซอร์ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเซลลูโลสให้ดีขึ้น ให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้นประมาณ 3.20-4.56 % คือพลาสติไซเซอร์ชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 1-2 %w

เอกสารอ้างอิง

- Satgé, C., Verneuil, B., Branland, P., Granet, R., Krausz, P., Rozier, J., and Petit, C. 2002. Rapid Homogeneous Esterification of Cellulose Induced by Microwave Irradiation. **Carbohydr. Polym.** 49: 373-376.
- อรอุมา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- Choi, J.S. and Park, W.H. 2004. Effect of biodegradable plasticizers on thermal and mechanical properties of poly(3-hydroxybutyrate). **Polym. Test.** 23: 455-460.
- Reddy, N. and Yang, Y. 2005. Biofibers from Agricultural By products for Industrial Applications. **Trends. Biotechnol.** 23: 22-27.
- ปรีชา พหลเทพ. 2544. โพลีเมอร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง: กรุงเทพฯ. 30น.
- Yang, D., Peng, X., Zhong, L., Cao, X., Chen, W., Zhang, X., Liu, S. and Sun, R. 2014. "Green" films from renewable resources: Properties of epoxidized soybean oil plasticized ethyl cellulose films. **Carbohydr. Polym.** 103: 198-206.
- ข้าวโพด. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.dld.go.th/nutrition/exhibition/Feed_stuff/CORN.HTML.
- Yang, L., and Paulson, A.T. 2000. Mechanical and Water Vapors Barrier Properties of Edible Gellen Films. **Food. Res. Int.** 33: 563-570.
- Liu, J., and Williaiams, R.O. 2002. Properties of Heat-humidity Cured Cellulose Acetate Phthalate Free Films. **Eur. J. Pharm Sci.** 17: 31-41.
- Choi, J.S., and Park, W.H. 2004. Effect of Biodegradable Pasticizers on Thermal and Mechanical Properties of Poly (3-hydroxybutyrate). **Polym. Test.** 23: 455-460.
- Park, H.; Misra, M.; Lawrence, T.D., and Amar, K.M. 2004. Green Nanocomposites from Cellulose Acetate Bioplastic and Clay: Effect of Ecofriendly Triethyl Citrate Plasticizer. **Biomacromolecules.** 5: 2281-2288.
- Talija, R.A., Helén, H., Roos, Y.H., and Jouppila, K. 2007. Effect of Various Polyol Contens on Physical and Mechanical Properties of Potato Starch-based Films. **Carbohydr. Polym.** 67: 288-295.

Osés, J., Fernández-Pan, I., Mendoza, M., and Maté, J. 2007. Stability of the Mechanical Properties of Edible Films Based on Whey Protein Isolate During Storage at Different Relative Humidity. **Food. Hydrocolloid.**

Behjat, T., Russly, A. R., Luqman, C. A., Yus, A. Y. and Nor Azowa, I. 2009. Effect of PEG on the Biodegradability Studies of Kenaf Cellulose-polyethylene Composites. **Int. Food. Res. J.** 16: 243-247.

ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์. 2556. เคมีพอลิเมอร์. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ. 226-242 น.

