



รายงานวิจัย

การผลิตกรีนคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส

Production of green composite from cassava starch blended with
cellulose nanofibrils

คณะผู้วิจัย

ชนิษฐา เจริญลาภ

กาญจนา ชินสำราญ

ปทุมทิพย์ ปราบพาล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณเงินแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานวิจัย

การผลิตกรีนคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส

Production of green composite from cassava starch blended with
cellulose nanofibrils

คณะผู้วิจัย

ชนิษฐา เจริญลาภ

กาญจนา ชินสำราญ

ปทุมทิพย์ ปราบพาล



โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณเงินแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการผลิตกรีนคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส สำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก เงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ปี 2560 ขอขอบคุณ นางสาว ธัญญลักษณ์ ศรีสุข นายวชิรวิทย์ สำเภารอด นายพิษณุ เรืองศิริ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ ผู้ช่วยวิจัย





บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตกรีนคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลสจากไยมะพร้าว และศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของคอมพอสิตที่ได้ ทดลองโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ สมบัติต่างๆของกรีนคอมพอสิตแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยอัลจิเนต และเส้นไยมะพร้าว ในปริมาณต่างๆ ผลการทดลองพบว่าไยมะพร้าวทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยเส้นไยมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยสารต่างชนิดกัน ทำให้แผ่นคอมพอสิตมีความต้านทานแรงดึงต่างกัน กรีนคอมพอสิตที่ใช้เส้นไยมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกให้ค่าแรงดึง ความต้านทานแรงดึงดี และมอดุลัสสูงที่สุด



Abstract

This research aims to produce green composite from cassava starch with nano cellulose from coconut fiber. Study on the mechanical properties and chemical properties of this composites. Experiment by studying the appropriate process for producing nano cellulose from coconut fiber, study the effect of nano cellulose content on mechanical properties and chemical properties of composite between cassava starch and nano cellulose. The results showed that the coconut fiber increased the composite strength. Including the process of fiber modification with different substances made the composite sheet strength is different. The highest maximum load, stress at maximum load and Young's modulus were obtained by the composite by both alginate and modification of coconut fiber with citric acid.





สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ	ค
Abstract	จ
สารบัญ	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	3
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	35
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก ก	57
ภาคผนวก ข	68
ภาคผนวก ค	69

