



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง ผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด

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

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย

ประจำปี 2557

จำนวน 216,000 บาท

หัวหน้าโครงการ

นางสาวอุษารัตน์ รัตนคำนวน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด (Effect of Plasticizer on Physical and Mechanical Properties of Cellulose Ester Films from Rice Straw and Corn husk) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเคมี และสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่ และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ง
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	20
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	29
สรุปผลการวิจัย	50
เอกสารอ้างอิง	53

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของฟางข้าว	16
ตารางที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	22
ตารางที่ 3 แสดงค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสตัดแปรที่สังเคราะห์โดยใช้พลังงาน ไมโครเวฟ 100 วัตต์ ระยะเวลา 15 นาที	30
ตารางที่ 4 ความสามารถในการละลายของผงเซลลูโลสตัดแปรในตัวละลายชนิดต่างๆ	32
ตารางที่ 5 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆในเซลลูโลสก่อนและหลังตัดแปร	34
ตารางที่ 6 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม	40
ตารางที่ 7 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสชนิดไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	42
ตารางที่ 8 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 5 % w/w	42
ตารางที่ 9 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 10 % w/w	42
ตารางที่ 10 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 15 % w/w	43
ตารางที่ 11 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 20 % w/w	43
ตารางที่ 12 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 5 % w/w	43
ตารางที่ 13 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 10 % w/w	44
ตารางที่ 14 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 15 % w/w	44
ตารางที่ 15 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 20 % w/w	44
ตารางที่ 16 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด โมดูลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมไตรเอทิลซิเตรต 25 % w/w	45

(ก)

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 17 ประสิทธิภาพของพลาสติกไฮเซอร์ชนิดกลีเซอรอล และไตรเอทิลซีเตรต

49



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส	7
ภาพที่ 2 พันธะไฮโดรเจนภายใน โมเลกุลและระหว่าง โมเลกุลของเซลลูโลส	7
ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอรซ์ชนิดพทาเลตเอสเทอร์	12
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอรซ์ชนิดไตรเมทิลเทตเอสเทอร์	12
ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอรซ์ชนิดอะลิฟาติก ไดคาร์บอซิลิกแอซิดเอสเทอร์	13
ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอรซ์ชนิดฟอสเฟตเอสเทอร์	14
ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล	15
ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของไตรเอทิลซิเตรต	16
ภาพที่ 9 ขั้นตอนการทดลองโดยรวมของการเตรียมฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร จากเปลือกข้าวโพด	24
ภาพที่ 10 ปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของเซลลูโลสกับสอโรอิลคลอไรด์	29
ภาพที่ 11 FTIR-spectra ของเซลลูโลสก่อนดัดแปรเทียบกับเซลลูโลสเอสเทอร์ ภายหลังดัดแปร	31
ภาพที่ 12 TGA เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสจากฟางข้าวเทียบกับเซลลูโลสดัดแปร	34
ภาพที่ 13 DSC เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสก่อนดัดแปรเทียบกับเซลลูโลสดัดแปร	35
ภาพที่ 14 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มเซลลูโลส	36
ภาพที่ 15 ตัวอย่างแผ่นฟิล์มก่อนส่งทดสอบ	37
ภาพที่ 16 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ก่อน และหลังเติมพลาสติกไซเซอรซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	44
ภาพที่ 17 ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ก่อน และหลังเติมพลาสติกไซเซอรซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	45
ภาพที่ 18 ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ก่อน และหลังเติมพลาสติกไซเซอรซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	46

ผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลส
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

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวที่สังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยเซลลูโลสเอสเทอร์จะถูกสังเคราะห์จากเซลลูโลสในฟางข้าวกับลอโรอิลคลอไรด์ ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันภายใต้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสดัดแปรด้วย FT-IR ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีพบที่สำคัญในการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของเซลลูโลสคือที่ตำแหน่ง 1743.02 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) และหมู่เมทิล ($\text{C}-\text{H}$ stretching) ที่ตำแหน่ง 2922.37 cm^{-1} และ 2863.98 cm^{-1} ตามลำดับ และผลการทดสอบสมบัติการละลายพบว่าเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ ได้แก่ คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทนและเฮกเซน ภายหลังจากการดัดแปรจะทำการขึ้นรูปฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เติมพลาสติกไซเซอร์แล้วด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูปโดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย พลาสติกไซเซอร์สองชนิดคือกลีเซอรอล และไตรเอทิลซิเตดที่ปริมาณ 0-25 % w/w จะถูกใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเซลลูโลส นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าแผ่นฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 1.73 MPa ร้อยละการยืดที่จุดขาดเท่ากับร้อยละ 3.13 และค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 115.93 MPa อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้คาดหวังว่า ร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ แต่ผลการทดลองกลับพบว่าไม่เป็นไปตามทฤษฎี อาจเนื่องจากการใช้ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่มากเกินไป ทำให้พลาสติกไซเซอร์รวมเป็นเนื้อเดียวกับเซลลูโลสได้ไม่สมบูรณ์และเกิดการเยิ้มออกมาที่ผิว

คำสำคัญ : เซลลูโลส พลาสติกไซเซอร์ ฟางข้าว ไมโครเวฟ เอสเทอร์ฟิเคชัน

Abstract

This research aimed to study the mechanical properties improvement of cellulosic ester film synthesized by microwave heating. Cellulose ester was synthesized by using rice straw cellulose and lauroyl chloride via esterification under optimum condition of microwave energy. The FTIR spectra provide an evidence of cellulose esterification by the presence of important ester carbonyl band (C=O) at 1743.02 cm⁻¹ and the methyl band (C-H stretching) at 2922.37 cm⁻¹ and 2863.98 cm⁻¹ respectively. Modified cellulose can be dissolved in organic solvent such as chloroform, dichloromethane and hexane. After modification, the plasticized cellulose ester films were performed by solution casting. To improve the mechanical properties of cellulose ester film, two types of plasticizer glycerol and triethyl citrate (TEC) were used as additive at different amounts. Tensile strength, % elongation at break and modulus of unplasticized film were 1.56 MPa, 3.21 % and 98.81 MPa, respectively. However, the results show unexpected data with decreasing of % elongation at break of plasticized film. This result might be due to the uncomplete blending between plasticizer and cellulose that obviously seen with the exude of plasticizer on the film surface.

Keywords: Cellulose, Plasticizer, Rice straw, Microwave, Esterification

คำนำ

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

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาฟิล์มพลาสติกจากพอลิเมอร์ที่มีในธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เพื่อทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียม โดยทำการสกัดเซลลูโลสจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มพลาสติกที่เตรียมได้นั้นมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติกทั่วไปในท้องตลาด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักโดยการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากฟางข้าว และเปลือกข้าวโพด โดยมีพลาสติกชีวเซอร์เป็นสารเติมแต่ง
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกชีวเซอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่เตรียมได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้พลาสติกชีวเซอร์ที่มีความเหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูปของฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด
2. ได้ฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพเพื่อทดแทนการใช้ฟิล์มจากพอลิเมอร์สังเคราะห์
3. สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมทางวิชาการ หรือตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับทางวิชาการเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

การตรวจเอกสาร

ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทและเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์เรา ดังจะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์ของใช้และบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ รวมไปถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์และการเกษตร เนื่องจากพลาสติกมีข้อดีหลายประการคือ มีราคาถูก มีน้ำหนักที่เบาแต่มีความแข็งแรงทนทานสูง มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ง่ายต่อการแปรรูป สามารถใช้งานได้กว้างขวาง สามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ อีกทั้งยังสามารถผลิตพลาสติกให้มีสมบัติเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทางได้อีกด้วย ทำให้ความต้องการการบริโภคพลาสติกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากข้อมูลสรุปสภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 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 วิธีการกำจัดขยะพลาสติกอาจทำได้โดยนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (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) เป็นพลาสติกไซเซอร ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าไตรเอทิลซิเตตมีประสิทธิภาพในการเป็นพลาสติกไซเซอรสำหรับพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต โคพอลิไฮดรอกซีวาลเอเรต ได้ดีกว่าไดบิวทิลฟทาเลต น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไดส์ 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: 22-27) ถึงแม้ว่าการจัดการกับเศษฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดเหลือทิ้งมีหลายวิธี เช่น นำไปเลี้ยงสัตว์ ใช้คลุมหน้าดิน เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น หรือ ใช้ในการเพาะเห็ด หากแต่เกษตรกรส่วนใหญ่มักใช้วิธีการกำจัดฟางข้าวด้วยการเผาเนื่องจากเป็นวิธีเตรียมพื้นที่สำหรับการทำนาครั้งต่อไปซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อน ส่วนเศษเปลือกข้าวโพดที่เหลือทิ้งนั้นอาจมีการกำจัดโดยการฝังกลบแต่อย่างไรก็ตามจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการจัดการที่ตามมา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเอาเศษฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งทางการเกษตรจากการเก็บเกี่ยวข้าวและข้าวโพดมาเป็นแหล่งวัตถุดิบของเซลลูโลสเพื่อที่จะนำมาพัฒนาเป็นฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียม เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้ทางหนึ่ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้

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) พอลิเมอร์ที่สกัดได้โดยตรงจากสิ่งมีชีวิตทั้งสัตว์ และพืช ซึ่งพอลิเมอร์ประเภทนี้จะอยู่ในพวกพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน (2) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทางชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และ (3) พอลิเมอร์ที่สร้างโดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ผ่านการคัดแต่งทางพันธุกรรม เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (Polyhydroxyl alkanoates, PHAs)

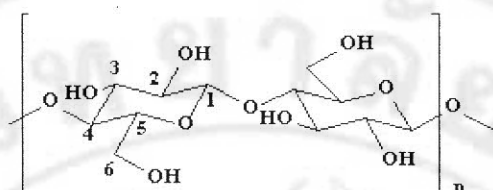
โครงสร้างและสมบัติโดยทั่วไปของเซลลูโลส (Structure and Properties of Cellulose)

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซลลูโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเนื่องจากเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากที่สุดในโลก สามารถพบเซลลูโลสได้ในโครงสร้างของพืชทุกชนิด

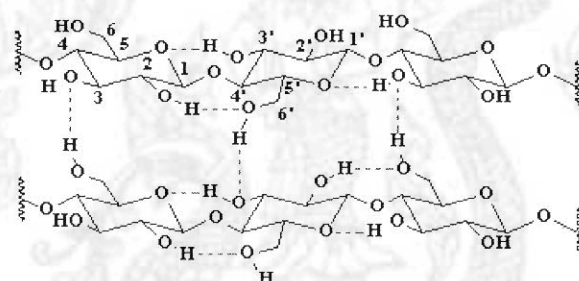
เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง โดยโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (D-glucose) ตั้งแต่ 15-40,000 หน่วย ต่อกันเป็นเส้นตรง (linear homopolymer) ด้วยพันธะเบต้า-1,4-กลูโคซิดิก (β -1,4-glucosidic linkage) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และ 4 มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีชื่อทางเคมีว่า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

มาก และเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่มีเป็นจำนวนมากนี้เอง ทำให้เซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล ((intra-and intermolecular hydrogen bonding) ดังรูปที่ 2 ประกอบกับโครงสร้างของเซลลูโลสสามารถเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก (60-80%)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส



ภาพที่ 2 พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส

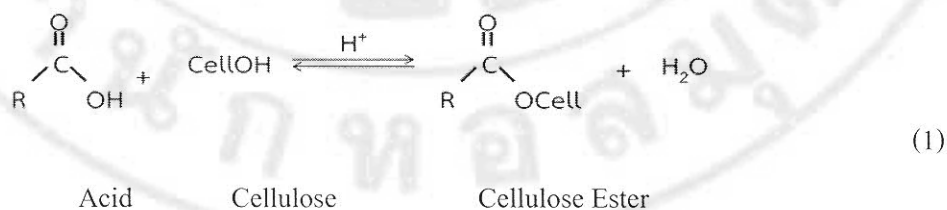
การดัดแปรเซลลูโลส (Cellulose Modification)

ในหนึ่งมอโนเมอร์ของเซลลูโลสที่เรียกว่า 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 เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลวจึงทำให้เซลลูโลสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือไหลได้ 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 ที่ดีไปกว่าพลาสติก

ที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม 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 (อรอุยา, 2546)

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

ทฤษฎีที่อธิบายกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ภายนอกมีทั้งหมด 3 ทฤษฎี ดังนี้คือ

1. Lubricity Theory ทฤษฎีนี้อธิบายการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ว่าทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (lubricant) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลผ่านไปมาซึ่งกันและกันได้

2. Gel Theory ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไซเซออร์จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน ดังนั้นพลาสติกไซเซออร์จะต้องประกอบด้วยทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว โดยพลาสติกไซเซออร์ส่วนที่มีขั้วจะเข้ายึดกับไดโพลหรือบริเวณที่มีขั้วของพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติกไซเซออร์ส่วนที่ไม่มีขั้วจะกำบัง (shield) บริเวณไดโพลของพอลิเมอร์ออกจากกัน

3. Free-Volume Theory ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไซเซออร์จะเพิ่มที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

สมบัติที่ต้องการของพลาสติกไซเซออร์

1. สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ กล่าวคือ ระหว่างการขึ้นรูป พลาสติกไซเซออร์จะต้องผสมกับพอลิเมอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ เกิดเป็นสารผสมที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะต้องยังคงเป็นเนื้อเดียวกัน

2. ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซออร์ วัตถุประสงค์แรกของการใช้พลาสติกไซเซออร์คือเพื่อให้พอลิเมอร์อ่อนตัวไม่เปราะ ซึ่งความสามารถดังกล่าวก็คือ “ประสิทธิภาพ” ของพลาสติกไซเซออร์ และโดยทั่วไปวัดได้จากผลของการใช้พลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อมอดูลัสของพอลิเมอร์ โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่ามอดูลัสและปริมาณพลาสติกไซเซออร์ ซึ่งในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพลาสติกไซเซออร์ต่างชนิดกัน อาจทำได้โดยการวัดค่ามอดูลัสที่ปริมาณพลาสติกไซเซออร์เท่ากัน หรือวัดจากปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่ต้องการใช้ในการทำให้พอลิเมอร์มีมอดูลัสเท่ากัน ซึ่งนอกจากนี้ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซออร์ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวมันเอง โดยพบว่าการมีโครงสร้างแบบอะลิฟาติกเชิงเส้น จะส่งผลให้พลาสติกไซเซออร์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในขณะที่โครงสร้างแบบกิ่งและแบบวงจะทำให้ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซออร์ลดลง นอกจากนี้ประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซออร์ยังอาจวัดได้จากผลในการทำให้อุณหภูมิห้อง T_g ของพอลิเมอร์ลดลง พลาสติกไซเซออร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้พอลิเมอร์มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากแข็งเหมือนแก้วไปยืดหยุ่นเหมือนยางอยู่ในช่วงกว้าง

3. มีความคงตัวสูง อยู่กับพอลิเมอร์ได้นาน กล่าวคือ ระหว่างการใช้งาน ผลิตภัณฑ์จะมีสมบัติความอ่อนตัวลดลงและเปลี่ยนเป็นแข็งเปราะ ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ไม่มีความคงตัวและเกิดการหลุดออกจากเนื้อพอลิเมอร์ หรือมาจากการเสื่อมของพลาสติก

ไซเซอรระหว่างการใช้งานเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากแสง ความร้อน ออกซิเจนหรือจุลินทรีย์ หรือพลาสติกไซเซอรเข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ไม่สมบูรณ์ และค่อยๆเยิ้ม (Exude) ออกมาที่พื้นผิวผลิตภัณฑ์ที่เล็กน้อย ซึ่งการปรับปรุงความคงตัวของพลาสติกไซเซอรสามารถทำได้โดยการใช้พลาสติกไซเซอรที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สารที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรได้ดีควรมีน้ำหนักโมเลกุลอย่างน้อยประมาณ 300

4. เสถียร ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ

เนื่องจากการขึ้นรูปและสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณของ พลาสติกไซเซอร ดังนั้นการเลือกใช้พลาสติกไซเซอรให้เหมาะสม จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่อไปนี้

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

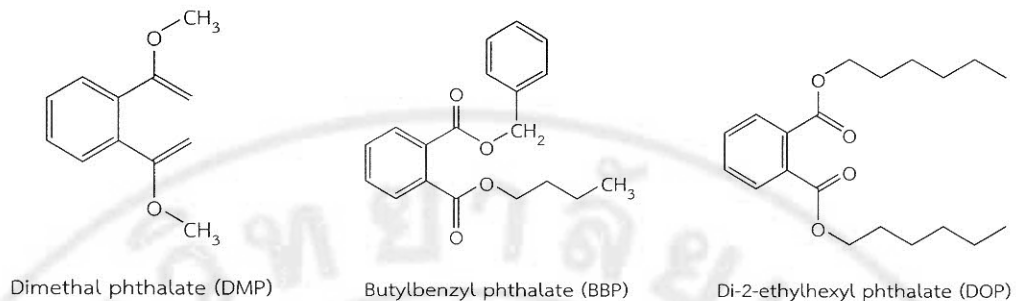
สามารถแบ่งชนิดของพลาสติกไซเซอรได้ตามโครงสร้างทางเคมี ดังนี้คือ [15]

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 สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างฟทาลิกแอนไฮไดรด์และแอลกอฮอล์ ซึ่ง พทาเลตเอสเทอร์ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรที่สำคัญ ได้แก่ ไดเมทิลพทาเลต (Dimethyl phthalate, DMP) ไดบิวทิลพทาเลต (Dibutyl phthalate, DBP) ได-2-เอทิล-เฮกซิลพทาเลต (Di-2-ethylhexyl phthalate, DEHP หรือ

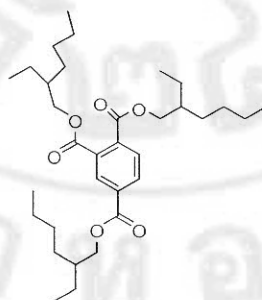
DOP) บิวทิลเบนซิลฟทาเลต (Butyl benzyl phthalate, BBP) ตัวอย่างโครงสร้างพลาสติกไซเซอร်บางชนิดแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร်ชนิดฟทาเลตเอสเทอร์

ไตรเมลลิตเอสเทอร์ (Trimellitate esters)

ไตรเมลลิตเอสเทอร์เป็นสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีการระเหยต่ำ ดังนั้นจึงนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความทนทานต่อความร้อน และทนต่อการถูกสกัดออก อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการเป็นพลาสติกไซเซอร်ต่ำกว่าฟทาเลต มีราคาแพง และไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้สมบัติดี ณ อุณหภูมิต่ำ โดยพลาสติกไซเซอร်ชนิดนี้ที่สำคัญคือ ไตรออกทิลไตรเมลลิต (Trioctyl trimellitate, TOTM) โครงสร้างดังภาพที่ 4 การใช้งานของ TOTM ส่วนใหญ่ใช้ในฉนวนสายไฟฟ้า และสายเคเบิลทนอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังใช้ปะเก็นเครื่องล้างจาน (Dishwasher gaskets) และท่อสายยางทางการแพทย์



Trioctyl trimellitate (TOTM)

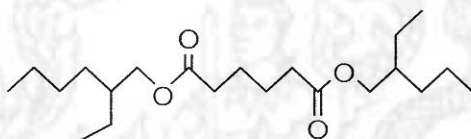
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร်ชนิดไตรเมลลิตเอสเทอร์

อะลิฟาติกไดคาร์บอกซิลิกแอซิดเอสเทอร์ (Aliphatic dicarboxylic esters)

พลาสติกไซเซอร်ชนิดนี้ได้จากเอสเทอร์ของกรดไดคาร์บอกซิลิก ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$ โดยกรดที่ใช้กัน ได้แก่ กรดอะดิพิค (Adipic acid, $n=4$) กรดอะซีลาอิก

(Azelaic acid, $n=7$) และกรดซีบาซิก (Sebacic acid, $n=8$) อะดิพิกไดคาร์บอซิลิกแอซิดเป็นพลาสติกไซเซอ์ที่มีประสิทธิภาพสูง และใช้ในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความอ่อนตัว ณ อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้สารเหล่านี้ยังมีความทนทานต่อแสงยูวี เนื่องจากพลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้มีความหนืดต่ำ และมีอำนาจการละลายต่ำ จึงทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการผลิต PVC plastisols อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้มีความสามารถในการเข้ารวมตัวกับ PVC ได้จำกัด จึงต้องใช้ร่วมกับพทาเลต

ในบรรดาอะดิพิกไดคาร์บอซิลิกแอซิดทั้งหมด สารที่มีการผลิตเพื่อใช้เป็นพลาสติกไซเซอ์มากที่สุดคือ อะดิเพต ซึ่งอะดิเพตที่สำคัญและใช้กันมาก ได้แก่ ได-2-เอทิลเฮกซิลพทาเลต หรือไดออกทิลอะดิเพต (DOA) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 5



Diethyl adipate (DOA)

ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอ์ชนิดอะดิพิกไดคาร์บอซิลิกแอซิดเอสเทอร์

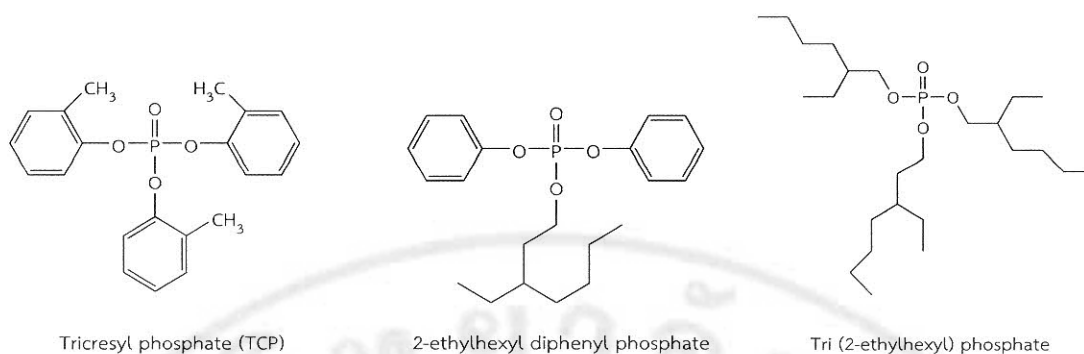
ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters)

ฟอสเฟตเอสเทอร์ ใช้เป็นพลาสติกไซเซอ์ใน PVC พอลิอะครีเลต และอนุพันธ์ของเซลลูโลส ข้อดีของพลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้คือช่วยเพิ่มความทนไฟให้กับพลาสติก

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))

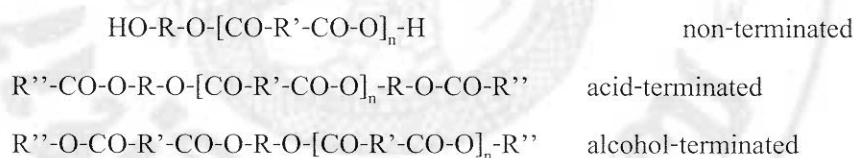
โครงสร้างของพลาสติกไซเซอ์ชนิดฟอสเฟตเอสเทอร์ ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังภาพ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกไซเซอร์ชนิดฟอสเฟตเอสเทอร์

พอลิเอสเทอร์ หรือพอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (Polymeric plasticizers)

พอลิเมอร์- หรือพอลิเอสเทอร์พลาสติกไซเซอร์ ทางการค้าที่ใช้กันส่วนใหญ่คือ พอลิเอสเทอร์อิมิตัวซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดออลและกรดไดคาร์บอกซิลิก ซึ่งในกรณีที่มีการเตรียมใช้ไดออลมากเกินไป ก็จะได้พอลิเมอร์ที่ปลายโซ่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล และมักเอสเทอร์ฟายต่อยกกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (กรดเป็น Terminating agent) แต่ถ้าการเตรียมใช้กรดมากเกินไป จะได้พอลิเมอร์ที่ปลายโซ่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก และมักเอสเทอร์ฟายต่อยกโมโนไฮดรอกแอลกอฮอล์ (แอลกอฮอล์เป็น terminating agent) ดังนั้นพอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร์จึงมีโครงสร้างได้ 3 แบบ ดังนี้



พลาสติกไซเซอร์อื่นๆ (Other plasticizers) ได้แก่

เอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Esters) เอสเทอร์ของกรดไขมันชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น ลอเรต (Laureates) ปาล์มมิเตต (Palmitates) สเตียเรต (Stearates) และริซินโนเลต (Ricinoleates) จัดเป็นผลิตภัณฑ์พิเศษที่ใช้งานเป็นเอกซ์เทนเดอร์ สารหล่อลื่น หรือพลาสติกไซเซอร์เสริม

ซิตริกแอซิดเอสเทอร์ (Citric acid esters) ซิตริกแอซิดเอสเทอร์ หรือซิเตรต (Citrates) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้กันน้อย เนื่องจากมีราคาแพง อย่างไรก็ตามจากการที่สารเหล่านี้ไม่มีอันตราย จึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในฟิล์มหรือท่ออ่อนที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างของพลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้ ได้แก่ ไตร(2-เอทิลเฮกซิล) แอซีทิลซิเตรต (Tri (2-ethylhexyl) acetylcitrate)

ซัลโฟนิคแอซิดเอสเทอร์และซัลโฟนาไมด์ (Sulfonic acid esters and sulfonamides) พลาสติกไซเซอร์ในกลุ่มนี้สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง PVC ข้อดีอย่าง

หนึ่งของพลาสติกไซเซอรในกลุ่มนี้อื มีความทนทานต่อไฮโดรลิซิสแม้ในภาวะที่เป็นด่างในสารละลายแอลกอฮอล์