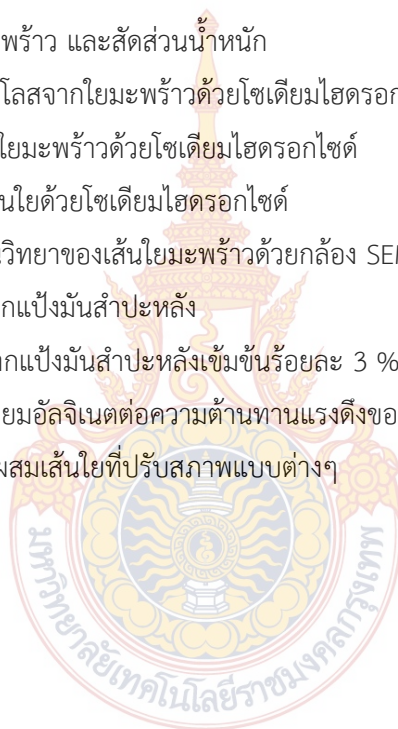


สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.2.1	สมบัติที่แตกต่างกันของแอมโมไลสและแอมโมไลเพกทิน	8
ตารางที่ 2.2.2	ปริมาณของแอมโมไลสในแป้งชนิดต่างๆ	10
ตารางที่ 2.2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแอมโมไลส และสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมโมไลส กับ ไอโอดีน	11
ตารางที่ 2.6.1	องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น และมุมไมโครไฟบริลลา	20
ตารางที่ 2.7.1	สถิติการผลิต	26
ตารางที่ 4.1.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวก่อนการปรับปรุงเส้นใย	34
ตารางที่ 4.1.1	ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยสารเคมีต่างกัน	37
ตารางที่ 4.1.4	ปริมาณลิกนินในเส้นใยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยสารเคมีต่างกัน	37
ตารางที่ 4.2.1	การทดสอบผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มแป้ง	38
ตารางที่ 4.2.2	การทดสอบผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้ง	39
ตารางที่ 4.2.3	การทดสอบผลของปริมาณโซเดียมอัลจิเนตต่อความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้ง	41
ตารางที่ 4.3.1	การทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ ปรับสภาพด้วยสารต่างชนิด	42
ตารางที่ 4.3.2	การทดสอบค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียม จากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วย สารต่างชนิด	42
ตารางที่ 4.3.3	การทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน	44
ตารางที่ 4.3.4	การทดสอบค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นคอมพอสิตที่ เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน	44
ตารางที่ 4.3.5	การทดสอบค่ามอดุลัส ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ ปรับสภาพด้วย กรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน	45
ตารางที่ 4.3.6	การทดสอบร้อยละของการบวมในน้ำ ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจาก ผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน	46
ตารางที่ 4.3.7	การทดสอบร้อยละของการบวมในเอทานอล ของแผ่นคอมพอสิตที่ เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน	46
ตารางที่ 4.3.8	การทดสอบร้อยละของการบวมในโทลูอีน ของแผ่นคอมพอสิตที่ เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน	46

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1.1	การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์ และลักษณะของสาร เสริมแรง	5
รูปที่ 2.2.1	โครงสร้างและส่วนประกอบของแป้ง	8
รูปที่ 2.2.2	โครงสร้างของแอมิโลส	10
รูปที่ 2.2.3	โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน	12
รูปที่ 2.2.4	การพองตัวของเม็ดแป้ง	13
รูปที่ 2.6.1	เส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติจากส่วนต่าง ๆ ของพืช	20
รูปที่ 2.6.2	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	22
รูปที่ 2.6.3	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	24
รูปที่ 2.6.4	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	25
รูปที่ 2.7.1	โครงสร้างของผลมะพร้าว และสัดส่วนน้ำหนัก	27
รูปที่ 4.1.1	การสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	33
รูปที่ 4.1.2	เส้นใยเซลลูโลสจากใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	33
รูปที่ 4.1.3	การปรับสภาพผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	35
รูปที่ 4.1.4	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM	36
รูปที่ 4.2.1	ลักษณะแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง	38
รูปที่ 4.2.2	ลักษณะแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 3 %	39
รูปที่ 4.2.3	ผลของปริมาณโซเดียมอัลจิเนตต่อความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้ง	40
รูปที่ 4.3.1	ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ผสมเส้นใยที่ปรับสภาพแบบต่างๆ	42



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันพลาสติกถูกนำมาใช้ประโยชน์แทนวัสดุชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นด้านการขึ้นรูป เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานแรงดึง มีความหนาแน่นต่ำ และราคาถูก (Glenn & Orts, 2001) ทำให้มีการนำพลาสติกไปใช้ในหลากหลายวัตถุประสงค์ เช่นนำไปใช้ในเป็นวัสดุบรรจุ ใช้ในงานก่อสร้าง ใช้ในการเกษตร และใช้เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น จากสมบัติของพลาสติกที่ผลิตจากวัสดุปิโตรเคมี ที่ส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Kaisangsri, Kerdchoechuen, & Laohakunjit, 2012) ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาวัสดุผสมชนิดใหม่ที่ผลิตมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ (renewable material) ราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และที่สำคัญคือ ต้องสามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ (biodegradable) ซึ่งวัสดุผสมที่มีสมบัติดังกล่าว เรียกว่ากรีนคอมโพสิต (green composites) (Jiang & Hinrichsen, 1999; Luo & Netravali, 1999a, 1999b; Takagi & Asano, 2008; Takagi & Ichihara, 2004) ดังนั้นการทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วยพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้จึงเป็นการช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้นี้ได้มาจากวัตถุดิบทางธรรมชาติที่สามารถสร้างทดแทนได้เช่น แป้ง เซลลูโลส ไคติน ไคโตซาน ลิกนิน โปรตีน พอลิแลคติกแอซิด (polylactide, PLA) พอลิคาโพรแลกโตน (polycaprolactone, PCL) เป็นต้น โดยเฉพาะแป้งเป็นวัตถุดิบที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสม เช่น การเกิดเจล การทำให้ข้นเหนียว (thickening) การยึดเหนี่ยวและยึดติด (bonding and adhesion) (Pavlat & Robertson, 1999; Tanada-Palmu & Grosso, 2003) ซึ่งทำให้เหมาะกับการเป็นวัตถุดิบในการเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพ (Soares, Lima, Oliveira, Pires, & Soldi, 2005) หากแต่ข้อจำกัดที่สำคัญของวัสดุที่ทำจากพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ คือมีความต้านทานแรงดึงต่ำ ดูดซับความชื้นได้ดี และยากต่อการผลิตขึ้นรูป ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทมากในการเพิ่มคุณภาพให้แก่พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ เช่นโดยการสร้างวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (nanocomposite) ที่ย่อยสลายได้ วิธีที่นิยมที่สุดในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร คือการนำอนุภาคนาโนเมตรใส่เข้าไปผสมกับพอลิเมอร์ หรือการผลิตพอลิเมอร์นั้นๆ ในระดับนาโนเมตร ซึ่งทั้งสองวิธีนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ เช่น การเพิ่มความต้านทานแรงดึง เป็นต้น (Zhang et al., 2007)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตกรีนคอมโพสิตด้วยแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลสจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทยเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้แก่พืชนั้นๆ โดยในงานวิจัยนี้ เส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เป็นเศษเหลือทางการเกษตร และมีจำนวนมากในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการนำเส้นใยมะพร้าวมาผลิตนาโนเซลลูโลส
- (2) ศึกษาปริมาณนาโนเซลลูโลสต่อสมบัติทางกล และสมบัติการคงรูปของคอมพอสิตระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส
- (3) เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรเส้นใยต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของ คอมพอสิตระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- (1) วิเคราะห์และศึกษาสมบัติของนาโนเซลลูโลสของเส้นใยมะพร้าว ดังนี้
ความชื้น (Susan & Bailey, 2005) ความหนาแน่น (TAPPI Test Methods, 1988)(Tappi, 1980)
ปริมาณเซลลูโลส ไฮโดรเซลลูโลส และลิกนิน (Moubasher et al., 1982)
- (2) ปรับปรุงสมบัติของนาโนเซลลูโลสด้วย กรดซิทริก กรดสเทียริก มาเลอิกแอนไฮไดรด์
- (3) วิเคราะห์และศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส ดังนี้ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดึงขาด การทดสอบการบวมน้ำ การทดสอบการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์ ทดสอบสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากวัสดุธรรมชาติ และวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร
- (2) แนวทางการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร อื่นๆ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

จากปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมได้กลายเป็นแรงขับเคลื่อนให้นักวิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาวัสดุผสมชนิดใหม่ที่เกิดมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ ราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและที่สำคัญคือต้องสามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ ซึ่งวัสดุผสมที่มีสมบัติดังกล่าวเรียกว่ากรีนคอมพอสิต (green composites) ซึ่งเป็นวัสดุผสมที่เกิดจากการรวมกันของเส้นใยธรรมชาติกับเรซินธรรมชาติ โดยเส้นใยธรรมชาติที่ใช้อาจจะเป็นเส้นใยธรรมชาติจากพืชหรือสัตว์ก็ได้ แต่ในงานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะใช้เส้นใยพืช เช่น กัญชง (hemp) ลินิน (flax) ปอ (jute) เป็นต้น มากกว่าเส้นใยจากสัตว์ เนื่องจากเส้นใยพืชมีปริมาณมากกว่า และหาได้ง่ายกว่า สำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นเมทริกซ์พอลิเมอร์ในกรีนคอมพอสิต จะต้องเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และผลิตจากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นใหม่ได้ ซึ่งวัสดุในกลุ่มนี้เป็นทางเลือกใหม่ของการพัฒนาที่ยั่งยืนทั้งในทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม เพราะช่วยในเรื่องของการอนุรักษ์วัตถุดิบที่มาจากฟอสซิล สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในธรรมชาติ ช่วยลดปริมาณขยะ และช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาสู่บรรยากาศในช่วงของขั้นตอนการผลิต

2.1 วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมพอสิต (composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป แล้วทำให้สมบัติของวัสดุโดยรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมี สมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว (Hull & Clyne, 1996) องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก และเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรง และทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติ ให้เมทริกซ์ และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ (Vilay, Mariatti, Mat Taib, & Todo, 2008)