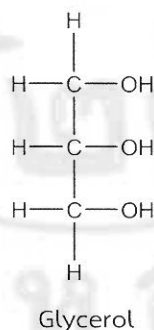
เบนโซอิกแอซิดเอสเทอร์ (Benzoic acid esters) ตัวอย่างของพลาสติกไซเซอรในกลุ่มนี้อื ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอลเบนโซเอต (Diethylene glycol benzoate) สารตัวนี้เป็นพลาสติกไซเซอรของเหลวที่มีสมบัติพลาสติกใกล้เคียงกันกับบิฟทิลเบนซินพทาเลต (BBP) ซึ่งนิยมใช้ในแผ่นไวนิลปูพื้น แต่เบนโซเอตมีข้อดีกว่าคือ ทำให้ฝุ่นจับได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม BBP จะมีราคาสูงกว่า

พลาสติกไซเซอรที่ใช้ในงานวิจัย

พลาสติกไซเซอรที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ กลีเซอรอล และไตรเอทิลซิเตรต ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

■ กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล เป็นไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ (Trihydric alcohol) [16] เป็น พลาสติกไซเซอรชนิดพอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร มีสูตรโมเลกุลคือ $C_3H_8O_3$ มีลักษณะเป็นของเหลวใส หนืดคล้ายน้ำมัน ไม่มีกลิ่น ความหนาแน่นประมาณ 1.26 g/mL มีมวลโมเลกุลประมาณ 92.09 g/mol ซึ่งกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารลดความชื้น สารปรับสภาพการตกผลึก (Crystallization modifier) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล แสดงดังภาพที่ 7

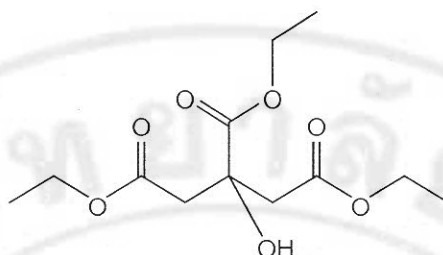


ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล

■ ไตรเอทิลซิเตรต (Triethyl citrate)

ไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอรชนิดไตรเอทิลแอซิดเอสเทอร์ (Citric acid esters) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{12}H_{20}O_7$ ไตรเอทิลซิเตรตมีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ความหนาแน่น

ประมาณ 1.137 g/mL มีมวลโมเลกุลประมาณ 276.283 g/mol ไตรเอทิลซิเตรตเป็น พลาสติกไซเซอร์ที่ไม่มีอันตราย จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในฟิล์มสำหรับอาหาร หรือใช้งานทางการแพทย์ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของไตรเอทิลซิเตรตแสดงภาพที่ 8



Triethyl citrate (TEC)

ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของไตรเอทิลซิเตรต

ฟางข้าว

ฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของไทย ซึ่งในแต่ละปีนั้นจะมีมากมายถึง 25.45 ล้านตันด้วยเหตุที่ประเทศไทยนั้นประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทางเกษตรกรรมโดยเฉพาะการปลูกข้าวซึ่งถือเป็นอาหารหลักของคนในประเทศแม้จะมีการนำฟางข้าวไปประยุกต์ใช้ทำประโยชน์อื่นๆ เช่น นำไปทำเป็นอาหารสัตว์ ทำปุ๋ยหมัก หรือเชื้อเพลิงทางชีวภาพอื่นๆ แล้วก็ตามแต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดฟางข้าวเหล่านี้ให้หมดไปได้ด้วยดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ฟางข้าวที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น เซลลูโลสถึงร้อยละ 49 นอกนั้นเป็น เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) ซิลิกา (Silica) และยังเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรของไทย มาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์เซลลูโลสเอสเทอร์ ส่วนประกอบทางเคมีของฟางข้าวแสดงดังตาราง 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของฟางข้าว [17]

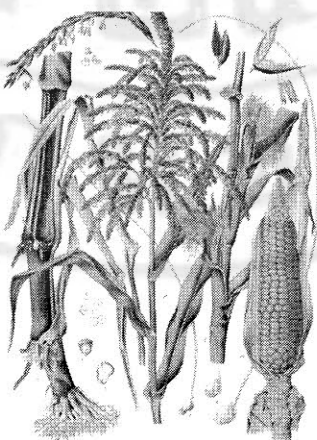
ส่วนประกอบ	ฟางข้าว (%)
เซลลูโลส	49.34
เถ้า	26.08
เฮมิเซลลูโลส	18.06
ลิกนิน	3.30
สารอินทรีย์อื่นๆ	3.22

ข้าวโพด

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Zea mays* Linn.

ชื่ออื่นๆ ข้าวสาลี สาลี (เหนือ) คง (กระบี่) โปด (ใต้) บือเคเสะ (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน) เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้ามีลำต้นสูง โดยเฉลี่ย 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น 0.5-2.0 นิ้ว เมล็ดจากฝักใช้เป็นอาหารคนและสัตว์

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ข้าวโพดเป็นพืชจำพวกหญ้า รากชั่วคราว เรียกว่า ไพร่ หลังจากข้าวโพดเจริญเติบโตได้ประมาณ 7-10 วัน รากถาวรจะงอกขึ้นรอบ ๆ ข้อปลานในระดับใต้พื้นดินประมาณ 1-2 นิ้ว รากถาวรนี้ เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะแผ่ออกไปโดยรอบประมาณ 100 เซนติเมตร รากของข้าวโพดเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) นอกจากรากที่อยู่ใต้ดินแล้ว ยังมีรากยึดเหนี่ยว (brace root) ซึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ ข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน มีลำต้นตั้งตรงแข็งแรง เนื้อภายในพามคล้ายฟองน้ำสูงประมาณ 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 มีสีเขียว ใบ ลักษณะของใบรวมทั้งสีของใบแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพันธุ์ บางพันธุ์ใบสีเขียว บางพันธุ์ใบสีม่วงและบางพันธุ์ใบลาย จำนวนใบก็เช่นเดียวกันอาจมีตั้งแต่ 8-48 ใบ ดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน ช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วนยอดของลำต้น ช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมาอยู่ระหว่างกาบของใบ และลำต้น ช่อดอกตัวผู้ (tassel) อยู่ตอนบนสุดของลำต้น ดอกตัวผู้ดอกหนึ่งจะมีอับเกสร (anther) 3 อับ ส่วนดอกตัวเมียอยู่รวมกันเป็นช่อเกิดขึ้นตอนข้อกลาง ๆ ลำต้น ฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่เจริญเติบโตแล้ว ฝักอ่อนจะมีสีเขียว พอแก่เป็นสีนวล ลักษณะใบข้าวโพดแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะใบของข้าวโพด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยหลายงานด้วยกันที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้พลาสติกไฮเซอร์ ชนิดต่างๆ เพื่อพัฒนาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ยกตัวอย่างเช่น

Yang and Paulson (2000: 563) ได้ทำการศึกษาผลของพลาสติกไฮเซอร์และความชื้นในสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติกันการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเจลาคินที่กินได้ โดยที่มวิจัยพบว่า การเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไฮเซอร์ชนิดหนึ่งลงไปในเจลาคิน ส่งผลให้ฟิล์มเจลาคินที่ได้มีความสามารถในการยืดขยายเพิ่มขึ้นพอสมควรแต่กลับทำให้ความแข็งแรงความทนแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ควรมีการควบคุมปริมาณของกลีเซอรอลที่เติมลงไป เนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลจะส่งผลในทางตรงข้ามกับการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของกลีเซอรอลที่กลีเซอรอลจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ ร้อยละ 60 (เทียบกับน้ำหนักแห้งของฟิล์ม) ซึ่งถ้าใช้ปริมาณของกลีเซอรอลต่ำกว่านี้จะทำให้ฟิล์มเจลาคินที่ได้มีความเปราะและความแข็งแรงลดลง

Liu and Williams (2002: 31) ได้ศึกษาผลของพลาสติกไฮเซอร์ 2 ชนิดคือ ไดเอทิลฟทาเลต และไตรเอทิลซิเทต ที่มีผลต่อฟิล์มเซลลูโลสอะซิเตตฟทาเลต (cellulose acetate phthalate) ซึ่งผลการทดลองพบว่า ไตรเอทิลซิเทตทำให้ฟิล์มเซลลูโลสอะซิเตตฟทาเลตมีร้อยละการยืดตัวที่เพิ่มขึ้นแต่กลับส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความทนแรงดึงและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ใช้ไดเอทิลฟทาเลตเป็นพลาสติกไฮเซอร์ อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ใช้ไดเอทิลฟทาเลตเป็นพลาสติกไฮเซอร์จะมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและความชื้นในขณะที่มีการบ่มฟิล์มโดยใช้ความร้อนและความชื้นต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้ไตรเอทิลซิเทตเป็นพลาสติกไฮเซอร์

Choi and Park (2004: 455) ทำการศึกษาผลของพลาสติกไฮเซอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 4 ชนิด คือ ไตรเอทิลซิเทต ไดบิวทิลฟทาเลต น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดส์ ที่มีผลต่อฟิล์มพอลิ-3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต (PHBV) ผลการศึกษพบว่า ไตรเอทิลซิเทตและไดบิวทิล ฟทาเลตส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของฟิล์ม PHBV ลดต่ำลง ในขณะที่เดียวกันกลับไปเพิ่มค่าการยืดตัวที่จุดขาดและความทนแรงกระแทกของฟิล์ม PHBV มากกว่าการใช้ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดส์เป็นพลาสติกไฮเซอร์

Park *et al.* (2004: 2281) ทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตของเซลลูโลสอะซิเตตและดินเหนียวโดยใช้ไตรเอทิลซิเทตเป็นพลาสติกไซเซอร် คณะวิจัยพบว่าการใช้ดินเหนียวในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการใช้ไตรเอทิลซิเทตในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุเซลลูโลสนาโนคอมพอสิตมีโครงสร้างแบบการสอดแทรก (intercalation) และโครงสร้างแบบการกระจาย (exfoliation) ที่ดีกว่าการใช้ไตรเอทิลซิเทตเป็นพลาสติกไซเซอร်ในปริมาณร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้คณะวิจัยยังพบว่าความทนแรงดึง ค่ามอดูลัส และความเสถียรต่อความร้อนของเซลลูโลสนาโนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยดินเหนียวนี้จะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอร်จากร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

Talja *et al.* (2007: 288) ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร်ชนิดต่างๆ (กลีเซอรอล ไซลิทอล และซอบิทอล) และผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ใช้กินได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณของพลาสติกไซเซอร် คณะนักวิจัยพบว่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอร်และความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่ามอดูลัสของแข็งของฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอร်ในขณะที่ฟิล์มกลับมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

Osés *et al.* (2007) ทำการศึกษาดัชนีผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาชิ้นงานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มเวย์โปรตีน (Whey protein isolate, WPI) ที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร်ชนิดพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและซอบิทอล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร်ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าซอบิทอล นั่นคือฟิล์มเวย์โปรตีนที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร်จะมีความยืดหยุ่นดีกว่าฟิล์มที่ใช้ซอบิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร်ในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกลีเซอรอลและซอบิทอลที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นพลาสติกไซเซอร်ของฟิล์มเวย์โปรตีนคือ ร้อยละ 40 และร้อยละ 50 ตามลำดับ ซึ่งถ้าเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร်มากเกินไปจนจุดที่เหมาะสมนี้จะส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นลดลงและมีความอ่อนตัวเพิ่มขึ้น การศึกษาดัชนีผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาฟิล์มที่มีต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพบว่าระยะเวลาในการเก็บรักษาฟิล์มไม่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพภายนอกและสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร် แต่อย่างไรก็ตามผลการวิจัยพบว่าฟิล์มที่ใช้ซอบิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร်จะมีความยืดหยุ่นที่ลดลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาฟิล์มอันเนื่องมาจากการเกิดผลึกของซอบิทอล

Behjat et al. (2009:243) ทำการเตรียมชิ้นงานไบโอคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนกับเส้นใยปอแก้ว โดยมีพอลิเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทีมวิจัยได้ทำการศึกษาความสามารถในการสลายตัวของวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดนี้โดยใช้วิธีการฝังดิน (soil burial test) และทำการศึกษาผลของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและชนิดความหนาแน่นสูงกับเซลล์โอสมีอัตราการย่อยสลายที่ค่อนข้างเด่นชัด และอัตราการสลายตัวทางชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลล์โอสที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพลาสติกไซเซอร์จะมีอัตราการสลายตัวทางชีวภาพที่เร็วกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์



อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด จำนวนตัวอย่างละ 200 กรัม

สารเคมี สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 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 TM
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 and Stirrer
2. บีกเกอร์ 50 100 250 2,000 และ 5,000 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้วคนสาร
4. เทอร์โมมิเตอร์ 100°C
5. กระชอนฟักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
6. ตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