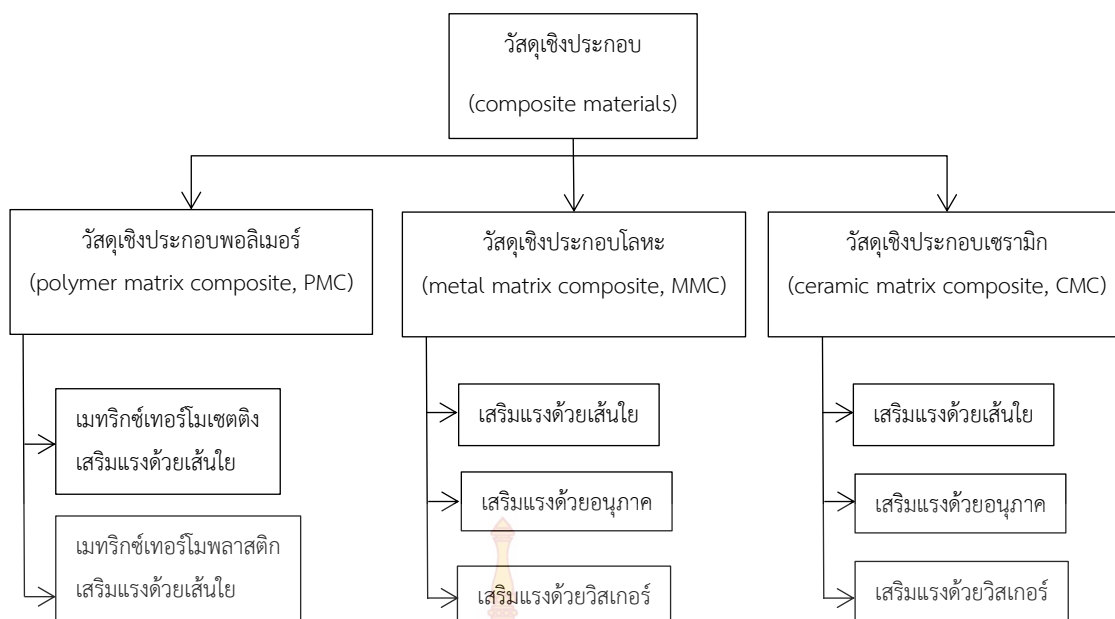
วัสดุเชิงประกอบในธรรมชาติ (natural composite) ที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ ไม้ (wood) ที่ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) ผสมเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ในเมทริกซ์ลิกนิน สำหรับตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นในยุคก่อนประวัติศาสตร์ เช่น อิฐ โบราณที่เตรียมขึ้นจากการผสมฟางข้าวกับดินเหนียว เส้นฟางข้าวจะช่วยให้ดินเหนียวมีความต้านทานแรงดึงมากจนสามารถใช้ก่อซ้อนกันขึ้นเป็นผนังเพื่อสร้างเป็นที่กำบังภัยได้ ต่อมาเมื่อมนุษย์เริ่มพัฒนารูปแบบของการดำรงชีพเป็นการเลี้ยงสัตว์และเพาะปลูก วัสดุจากธรรมชาติ ก็แตกต่างกัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากไม้ หนังสัตว์ เอ็น และกระดูก

สัตว์ ถูกนำมาอัดซ้อนประกอประกบกันด้วยกาธรรมชาติ เพื่อให้ได้เป็นวัสดุที่มี สมบัติเฉพาะในการใช้งาน โดยจะ นำพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ ที่เป็นสารจำพวกโปรตีน เซลลูโลส คอลลาเจน และเคอราติน มาประกอประกบ กันให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอประกบ ที่มี สมบัติ แข็งแรงและทนทานต่อการใช้งาน เช่นการทำคันธนู และรถเทียม ม้าจากชั้นไม้ที่ถูกอัดเชื่อมด้วยกาธรรมชาติ ที่ได้จากการเคี้ยวหนังปลา เขาสัตว์ และกระดูก (Beukers, 2001) นอกจากนี้ยังพบการใช้ซีเมนต์ (cement) เป็นวัสดุประสานในการก่อสร้างพีระมิดในอียิปต์ วิหารทรง กลม และโรงละครสมัยโรมัน (Hannant, 2000)

วัสดุเชิงประกอประกบในยุคปัจจุบันเริ่มต้นราวกลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 เป็นยุคที่ความรู้ความก้าวหน้า ทางวิ ทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการพัฒนา ในระยะต้นของศตวรรษพอลิเมอร์ สังเคราะห์ชนิดแรกได้ถูกผลิตและจำหน่ายเชิงการค้า คือ เรซินฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ (phenol formaldehyde resin) หรือ เรซินฟีนอลิก (phenolic resin) ต่อมาได้มีการเตรียมพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิด อื่น ๆ ได้แก่ เรซินยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ พอลิเอสเตอ์ชนิดไม่อิ่มตัว และอีพอกซี และมีการพัฒนากระบวนการ ผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก ๆ จากแก้วหลอมเหลว ที่เรียกว่าเส้นใยแก้ว (glass fiber) ออกสู่ ตลาดเพื่อใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน การนำวัสดุทั้งสองประเภทดังกล่าวมาประกอประกบกันเป็นจุดเริ่มต้น ของนวัตกรรมการผลิตวัสดุเชิงประกอประกบพอลิเมอร์ในยุคปัจจุบัน (Chawla, 2001) วัสดุเชิงประกอประกบเป็นวัสดุ ที่สำคัญที่มีการใช้ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่นกว่าวัสดุอื่น คือ มีน้ำหนัก เบา สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่นใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องบิน อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005)

2.1.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอประกบ

วัสดุเชิงประกอประกบประกอประกบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เมทริกซ์ และสารเสริมแรง ดังนั้นถ้าจำแนก วัสดุเชิงประกอประกบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิง ประกอประกบพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอประกบโลหะ (metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอประกบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถ จำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) และวิสเกอร์ (whisker) ดังรูปที่ 2.1.1



รูปที่ 2.1.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์ และลักษณะของสาร เสริมแรง

สารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบจำแนกตามลักษณะเป็นอนุภาค เส้นใย และวิสเกอร์ อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด หรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกลักษณะเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใย (Chawla, 2001) ซึ่งอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (short fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 (Badder, 2000) เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์ อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น ส่วนวิสเกอร์เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตร และมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (elongated single crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความต้านทานแรงดึงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Chawla, 2001)

เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ ทำให้วัสดุมีการใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น เส้นใยธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ราคาถูก ปัญหาในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยใยธรรมชาติ คือการจับตัวกันระหว่างเส้นใยและพลาสติกเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความเป็นขรุขระจึงเกิดการจับตัวกันเองทำให้

กระจายตัวได้ไม่ดีในพลาสติก และมีความสามารถในการดูดความชื้นสูงมาก มีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ผลิตได้มีคุณสมบัติทางกลต่ำลง (Oksman, Skrifvars, & Selin, 2003)

การปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ เพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นิยมใช้สารเคมีซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ สารละลายต่าง (alkali) และไซเลน (silane) เป็นต้น (Mohanty et al., 2005)

2.1.2 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

โดยธรรมชาติ พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มี โครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความต้านทานแรงดึงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความต้านทานแรงดึงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความต้านทานแรงดึงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ

สมบัติเชิงกลนี้จะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกัน ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความต้านทานแรงดึงได้ไม่ดีเท่ากับรูปเส้นใยเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (filler) วัสดุเชิงประกอบจะมีความต้านทานแรงดึงมากขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความต้านทานแรงดึงจำเพาะ (specific strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้สำหรับงานโครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักได้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ แบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มี โครงสร้างแบบร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล หรือการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูป และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้น หรือแบบกิ่งสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน เหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติ เหนียว และทนทานต่อสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมเชิงความร้อนนี้มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ สำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแห และหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ในขณะที่การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เมทริกซ์เป็นเทอร์โมพลาสติกนั้น จะใช้หลักการให้ความ

ร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว และขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก การที่จะเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

2.2 แป้ง (starch)

แป้ง (starch) คือพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่พบในพืช เช่น เมล็ดธัญพืช พืชหัว และถั่ว เมล็ดแห้ง มีน้ำตาลกลูโคส (glucose) เป็นมอนอเมอร์ ของน้ำตาลกลูโคส ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งแอลฟา 1,4 ได้เป็นโครงสร้างแบบแอมิโลส (amylose) ส่วนที่ตำแหน่งแอลฟา 1,4 และ แอลฟา 1,6 ได้เป็นแอมิโลเพกทิน (amylopectin)