7. ตู้อบ (hotbox oven size 2) รุ่น GALLENKAMP บริษัท ไทยโพลีเมติก จำกัด
8. แท่งแม่เหล็กกวนสารขนาดความยาว 2 และ 5 เซนติเมตร
9. กระดาษกรองเบอร์ 4
10. เตาไมโครเวฟ
11. แม่พิมพ์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆของผงเซลลูโลสและเซลลูโลสดัดแปร

- เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT - IR) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทมิเตอร์ที่ใช้คือรุ่น Spectrum RX ซึ่งใช้ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและหาระดับการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน (Degree of Substitution) ในเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้
- เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่นที่ใช้คือ Mettler Toledo DSC822° ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้
- เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA) รุ่นที่ใช้คือ Mettler Toledo, TGA/SDTA 851° ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวและเสถียรภาพทางความร้อนของเซลลูโลสเทียบกับเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร

- เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) รุ่นที่ใช้คือ MODEL LLOYD LR 10K ใช้ทดสอบความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมเซลลูโลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด

- นำฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ 200 กรัม
- กำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5% w/v ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองแล้วล้างเชื้อฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

- เมื่อได้ฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการกำจัดลิกนินแล้วนำไปทำการฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 10% v/v ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองแล้วล้างเยื่อที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
- ทำการไฮโดรลิซิสเยื่อที่ผ่านการฟอกสีโดยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 M ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ผงเซลลูโลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดในสารละลายกรด ในขั้นตอนนี้จึงต้องทำการเจือจางความเป็นกรดด้วยการเติมน้ำกลั่นลงไป ทดสอบความเป็นกรดด้วยกระดาษลิตมัสจนแน่ใจแล้วว่าได้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง
 - นำผงเซลลูโลสที่ได้ไปกรองเอาน้ำออกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - เก็บผงเซลลูโลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรแล้วลงในโถดูดความชื้น
 - หาปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่าง (%yield) โดยคำนวณสูตรได้จากสมการที่ 1

$$\% \text{ conversion} = \frac{\text{น้ำหนักเซลลูโลสที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักก่อนการสกัด}} \times 100 \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2 การดัดแปรผงเซลลูโลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

- ชั่งผงเซลลูโลสที่สกัดได้จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด มา 2 กรัม
- นำผงเซลลูโลสที่ชั่งได้ เติมโทลูอีน (Toluene) 15 มิลลิลิตร คนสารตลอดเวลาเป็นเวลา 10 นาที
- จากนั้นเติม ลอโรอิลคลอไรด์ (Lauroyl Chloride) 10 มิลลิลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยาไพริดีน (Pyridine) 5 มิลลิลิตร คนสารตลอดเวลาเป็นเวลา 10 นาที
- เมื่อได้สารละลายในขั้นต้นแล้ว จากนั้นทำการดัดแปรโครงสร้างโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อน สภาวะที่ใช้คือพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที
 - เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์จะได้สารละลายเซลลูโลสที่ผ่านการดัดแปรแล้ว จากนั้นจึงแยกเซลลูโลสเอสเทอร์ที่ได้ด้วยการตกตะกอนและล้างในเอทานอล
 - ทำการกรองเอาผงเซลลูโลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรแล้ว จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- เก็บผงเซลล์โลสจากฟางข้าวที่ผ่านการตัดแปรแล้วลงในโถดูดความชื้น
- ทำการชั่งน้ำหนักผงเซลล์โลสตัดแปรที่ได้ จากนั้นคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

(% Weight Increase) ของผงเซลล์โลสตัดแปรที่ได้ จากสมการ 2

$$\% \text{ Weight Increase} = \frac{\text{น้ำหนักเซลล์โลสหลังตัดแปร} - \text{น้ำหนักเซลล์โลสก่อนตัดแปร}}{\text{น้ำหนักเซลล์โลสก่อนตัดแปร}} \times 100 \quad (2)$$

- นำผงเซลล์โลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรแล้วไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มเซลล์โลสตัดแปร

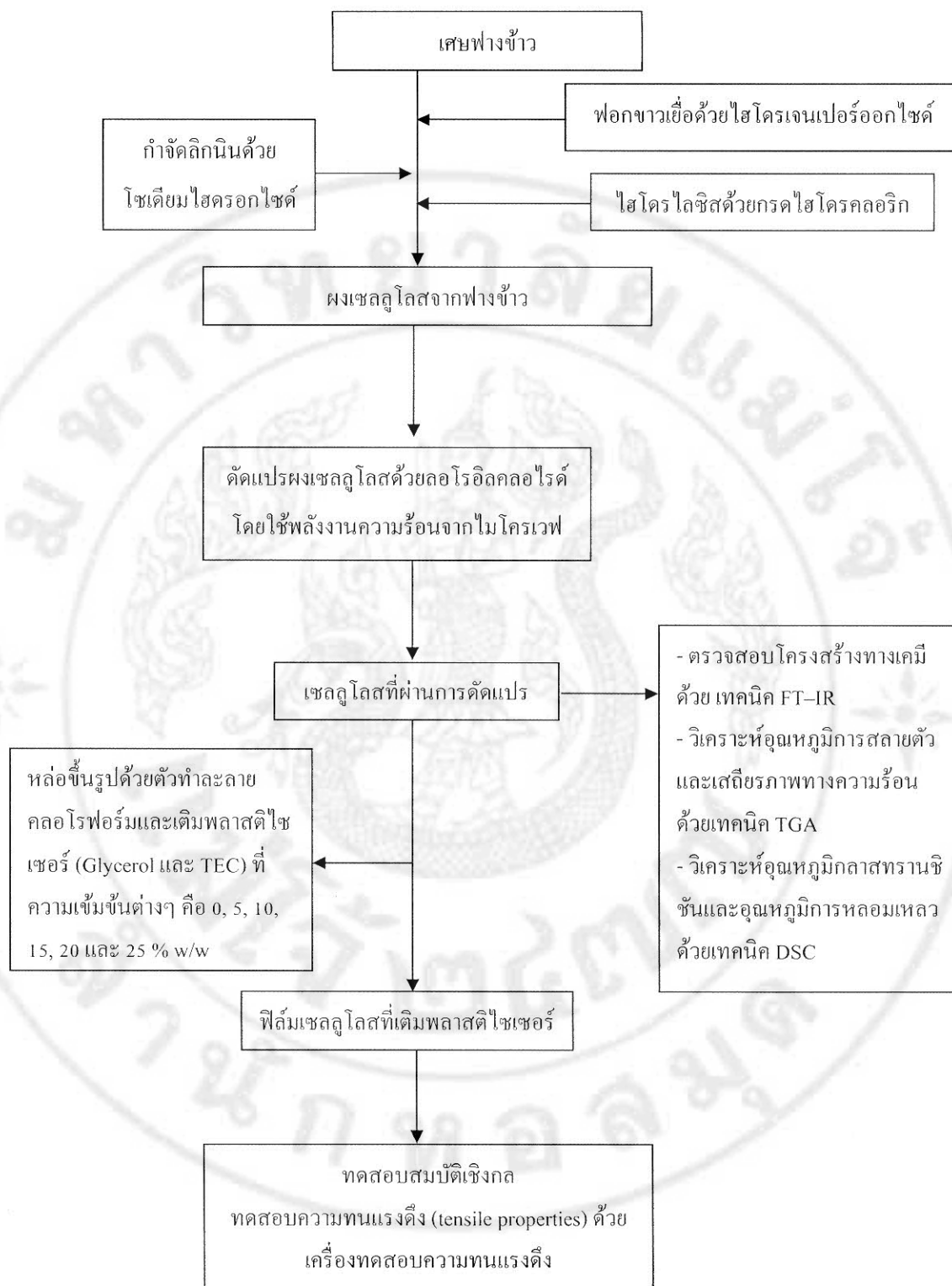
- นำผงเซลล์โลสที่ผ่านการตัดแปรแล้วชั่งมาประมาณ 2 กรัม
- นำมาละลายในคลอโรฟอร์ม 20 มิลลิลิตรคนให้ผงเซลล์โลสตัดแปรละลาย
- เติมพลาสติกไซเซอรัคคือกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้คือ 0 5 10 15 20 และ 25

%w/w เทียบกับน้ำหนักแห้งของผงเซลล์โลสเอสเทอร์

- รอให้คลอโรฟอร์มระเหยประมาณ 30 นาที ทำการลอกแผ่นฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรออก
- ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนชนิดของพลาสติกไซเซอรัค จากกลีเซอรอลเป็นไตร

เอทิลซีเตท

สำหรับขั้นตอนการทดลองโดยรวมของการสังเคราะห์เซลล์โลสเอสเทอร์และการเตรียมฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้พลังงานไมโครเวฟในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการทดลองการเตรียมฟิล์มเซลล์ูโลสดัดแปรจากฟางข้าว

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของผงเซลลูโลสดัดแปร

ทดสอบสมบัติการละลายของผงเซลลูโลสดัดแปร

ทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสโดยใช้ตัวทำละลาย 7 ชนิด คือ เฮกเซน (Hexane) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) อะซิโตน (Acetone) โทลูอีน (Toluene) เมทานอล (Methanol) และ เอทานอล (Ethanol) โดยใช้ปริมาณผงเซลลูโลสดัดแปร 0.1 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 1 มิลลิลิตร โดยทำการละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)

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

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัว

วิเคราะห์และตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสดัดแปรด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA) โดยการนำเอาผงเซลลูโลสดัดแปรที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการให้ความร้อนด้วยอัตราเร็ว $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อ 1 นาที โดยให้อุณหภูมิจาก $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปจนถึง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและทำการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนและช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสโดยดูจากน้ำหนักที่หายไปของเซลลูโลส

อุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลว

วิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของเซลลูโลสดัดแปรด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) โดยใช้ผงเซลลูโลสปริมาณ 5-10 มิลลิกรัม มาบรรจุลงในแพนอะลูมิเนียมจากนั้นจึงทำการทดสอบโดยการ

ให้ความเย็นลงมาถึงอุณหภูมิ 25 °C แล้วจึงค่อยๆ ให้ความร้อนต่อไปจนถึง 250 °C โดยใช้อัตราในการให้ความร้อน 10 °C ต่อ 1 นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

การทดสอบสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Tensile test) ของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร

ทดสอบฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 โดยใช้ฟิล์มที่มีขนาด 7.5×0.80 เซนติเมตร ใช้ระยะห่างระหว่างตัวจับขึ้นทดสอบ 5 เซนติเมตร และทำการดึงด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตร ต่อนาที แล้วรายงานค่าความทนแรงดึง ค่ามอดุลัสและค่าร้อยละการยืดตัวที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลส

ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เกิดขึ้นเพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้จาก ฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮเซอรที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้ เซลลูโลสเอสเทอร์จะถูกเตรียมด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับสารดัดแปรชนิดคลอไรด์ของกรดไขมันภายใต้ระบบที่มีโทลูอีนเป็นตัวทำละลายและมีไพรีดินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วจึงนำเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้มาผสมกับพลาสติกไฮเซอรแต่ละชนิดที่ปริมาณต่างๆ จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มเซลลูโลสโดยวิธีการหล่อแบบเพื่อทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮเซอรที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์ที่เตรียมได้

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัยในส่วนของงานวิจัยในปีงบประมาณ 2557 เป็นส่วนของผลการทดลองที่ได้จากวัตถุดิบของเซลลูโลสที่เป็นฟางข้าว ส่วนในปีงบประมาณ 2558 ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจะได้นำเสนอผลการทดลองของเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดเป็นลำดับถัดไป

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดที่สังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟเพื่อให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มพลาสติกทดแทนการใช้ฟิล์มพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเคมี โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์เซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน ใช้ลอโรลคลอไรด์เป็นสารคัดแปร มีโทลูอินและไพรดีนเป็นตัวทำละลายและตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ ใช้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นทำการทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสคัดแปรที่เตรียมได้ ทำการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของผงเซลลูโลสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ทำการวิเคราะห์และตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสคัดแปรด้วยเทคนิคเทอร์โม กราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA) และทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (DSC) จากนั้นนำผงเซลลูโลสคัดแปรจากฟางข้าวไปทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปและเติมพลาสติกไซเซอร์คือ กลีเซอรอล และไตรเอทิลซิเตตที่ความเข้มข้นต่างๆตั้งแต่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 25 โดยน้ำหนักของผงเซลลูโลสคัดแปร แล้วทำการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง ซึ่งผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (% Weight Increase)

การทดลองนี้ได้ทำการคัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสด้วยสารคัดแปร ซึ่งสารคัดแปรที่ใช้คือลอโรลคลอไรด์ โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในการคัดแปร ใช้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ระยะเวลา 15 นาที ซึ่งในการคัดแปรนั้นจะส่งผลให้เซลลูโลสมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องมาจากโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการคัดแปร เช่น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการคัดแปร ซึ่งการคำนวณร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสคัดแปรสามารถหาได้จากสมการ 2 และผลการทดลองแสดงดังตาราง 3

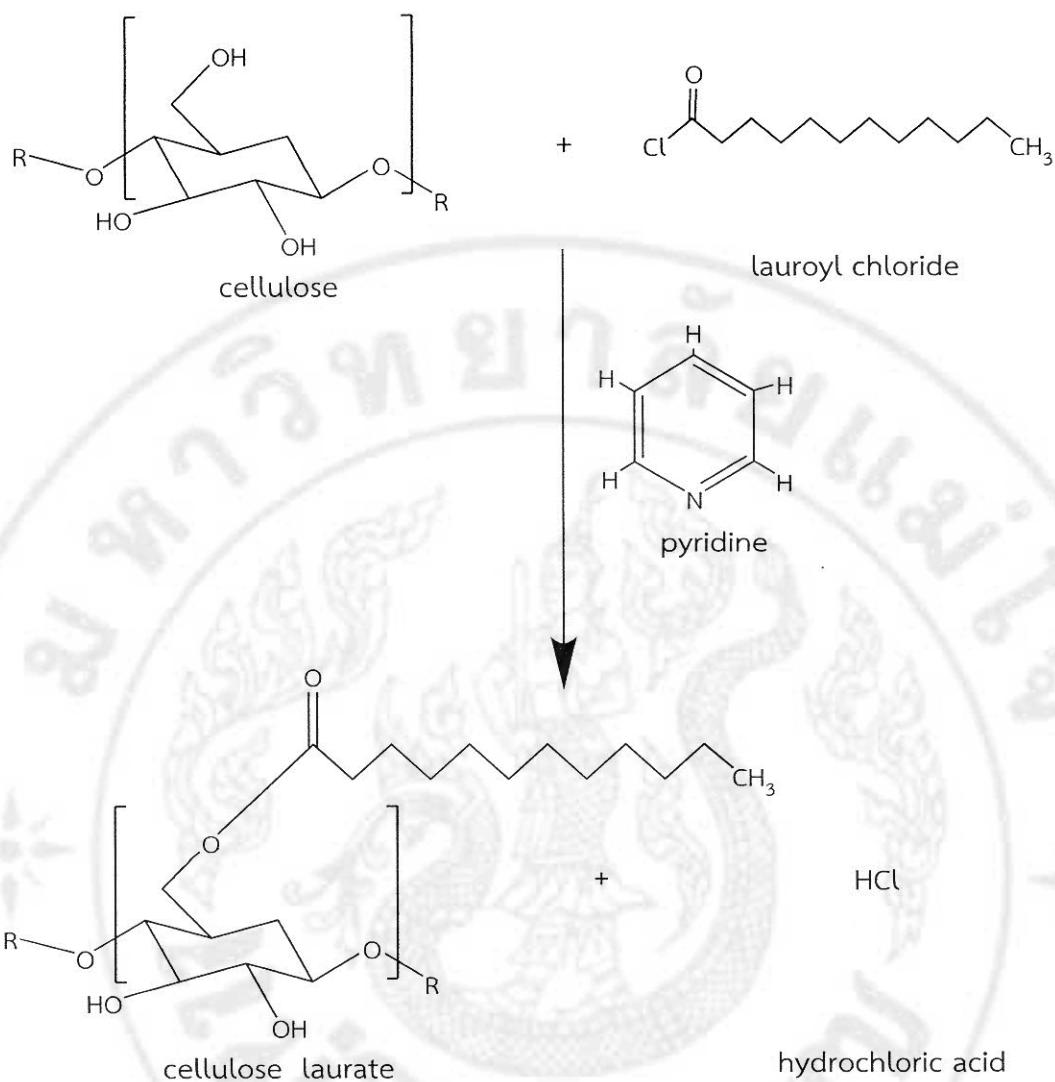
$$\% \text{ Weight Increase} = \frac{\text{น้ำหนักเซลลูโลสหลังดัดแปร} - \text{น้ำหนักเซลลูโลสก่อนดัดแปร}}{\text{น้ำหนักเซลลูโลสก่อนดัดแปร}} \times 100 \quad (2)$$

ตาราง 3 แสดงค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสดัดแปรที่สังเคราะห์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ระยะเวลา 15 นาที

ครั้งที่ทำการทดลอง	น้ำหนักเซลลูโลสก่อนดัดแปร (g)	น้ำหนักเซลลูโลสหลังดัดแปร (g)	ร้อยละน้ำหนักของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น (% Weight Increase)
1	2.00	4.86	142.86
2	2.00	4.89	144.47
3	2.00	4.79	139.45
4	2.00	4.90	144.77
5	2.00	5.00	150.01
6	2.00	5.00	150.21
7	2.00	4.88	143.93
8	2.00	4.90	144.97
9	2.00	4.68	133.91
เฉลี่ย	2.00	4.88	143.84

ผลการทดลองพบว่า ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสดัดแปรจากฟางข้าว มีค่าเท่ากับร้อยละ 143.84

จากผลการทดลองจะพบว่าเซลลูโลสภายหลังจากการดัดแปรนี้มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสจะถูกแทนที่ด้วยสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์เกิดเป็นเซลลูโลสลอเรต (Cellulose laurate) ซึ่งการแทนที่ของสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์จะทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนลดลง และส่งผลให้เซลลูโลสดัดแปรที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของเซลลูโลสกับลอโรอิลคลอไรด์

2. การทดสอบสมบัติการละลาย (Solubility)

ผลการทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสดัดแปรจากฟางข้าว โดยใช้ตัวทำละลาย 6 ชนิดคือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน อะซิโตน เมทานอล และ เอทานอล โดยใช้ปริมาณผงเซลลูโลสดัดแปร 0.1 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 1 มิลลิลิตร โดยทำการละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 ความสามารถในการละลายของผงเซลล์โลสตัดแปรจากฟางข้าวในตัวละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	ก่อนตัดแปร	หลังตัดแปร
ตัวทำละลายไม่มีขี้		
คลอโรฟอร์ม	-	++
ไดคลอโรมีเทน	-	+
เฮกเซน	-	+
ตัวทำละลายมีขี้		
เมทานอล	-	-
เอทานอล	-	-
อะซิโตน	-	-

*++ ละลายได้ดี, + ละลายบางส่วน, - ไม่ละลาย

จากตาราง 4 จากการทดสอบพบว่าเซลล์โลสก่อนการตัดแปรด้วยคลอโรอิลคลอไรด์ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดใดได้เลย ทั้งตัวทำละลายที่มีขี้ เช่น เมทานอล เอทานอลและ อะซิโตน และตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ เช่น คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และ เฮกเซน เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์โลสมีความเป็นผลึกสูงทำให้ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทั้งมีขี้และไม่มีขี้

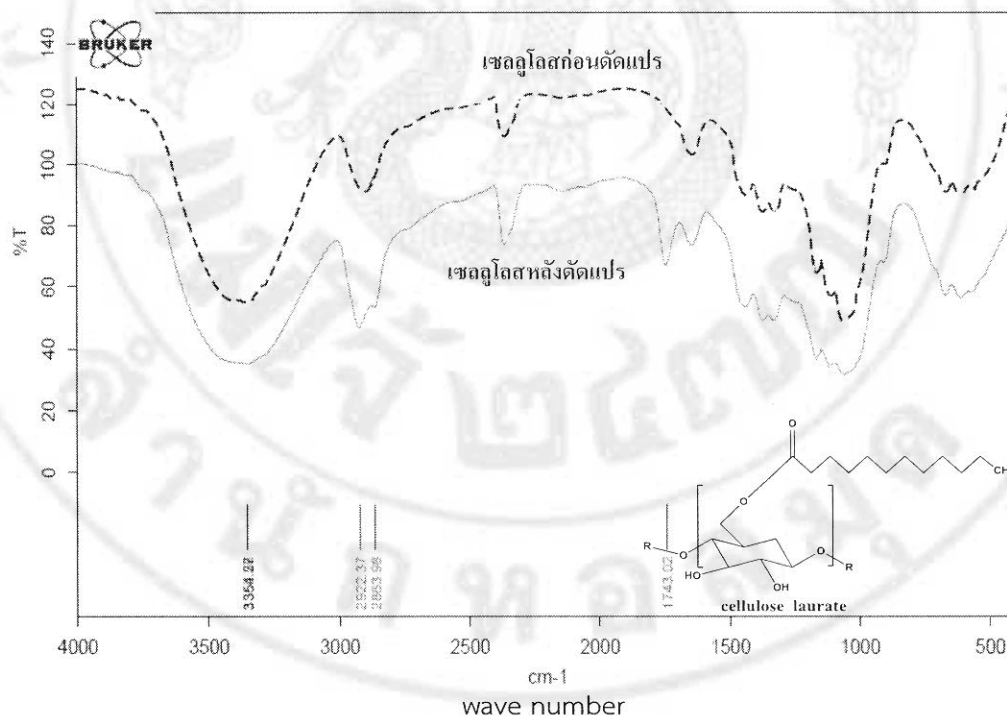
สำหรับเซลล์โลสภายหลังจากการตัดแปรพบว่าความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น โดยเซลล์โลสตัดแปรสามารถละลายได้ดีมากในคลอโรฟอร์ม ละลายได้ดีในไดคลอโรมีเทนและโทลูอีน และละลายได้บางส่วนในเฮกเซน แต่ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายมีขี้อย่าง อะซิโตน เมทานอล และเอทานอล สาเหตุที่เซลล์โลสตัดแปรไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดมีขี้ได้ เนื่องจากเมื่อทำการตัดแปรแล้วหมู่ไฮดรอกซิลของเซลล์โลสลดลงจากการถูกแทนที่ด้วยสายโซ่จากสารตัดแปร ทำให้ความมีขี้ของเซลล์โลสลดน้อยลงจนไม่อาจละลายในตัวทำละลายที่มีขี้ได้ ส่วนสาเหตุที่ทำให้เซลล์โลสตัดแปรละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ นั่นก็เพราะว่าการที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างทางเคมีของเซลล์โลสหลังตัดแปรถูกแทนที่ด้วยสายโซ่ของสารตัดแปร ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของเซลล์โลสลดลงทำให้ความเป็นผลึกลดลง และทำให้ความมีขี้ของเซลล์โลสลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้

เซลลูโลสมีขั้วน้อย จึงทำให้เซลลูโลสสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ตามหลักการ “like dissolves like” นั่นเอง

จากผลการทดสอบสมบัติการละลายพบว่าตัวทำละลายที่สามารถละลายผงเซลลูโลสจากฟางข้าวภายหลังจากการดัดแปรได้ดีคือ คลอโรฟอร์ม จึงได้เลือกใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

3. การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)

การดัดแปร โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสจากฟางข้าวแสดงยืนยันได้จากผลของอินฟราเรดสเปกตรัมจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11 และค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของเซลลูโลสจากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพดก่อนดัดแปรและหลังดัดแปรแสดงดังตาราง 5



ภาพที่ 11 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซลลูโลสจากฟางข้าวก่อนการดัดแปรเทียบกับเซลลูโลสเอสเทอร์ภายหลังดัดแปร

ตาราง 5 แสดงค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆในเซลลูโลสก่อนและหลังดัดแปร

Wavenumber (cm ⁻¹)	Band Assignments
Cellulose	
3354	OH stretching
2920	CH stretching of CH ₂
1660	H – O – H bending of absorbed water
1442	CH wagging (in – plan bending)
1370	CH bending (deformation stretch)
1334	OH in – plane bending
1283	CH deformation stretch
1168	Anti – symatric bridge C-O-C stretching
1113	Anti – symatric bridge C-O-C stretching
1033	C- O stertching
895	Anti – symatric out – of – phase ring
	Stretch : Cl – O – C4 ; β - glucosidic bond
701	O – H out of plane bending
661	O – H out of plane bending
Cellulose laurate	
3354	OH stretching
2922 , 2863	CH stretching due to CH ₂ and CH ₃
1743	C = O stretching of ester
1660	H – O – H bending of absorbed water
1442 , 1370	CH ₂ bending, C – H bending
1283	CH deformation stretch
1168 , 1163	Anti – symatric bridge C-O-C stretching
1033	C- O stertching
895	Anti – symatric out – of – phase ring
	Stretch : Cl – O – C4 ; β - glucosidic bond
701	O – H out of plane bending
660	O – H out of plane bending

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลังจากเซลลูโลสจากฟางข้าวถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยลอโรอิลคลอไรด์แล้ว เซลลูโลสดัดแปรจะแสดงพีกสำคัญที่แตกต่างไปจากพีกเดิมของเซลลูโลสก่อนการดัดแปร 3 ตำแหน่งด้วยกัน นั่นก็คือ พบพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1743.02 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ในหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของลอโรอิลคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารดัดแปรที่เข้ามาแทนที่ตรงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบพีกสำคัญที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2922.37 cm^{-1} และ 2863.98 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ C-H stretching ของสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์ในสเปกตรัมของเซลลูโลสภายหลังจากการดัดแปร และพบพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3354.25 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสที่มีความสูงของพีกลดต่ำลง