กระบวนการผลิตแป้งมีหลายวิธีขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ เช่น เส้นใย โปรตีน เกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์โดยการล้างน้ำ บั่นแยกและอบแห้ง ในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งแขวนลอยในน้ำ เนื่องจากแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น

สมบัติของแป้งแยกได้ สองประเภท คือ

- starch ผลิตได้จากพืชผลการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันสำปะหลัง มันฝรั่ง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องใช้แบบเปียก (wet grinding) ซึ่งทำให้แยก starch ออกมาได้
- flour ผลิตได้จากโม้แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ ทำให้สมบัติต่างจาก starch

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือแป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ แอมิโลส ซึ่งมีขนาดเล็ก และมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และแอมิโลเพกทินซึ่งมีขนาดใหญ่และ มีกิ่ง ก้าน สาขา มาก แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน มีคุณสมบัติที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2.1

ตารางที่ 2.2.1 สมบัติที่ต่างกันของแอโมโลส และแอโมโลเพกทิน

แอโมโลส	แอโมโลเพกทิน
ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4 และมีโซ่กิ่งที่ α -1,6
ประกอบด้วยกลูโคส 200 - 6000 หน่วย	ประกอบด้วยกลูโคส 20 - 25 หน่วย
ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้มากกว่า
เมื่อต้มในน้ำมีความข้นหนืดน้อยกว่า	เมื่อต้มในน้ำมีความข้นหนืดมาก
ให้น้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	ให้สีม่วงหรือน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

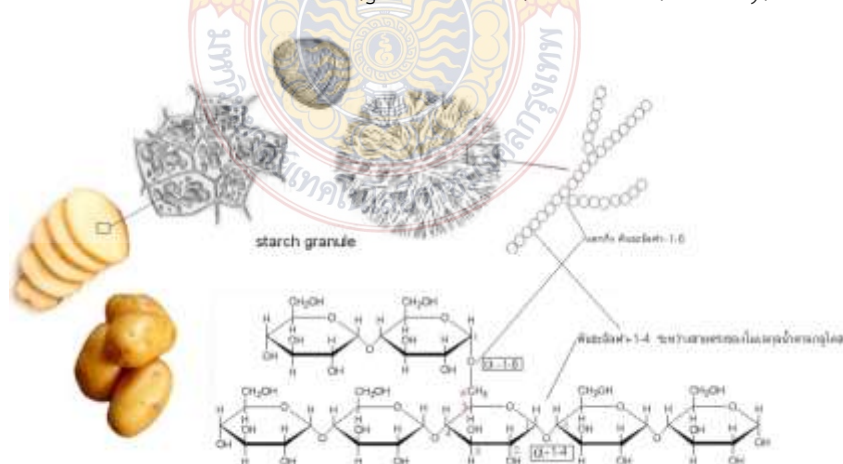
ที่มา : (Stevenson & Kennedy, 1987)

2.2.1 เม็ดแป้ง

องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง

โดยทั่วไปเม็ดแป้ง (starch granule) ประกอบด้วยโมเลกุลของแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมี โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส สารอนินทรีย์อื่นๆ และน้ำในปริมาณที่ต่างกันขึ้นกับ ชนิดของพืช

เม็ดแป้ง (starch granule) ของพืชแต่ละชนิดจะมี แอโมโลสและแอโมโลเพกทินอัดแน่นอยู่ โดยมีสัดส่วนของแอโมโลสและแอโมโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้มีสมบัติด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกัน เช่น การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ความหนืด (viscosity)



รูปที่ 2.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของแป้ง

ที่มา : (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ & นิธิยา รัตนพานนท์, 2015)

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะ ของเม็ดแป้ง ชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron

Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิด ของแป้งนั้นๆ

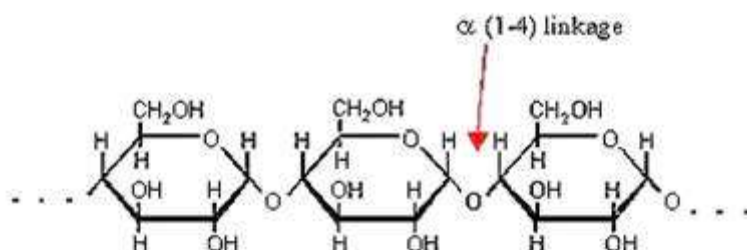
เม็ดแป้งมันฝรั่งและแป้งพุทธรักษามีลักษณะเป็นรูปไข่ขนาดใหญ่ ถือได้ว่ามีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งอื่นๆ เม็ดแป้งสาลี บาร์เลย์และข้าวไรน์มี 2 แบบคือ แบบ A มีรูปร่างแบบ lenticular ขนาด 10-30 ไมครอน และแบบ B รูปร่างกลม มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน เม็ดแป้งแบบ B มีจำนวนมากกว่าคือประมาณ 95% ของจำนวนเม็ดแป้งทั้งหมด แต่ถ้าเทียบเป็นน้ำหนักแล้วจะคิดเป็น เพียง 20-30% เท่านั้น ส่วนเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดปานกลาง (20 ไมครอน) ขนาดใกล้เคียง กับเม็ดแป้งข้าวโพด ขนาด รูปร่าง

เม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์หรือ scanning electron microscopy เม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น growth ring ได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็น growth ring ได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบ growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่าน ปฏิกริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ growth ring แสดงถึงลักษณะ การเจริญของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ ประกอบด้วยส่วน reducing end ของโมเลกุลแป้ง มีด้าน non-reducing end ของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินแผ่กระจายออกไป โดยจุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของแอมิโลเพกทินอยู่ในส่วนออสันฐานและสายอยู่ในส่วนผลึก

ถ้าส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ (polarized microscope) จะมองเห็นวงแหวนและไฮลัม เป็นเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน (birefringence หรือ polarization cross) โดยจุดตัดของ กากบาทจะเป็นตำแหน่งของไฮลัมและบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาว ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะ ที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

2.2.2 แอไมโลส (amylose)

แอไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 -glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2.2 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของแอไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (Hizukuri, Kaneko, & Takeda, 1983)



รูปที่ 2.2.2 โครงสร้างของแอมิโลส

โดยทั่วไปแบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณแอมิโลสสูง ประมาณ 22 - 30 % ส่วนแบ่งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकुจะมีปริมาณ แอมิโลสต่ำกว่า คืออยู่ในช่วง 18 - 24% น้ำหนักโมเลกุลแอมิโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยแอมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของแอมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ แอมิโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของแอมิโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของแอมิโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง (Hizukuri et al., 1983) ปริมาณและสมบัติของแอมิโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2.2 และ 2.2.3

ตารางที่ 2.2.2 ปริมาณของแอมิโลสในแป้งชนิดต่างๆ

แป้ง	ปริมาณแอมิโลส (น.น. แท้ง %)	ปริมาณแอมิโลส (น.น. แท้ง %)
	Apparent	Absolute
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25.0	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36.0	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8
พุทธรักษา	43.2	22.7
ถั่วเขียว	37.9	30.7

ที่มา: (Kasemsuwan et al., 1999)

แอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, surfactant, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำ โดยแอมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ แอมิโลส ที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง (ตารางที่ 2.2.3) ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณแอมิโลสในแป้ง

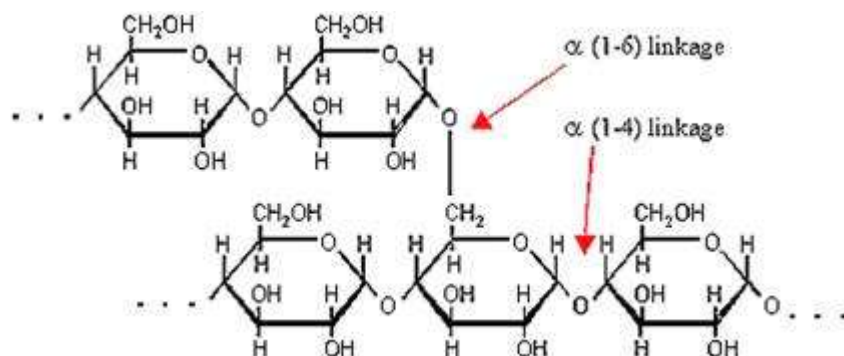
ตารางที่ 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแอมิโลส และสีของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลส กับ ไอโอดีน