จากที่กล่าวมาในข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสจากฟางข้าวเกิดการแทนที่ด้วยสายโซ่ของลอโรอิลคลอไรด์ เกิดเป็นเซลลูโลสลอเรต (Cellulose laurate)

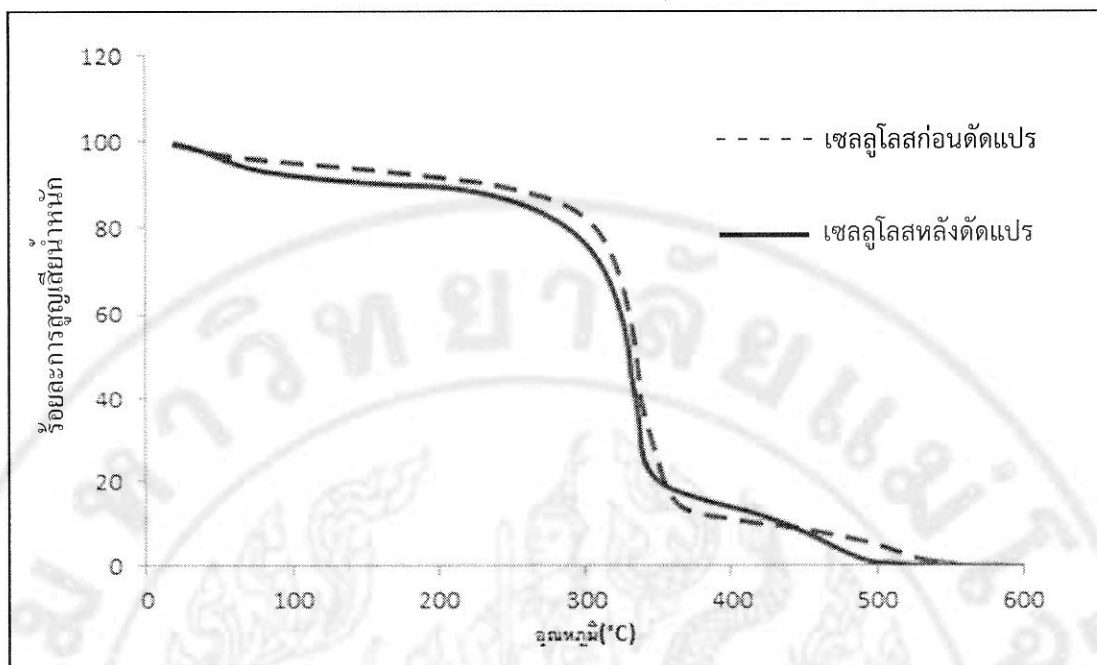
4. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

4.1 อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation Temperature; T_d)

อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation Temperature : T_d) ของผงเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวก่อนดัดแปรและหลังดัดแปร สามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA) ด้วยเครื่อง TGA ซึ่งไทรโมแกรมของเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวก่อนและหลังการดัดแปรแสดงดังภาพที่ 12

จากภาพที่ 12 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสจากฟางข้าวก่อนและหลังดัดแปร จากผลการทดลองพบว่าเซลลูโลสจากฟางข้าวก่อนดัดแปรมีการสูญเสียน้ำหนักสองช่วงคือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ประมาณ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 4 ซึ่งเกิดจากการระเหยออกไปของความชื้นที่อยู่ในเซลลูโลสจากฟางข้าวเกิด การสลายตัว ส่วนช่วงที่สองที่อุณหภูมิประมาณ $270 - 370$ องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของเซลลูโลส ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงนี้เท่ากับร้อยละ 67.14

สำหรับเซลลูโลสภายหลังจากการดัดแปรพบว่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่สองช่วงคือช่วงแรก ที่อุณหภูมิประมาณ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในเซลลูโลสดัดแปรเกิดการระเหยออกไป ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงนี้เท่ากับร้อยละ 6 ส่วนช่วงที่สองที่อุณหภูมิประมาณ $260 - 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของเซลลูโลสดัดแปร ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงนี้เท่ากับร้อยละ 71.52



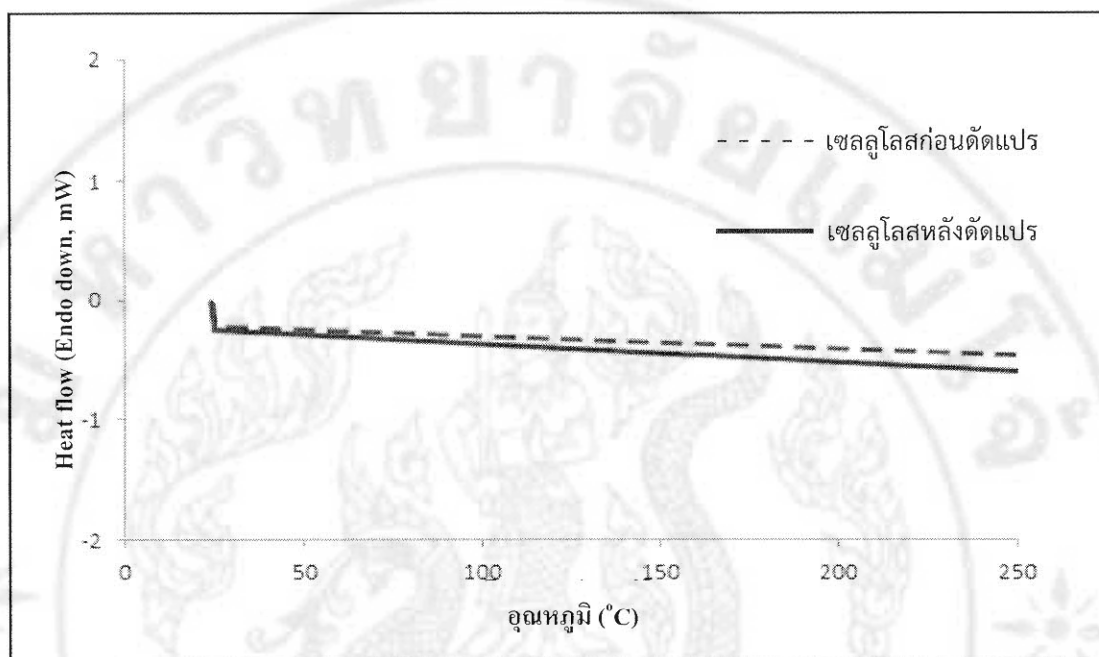
ภาพที่ 12 TGA เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสจากฟางข้าวเทียบกับเซลลูโลสดัดแปร

เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมแกรมของฟางข้าวก่อนและหลังดัดแปรพบว่าเซลลูโลสจากฟางข้าวหลังผ่านการดัดแปรมีสมบัติทางความร้อนที่ลดลง กล่าวคือมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าเซลลูโลสประมาณ 10°C คือจากเดิมที่เซลลูโลสเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 270°C ภายหลังจากการดัดแปรเซลลูโลสหลังดัดแปรเริ่มเกิดการสลายตัวก่อนเซลลูโลสจากฟางข้าวที่อุณหภูมิ 260°C นอกจากนี้ยังพบว่าเซลลูโลสหลังดัดแปรมีน้ำหนักที่สูญหายไปอันเนื่องมาจากความชื้นที่ยังหลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 6 ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสที่หลงเหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยา ซึ่งยืนยันได้จากสเปกตรัมของ FTIR

4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Melting Temperature, Glass Transition Temperature)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเซลลูโลสจากฟางข้าวก่อนและหลังดัดแปร สามารถวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature: T_m) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass Transition Temperature: T_g)

ในการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และอุณหภูมิการหลอมเหลวของเซลลูโลสจาก ฟางข้าวก่อนและหลังดัดแปร จะใช้อุณหภูมิในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 25-250 °C ผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 DSC เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสก่อนดัดแปรเทียบกับเซลลูโลสดัดแปร

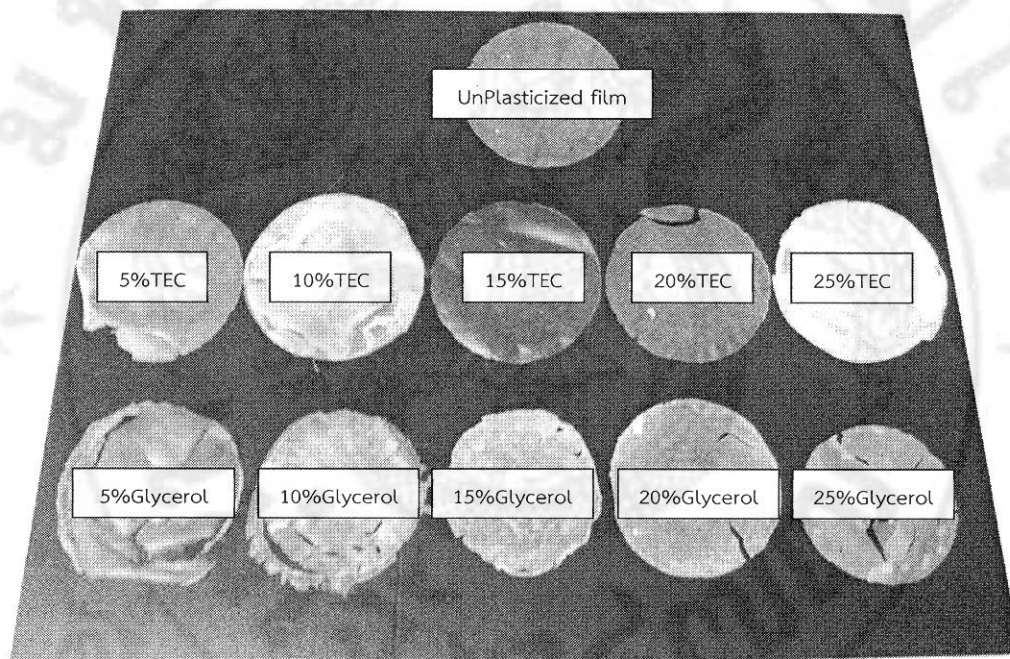
จากภาพที่ 13 DSC เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสก่อนดัดแปรเทียบกับเซลลูโลสดัดแปร พบว่าเทอร์โมแกรมของเซลลูโลสก่อนการดัดแปร ไม่พบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และ อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ทั้งนี้เนื่องมาจากเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก ซึ่งการที่เซลลูโลส มีความเป็นผลึกสูงมากจึงอาจทำให้เซลลูโลสมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่สูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิ การสลายตัวของเซลลูโลส ดังนั้นจึงทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆในช่วงอุณหภูมิ 25 – 250 °

ส่วนเซลลูโลสดัดแปร ผลการทดลองไม่พบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และอุณหภูมิการ หลอมเหลว (T_m) ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ เช่นเดียวกันกับเซลลูโลสก่อนดัดแปร คาดว่าเกิด จากเซลลูโลสดัดแปรยังคงมีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของ เซลลูโลสนั่นเอง

5. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลส

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปรผงเซลลูโลสจากฟางข้าวโดยใช้พลังงานความร้อนจากไมโครเวฟ ที่ 100 W เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นนำผงเซลลูโลสดัดแปรที่ได้ไปทำการหล่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย เพราะจากการทดสอบสมบัติการละลายพบว่าเซลลูโลสดัดแปรสามารถละลายได้ดีที่สุดในคลอโรฟอร์ม

จากนั้นได้ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสโดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปด้วยกัน 2 ชนิดคือ กลีเซอรอล และ ไตรเอทิลซิเตท ที่ความเข้มข้น 5 10 15 20 และ 25 % w/w ซึ่งลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมและไม่เติมพลาสติกไซเซอร์แสดงดังภาพที่ 14

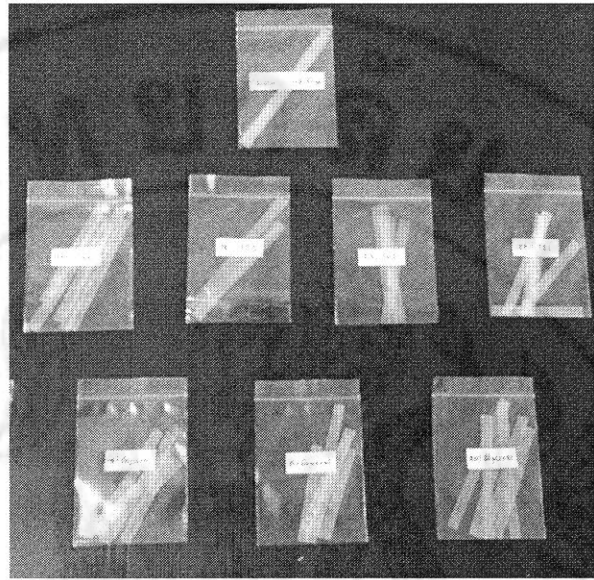


ภาพที่ 14 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มเซลลูโลส

จากภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ที่เตรียมได้มีลักษณะขาวขุ่น ส่วนแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร์คือ ไตรเอทิลซิเตท สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้มีความใส มีความยืดหยุ่น ส่วนแผ่นฟิล์มที่เติม กลีเซอรอลจะสังเกตเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มที่ได้นั้นมีความเปราะและแตกหักง่ายมาก เป็นผลอันเนื่องมาจากกลีเซอรอลไม่สามารถเข้ากันได้ดีกับเซลลูโลส

6. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเซลลูโลส

การทดสอบความทนแรงดึงเพื่อหาความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร ทำได้โดยการนำแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่ได้ไปทำการตัดให้มีขนาดเท่ากับ 7.5×0.80 เซนติเมตร ภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ตัวอย่างแผ่นฟิล์มก่อนส่งทดสอบ

เมื่อเราได้แผ่นฟิล์มที่มีขนาด 7.5×0.8 เซนติเมตร แล้วจะนำเข้าสู่เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง โดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวจับขึ้นทดสอบ 5 เซนติเมตร และทำการดึงด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งฟิล์มขาดจากกัน จะทำให้ทราบค่าความทนแรงดึง (Tensile Strength) ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) ของฟิล์มเซลลูโลสดัดแปร

การคำนวณหาความทนแรงดึง ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังต้องทำการวัดพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม โดยค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม

พลาสติกไซเซอร์	ฟิล์ม	พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$	แรงดึงแผ่นฟิล์ม (N)	ระยะยืด (mm)
	เซลลูโลส			
ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	1	2.00	3.63	1.59
	2	2.48	3.92	1.76
	3	2.00	3.62	1.35
	เฉลี่ย	2.16	3.72	1.57
กลีเซอรอล 5 % w/w	1	2.24	2.52	0.93
	2	1.68	2.82	1.31
	3	1.44	2.47	1.31
	เฉลี่ย	1.79	2.60	1.18
กลีเซอรอล 10 % w/w	1	4.08	3.78	1.55
	2	3.52	3.22	1.63
	3	3.76	2.22	1.19
	เฉลี่ย	3.79	3.07	1.46
กลีเซอรอล 15 % w/w	1	2.64	3.26	1.76
	2	2.96	2.97	1.28
	3	2.56	3.15	1.59
	เฉลี่ย	2.72	3.1-	1.54
กลีเซอรอล 20 % w/w	1	1.68	3.40	1.46
	2	1.52	3.15	1.51
	3	1.44	3.29	2.03
	เฉลี่ย	1.55	3.28	1.67
ไตรเอทิลซิเตรต 5 % w/w	1	1.28	1.23	1.52
	2	1.44	1.29	1.30
	3	1.36	1.20	1.33
	เฉลี่ย	1.36	1.24	1.38

ตาราง 6 ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม ระยะยืด และค่าแรงดึงแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

พลาสติกไฮเซอร์	ฟิล์ม	พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$	แรงดึง แผ่นฟิล์ม (N)	ระยะยืด (mm)
	เซลลูโลส			
ไทรเอทิลซิเตรต 10 % w/w	1	1.28	1.36	1.36
	2	1.12	1.23	1.21
	3	1.20	0.98	1.07
	เฉลี่ย	1.20	1.19	1.21
ไทรเอทิลซิเตรต 15 % w/w	1	1.12	1.69	1.92
	2	1.28	1.73	1.85
	3	1.28	1.65	1.68
	เฉลี่ย	1.22	1.69	1.81
ไทรเอทิลซิเตรต 20 % w/w	1	1.84	1.49	1.20
	2	1.52	1.43	1.20
	3	1.76	1.48	1.16
	เฉลี่ย	1.70	1.46	1.18
ไทรเอทิลซิเตรต 25 % w/w	1	1.12	1.47	0.95
	2	1.28	1.29	0.74
	3	1.28	1.31	0.85
	เฉลี่ย	1.22	1.35	0.84

จากตารางที่ 6 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความทนแรงดึง ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) ผลการคำนวณแสดงดังตาราง 7 – 16

ตาราง 7 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสชนิดไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.81	3.19	94.88
2	1.58	3.51	131.48
3	1.81	2.70	121.44
เฉลี่ย	1.73	3.13	115.93
SD	0.13	0.41	18.91

ตาราง 8 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 5 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.13	1.86	129.24
2	0.74	1.95	99.02
3	0.92	1.49	124.20
เฉลี่ย	0.93	1.77	117.49
SD	0.20	0.24	16.19

ตาราง 9 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติมกลีเซอรอล 10 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	0.88	3.83	35.48
2	0.93	3.13	45.88
3	0.92	3.36	45.72
เฉลี่ย	0.91	3.44	42.36
SD	0.03	0.36	5.96

ตาราง 10 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
กลีเซอรอล 15 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.07	2.54	95.03
2	1.23	3.55	54.24
3	1.23	3.25	64.74
เฉลี่ย	1.18	3.11	71.33
SD	0.09	0.52	21.18

ตาราง 11 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
กลีเซอรอล 20 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.42	2.43	86.05
2	1.50	2.83	98.37
3	1.40	2.96	116.8
เฉลี่ย	1.44	2.74	100.40
SD	0.05	0.27	15.47

ตาราง 12 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม
ไตรเอทิลซิเตรต 5 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	0.90	2.76	58.72
2	0.89	2.59	65.96
3	0.89	2.73	67.78
เฉลี่ย	0.89	2.69	64.15
SD	0.01	0.09	4.79

ตาราง 13 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 10 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.07	2.74	73.65
2	1.10	2.44	116.37
3	0.82	2.13	67.95
เฉลี่ย	1.00	2.44	85.99
SD	0.15	0.31	26.46

ตาราง 14 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 15 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.23	4.22	62.17
2	1.51	3.85	74.02
3	1.35	3.70	65.14
เฉลี่ย	1.36	3.92	67.11
SD	0.14	0.27	6.16

ตาราง 15 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 20 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	0.81	2.40	57.70
2	0.94	2.40	72.22
3	0.84	2.34	56.49
เฉลี่ย	0.86	2.38	62.14
SD	0.07	0.03	8.75

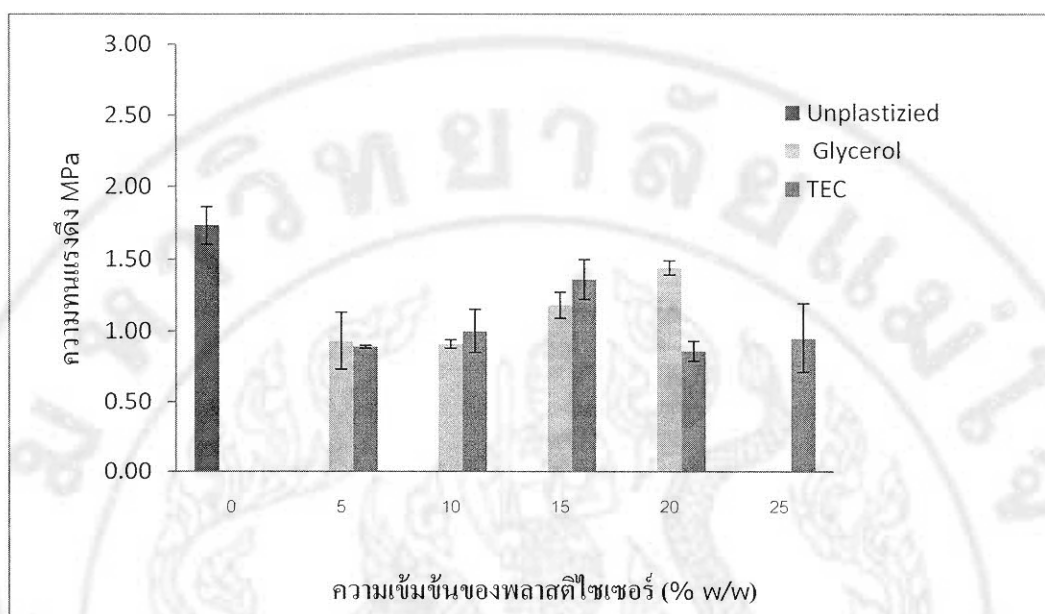
ตาราง 16 ค่าความทนแรงดึง ร้อยละการยืดที่จุดขาด มอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสที่เติม ไตรเอทิลซิเตรต 25 % w/w

แผ่นฟิล์มเซลลูโลส	ความทนแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด	มอดุลัสของยัง (MPa)
1	1.31	1.97	133.15
2	1.02	1.85	109.46
3	0.82	1.54	111.08
เฉลี่ย	1.05	1.78	117.89
SD	0.24	0.22	13.23

จากตาราง 7 – 16 นำค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสกับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร่ ดังภาพที่ 16

จากภาพที่ 16 เป็นการเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสจากฟางข้าว จากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า เมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซอร่ลงในพอลิเมอร์ จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ลดลง และค่าความทนแรงดึงจะแปรผันตามปริมาณของพลาสติกไซเซอร่ที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร่มีค่าความทนแรงดึงที่สูงที่สุดคือ 1.56 MPa ส่วนฟิล์มเซลลูโลสจากฟางข้าวที่เติมพลาสติกไซเซอร่ชนิดกลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 5 - 20 % w/w พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าความทนแรงดึงลดลงและค่าความทนแรงดึงแปรผันตามปริมาณพลาสติกไซเซอร่ที่เพิ่มขึ้นตามทฤษฎี โดยค่าความทนแรงดึงที่สูงที่สุดของแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร่ชนิด กลีเซอรอลคือที่ความเข้มข้น 20 % w/w โดยมีค่าเท่ากับ 1.44 MPa ส่วนการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 25 % w/w เราไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปทดสอบได้ เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ได้มีความเปราะ แตกหักง่าย ส่วนแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร่ชนิดไตรเอทิลซิเตรต พบว่าที่ความเข้มข้น 5 – 15 %w/w แผ่นฟิล์มเซลลูโลสมีค่าความทนแรงดึงลดลงและค่าความทนแรงดึงแปรผันตาม ปริมาณพลาสติกไซเซอร่ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้น 20 % w/w แผ่นฟิล์มเซลลูโลสกลับมีค่าความทนแรงดึงลดลง ดังนั้นค่าความทนแรงดึงที่สูงที่สุดของการใช้ไตรเอทิลซิเตรตเป็นพลาสติกไซเซอร่คือที่ความเข้มข้น 15 % w/w ซึ่งมีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 1.36 MPa อย่างไรก็ตามค่าความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร่ทั้ง 2 ชนิด คือ

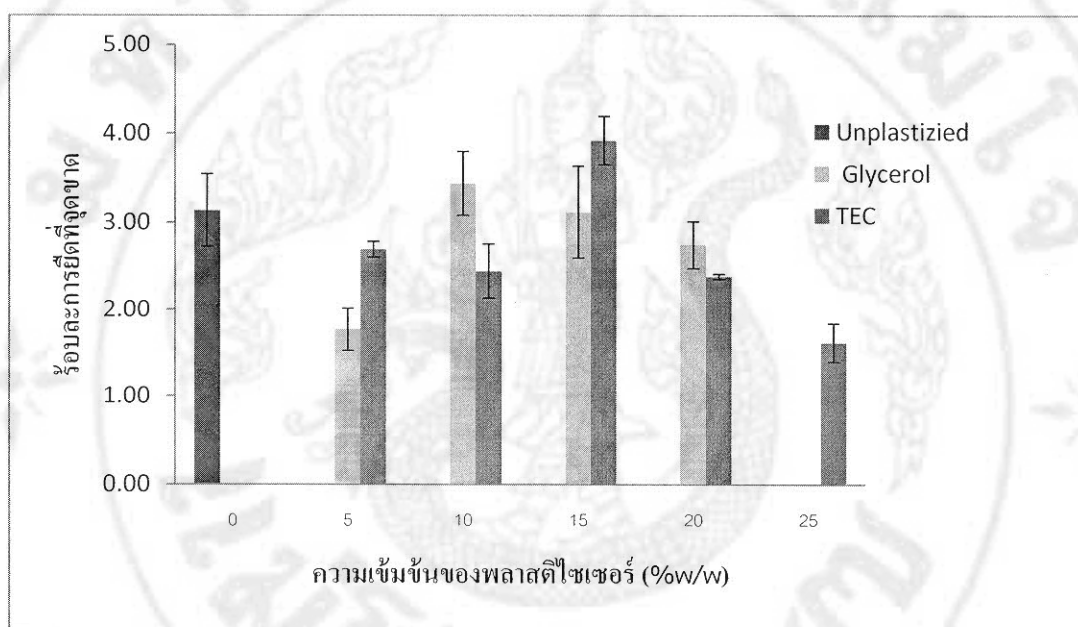
กลีเซอรอลและไตรเอทิลซิเตรตที่ได้ ก็ยังมีค่าความทนแรงดึงที่น้อยกว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร



ภาพที่ 16 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์ก่อน และหลังเติมพลาสติกไซเซอรที่ความเข้มข้นต่างๆ

ภาพที่ 17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลลูโลสจากฟางข้าวกับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร จากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า การเติมพลาสติกไซเซอรจะไปช่วยเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เตรียมได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดร้อยละ 3.13 ส่วนแผ่นฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์ที่เติมพลาสติกไซเซอรชนิดกลีเซอรอล พบว่ามีแนวโน้มค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดต่ำกว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร โดยมีเพียงแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอรชนิดกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 10 % w/w เท่านั้นที่มีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดสูงกว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรอยู่เล็กน้อยคือร้อยละ 3.44 ส่วนแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอรชนิดไตรเอทิลซิเตรตพบว่ามีค่าแนวโน้มร้อยละการยืดที่จุดขาดต่ำกว่าแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรเช่นกัน โดยมีเพียงแต่แผ่นฟิล์มที่เติม พลาสติกไซเซอรชนิดไตรเอทิลซิเตรตที่ความเข้มข้น 15% w/w เท่านั้นที่มีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดสูงกว่าแผ่นฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์เล็กน้อยคือร้อยละ 3.92 ซึ่งสาเหตุที่ฟิล์ม

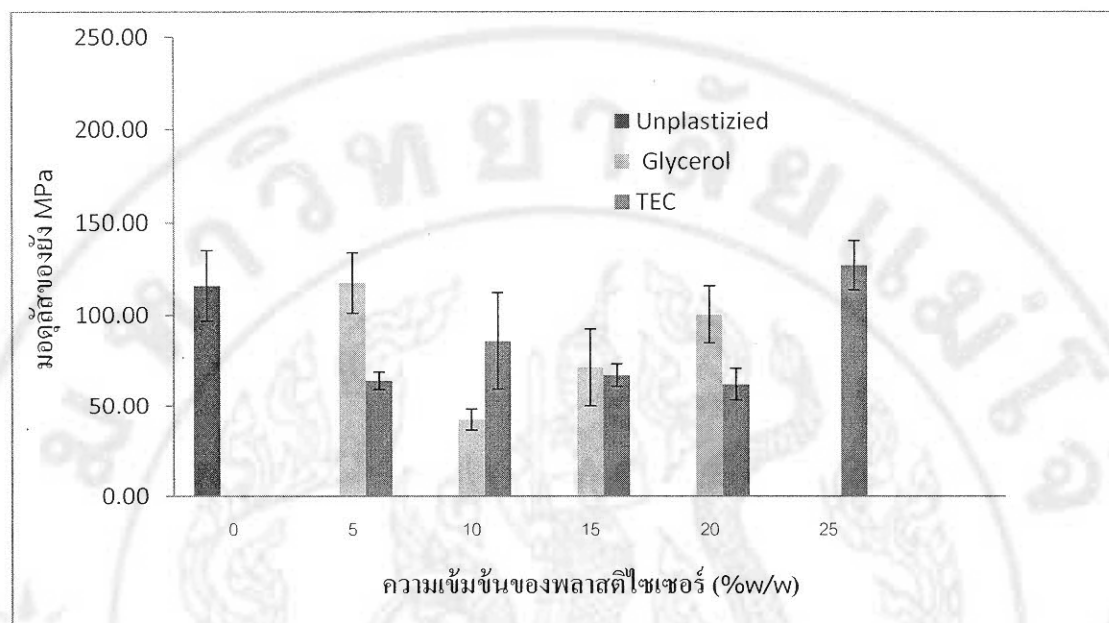
เซลล์โลสจากฟางข้าวที่เดิม พลาสติกไซเซอรมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดไม่เป็นไปตามทฤษฎี อาจเนื่องมาจากพลาสติกไซเซอรเข้าร่วมตัวเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ไม่สมบูรณ์ และค่อยๆ เยิ้ม (Exude) ออกมาที่พื้นผิวผลิตภัณฑ์ที่เล็กกะล่อน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้พลาสติกไซเซอรที่มากเกินไป จากสาเหตุที่พลาสติกไซเซอรเยิ้มออกมา หรือพลาสติกไซเซอรระเหยออกไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแข็ง เปราะ และมีความอ่อนตัวลดลง จึงเป็นสาเหตุที่ฟิล์มเซลล์โลสจากฟางข้าวมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มลดลง



ภาพที่ 17 ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดของฟิล์มเซลล์โลสเอสเทอร์ก่อน และหลังเติมพลาสติกไซเซอรที่ความเข้มข้นต่างๆ

ภาพที่ 18 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของฟิล์มเซลล์โลสจากฟางข้าวที่เดิมและไม่เติมพลาสติกไซเซอรที่ความเข้มข้นต่างๆ จากการทดลองพบว่าฟิล์มเซลล์โลสที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรมีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 115.93 MPa ส่วนแผ่นฟิล์มเซลล์โลสตัดแปรจากฟางข้าวที่เดิมพลาสติกไซเซอรชนิดกลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 5 % w/w มีค่ามอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลพบว่าที่ความเข้มข้น 10 – 20 % w/w ค่ามอดูลัสของยังมีค่าลดลงและแปรผันตามปริมาณพลาสติกไซเซอรที่เพิ่มขึ้น ส่วนแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซ

อัตราชนิดไตรเอทิลซีเตรท พบว่าที่ความเข้มข้น 5- 20 % w/w ค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลง แต่กลับเพิ่มขึ้นที่ 25 % w/w และฟิล์มเซลลูโลสให้ค่ามอดูลัสของยังที่สูงที่สุด คือ 117.89 MPa



ภาพที่ 18 ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์ก่อน และหลังเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล และ ไตรเอทิลซีเตรท โดยประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอร์จะวัดจากผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อค่ามอดูลัส โดยได้ทำการวัดค่ามอดูลัสที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เท่ากัน ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตาราง 17 ผลการเปรียบเทียบพบว่าที่ความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ 5 % w/w กลีเซอรอลมีประสิทธิภาพดีกว่าไตรเอทิลซีเตรท เนื่องจากมีค่ามอดูลัสที่ดีกว่า ส่วนที่ความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ปริมาณ 10 % w/w พบว่าไตรเอทิลซีเตรทมีประสิทธิภาพดีกว่ากลีเซอรอล แต่ที่ 15 – 20 % w/w พบว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของฟิล์มที่สูงกว่าการใช้ไตรเอทิลซีเตรทเป็นพลาสติกไซเซอร์

ตาราง 17 ประสิทธิภาพของพลาสติกไฮเซอรันชนิดกึ่งเซอรอล และไตรเอทิลซีเตรต

ความเข้มข้น (% w/w)	ค่ามอดุลัสของกึ่งเซอรอล (MPa)	ค่ามอดุลัสของไตรเอทิลซีเตรต (MPa)
5	117.49	64.15
10	42.36	85.99
15	71.33	67.11
20	100.40	62.14
25	-	117.89

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวที่สังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟเพื่อให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มพลาสติกทดแทนการใช้ฟิล์มพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเคมี โดยได้ทำการสังเคราะห์เซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน ใช้ลอโรอิลคลอไรด์เป็นสารตัดแปรง มีโทลูอีนและไพรดีนเป็นตัวทำละลายและตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ ใช้พลังงาน 100 วัตต์ ระยะเวลา 15 นาที พิจารณาค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่สภาวะดังกล่าวให้ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของเซลลูโลสที่ผ่านการตัดแปรงเท่ากับร้อยละ 142.84 ซึ่งการที่เซลลูโลสตัดแปรงมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสถูกแทนที่ด้วยสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์ เกิดเป็นเซลลูโลสลอเรต (Cellulose laurate) การแทนที่ของสายโซ่นี้จะส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนลดลง และส่งผลให้น้ำหนักของเซลลูโลสตัดแปรงมีค่าเพิ่มขึ้น

จากนั้นทำการทดสอบสมบัติการละลายของเซลลูโลสตัดแปรงที่เตรียมได้ ในตัวทำละลาย 6 ชนิดคือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน อะซิโตน เมทานอล และ เอทานอล โดยจากการทดลองพบว่าเซลลูโลสก่อนการตัดแปรงด้วยลอโรอิลคลอไรด์ ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดๆได้เลย แต่หลังจากทำการตัดแปรง โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสพบว่า เซลลูโลสหลังตัดแปรงสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เฮกเซน ไดคลอโรมีเทน และคลอโรฟอร์ม ซึ่งตัวทำละลายที่สามารถละลายเซลลูโลสหลังการตัดแปรงได้ดีที่สุดคือคลอโรฟอร์ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มเซลลูโลสตัดแปรง

ทำการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ผลการทดลองพบว่าหลังจากเซลลูโลสถูกตัดแปรงโครงสร้างด้วยลอโรอิลคลอไรด์แล้ว เซลลูโลสตัดแปรงจะแสดงพิกสำคัญที่แตกต่างไปจากพิกเดิมของเซลลูโลสก่อนการตัดแปรง 3 ตำแหน่งด้วยกัน คือ พบพิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1743.02 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของลอโรอิลคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารตัดแปรงที่เข้ามาแทนที่ตรงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบพิกสำคัญที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2922.37 cm^{-1} และ 2863.98 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ C-H stretching ของสายโซ่อะลิฟาติกของลอโรอิลคลอไรด์ในสเปกตรัมของเซลลูโลสภายหลังการตัดแปรง และพบ

พีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3354.25 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสที่มีความสูงของพีกลดต่ำลง

ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสก่อนและหลังดัดแปรจากฟางข้าว ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA) จากผลการทดลองพบว่าเซลลูโลสจากฟางข้าวเริ่มการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ $240\text{--}350^\circ\text{C}$ สำหรับเซลลูโลสหลังดัดแปรพบว่าเริ่มการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ $260 - 360^\circ\text{C}$ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมแกรมของฟางข้าวก่อนและหลังดัดแปรพบว่าเซลลูโลสจากฟางข้าวหลังผ่านการดัดแปรมีสมบัติทางความร้อนที่ลดต่ำลง กล่าวคือมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าเซลลูโลสก่อนดัดแปรประมาณ 10°C คือจากเดิมที่เซลลูโลสเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 270°C ภายหลังการดัดแปรเซลลูโลสหลังดัดแปรเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 260°C

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเซลลูโลสจากฟางข้าวก่อนและหลังดัดแปร โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) จากผลการทดลองพบว่าเซลลูโลสก่อนการดัดแปร ไม่พบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ทั้งนี้เนื่องมาจากเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก ซึ่งการที่เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมากจึงทำให้เซลลูโลสมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่สูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลส ดังนั้นจึงทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆในช่วงอุณหภูมิ $25\text{--}250^\circ\text{C}$ ส่วนเซลลูโลสดัดแปรไม่พบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับเซลลูโลสก่อนดัดแปร คาดว่าเกิดจากเซลลูโลสดัดแปวยังคงมีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสนั่นเอง

จากนั้นนำผงเซลลูโลสดัดแปรไปทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเติมพลาสติกไซเซอรอลลงไปคือ กลีเซอรอล และไตรเอทิลซิเตรตที่ปริมาตร 0 5 10 15 20 และ 25 % w/w แล้วทำการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าฟิล์มที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอรอล มีค่าความทนแรงดึง ค่าร้อยละการยืดที่จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 1.73 MPa ร้อยละ 3.13 และ 115.93 MPa ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้คาดหวังว่าค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอรอล แต่กลับพบว่าฟิล์มเซลลูโลสดัดแปรที่เติมพลาสติกไซเซอรอลทั้งสองชนิดมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดลดต่ำลง โดยมีเพียงการใช้กลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 10 % w/w เท่านั้นที่ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าร้อยละการยืดที่จุดขาดที่สูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอรอลเล็กน้อยร้อยละ 3.44 และไตรเอทิลซิเตรต ที่ความเข้มข้น 15 % w/w เท่านั้นที่ส่งผลให้

ฟิล์มมีค่าร้อยละการยึดที่จุดขาดที่สูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอ์เล็กน้อยร้อยละ 3.92 ซึ่งการที่ฟิล์มเซลลูโลสมีค่าร้อยละการยึดที่จุดขาดลดลงเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซอ์อาจเป็นผลมาจากการใช้พลาสติกไซเซอ์ที่มากเกินไป ทำให้พลาสติกไซเซอ์รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับเซลลูโลสได้อย่างไม่สมบูรณ์ และเกิดการเชื่อมมาที่ผิว ส่วนค่าความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอ์ทั้งสองชนิดพบว่ามีค่าน้อยกว่าฟิล์มเซลลูโลสที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอ์



เอกสารอ้างอิง

- อรอุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- 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.
- Satgé, C., Granet, R., Verneuil, B., Branland, P. and Krausz, P. 2004. Synthesis and Properties of Biodegradable Plastic Films Obtained by Microwave-Assisted Cellulose Acylation in Homogeneous Phase. **Cr. Chim.** 7: 135-142.
- 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.
- Yang, L., and Paulson, A.T. 2000. Mechanical and Water Vapors Barrier Properties of Edible Gellan Films. **Food. Res. Int.** 33: 563-570.
- Liu, J., and Williams, 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 Plasticizers 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 Contents 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.