Chain length (glucose unit)	Number of helix turns	color
12	2	None
12-15>	2	Brown
20-30	3-5	Red
35-40	6-7	Purple
>45	9	Blue

การตรวจสอบปริมาณแอมิโลสโดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและวัดสีที่เกิดขึ้น เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น การรบกวน ผลการวัดจากแอมิโลเพกทินโดยเฉพาะแอมิโลเพกทินที่มีความยาวสายโซ่กึ่งมากๆ ซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกัน ทำให้วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับแอมิโลสอยู่เดิมจะทำให้แอมิโลสโมเลกุลนั้นจับกับไอโอดีนไม่ได้ ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณีนี้ต้องทำการสกัดไขมันออกก่อน การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส อาจใช้วิธีการวัดเอนทรอลปีในการหลอมเหลวของ starch-lipid complex แต่ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ จะขึ้นกับความสามารถในการละลายของแอมิโลสในตัวอย่างแบ่งแต่ละชนิด วิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่า คือการใช้ gel permeation chromatography (GPC) (Salomonsson & Sundberg, 1994) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีจำนวนมาก นอกจากนี้ก็มีการใช้ high pressure size exclusion chromatography (Bradbury & Bello, 1993) ซึ่งจะเร็วกว่าการใช้ GPC อีกวิธีการคือการใช้ concanavalin A มาตกตะกอนแอมิโลเพกทิน ออกไป และวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสที่เหลืออยู่

2.2.3 แอมิโลเพกทิน (amylopectin)

แอมิโลเพกทินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ α -1, 4- glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2.3



รูปที่ 2.2.3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในแอมิโลเพกทินทั้งหมด แอมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของแอมิโลส คือประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำ เนื่องจากแอมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง แอมิโลเพกทินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีแอมิโลเพกทินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

2.2.4 แหล่งของแป้ง

แป้งเป็น Homopolysaccharide ประกอบด้วย Glucose unit โดยแป้งจะถูกสกัดจากพืชในรูปของ Granule (เม็ดแป้ง) เม็ดแป้งจะสะสมอยู่ใน

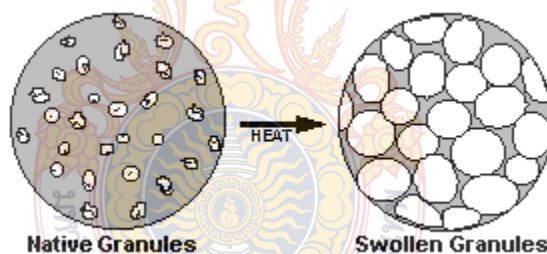
- เมล็ดธัญพืช (cereal grain) เช่น ข้าว (rice) ข้าวสาลี (wheat) ข้าวโพด (corn)
- หัว (tuber crop) เช่น มันฝรั่ง (potato) มันเทศ (sweet potato) มันสำปะหลัง (tapioca)
- ลำต้น (pith) เช่น Sago palm
- ผล (fruit) เช่น กัลวี่ ทูเรียน
- ถั่วเมล็ดแห้ง (legume) เช่น ถั่วเขียว (mung bean)

ปัจจุบันพอลิเมอร์จากแป้งจัดเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญมากในธุรกิจพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากแป้งสามารถทดแทนอนุพันธ์ของปิโตรเลียมได้เนื่องจากราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง หาได้ง่าย ย่อยสลายง่าย สามารถพองตัวขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ จึงมีการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนพลาสติก โดยเฉพาะด้านบรรจุภัณฑ์ พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน อาจมีแป้งเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่าร้อยละ 90 แต่พลาสติกที่ส่อยสลายได้ต้องมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป โดยปริมาณแป้งที่มากขึ้นทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพดีขึ้น และมีสารตกค้าง (recalcitrant residues) ปริมาณน้อยลง พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานส่วนใหญ่ถูกผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมรรถนะสูง (high-performance polymers) เช่น พอลิเอสเทอร์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีลักษณะเฉพาะ เหมาะสมต่อการใช้งานด้านต่างๆ

2.3 สมบัติเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งดัดแปร และแป้งไม่ดัดแปร

2.3.1 การพองตัวและการละลาย (swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัว และทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วน amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วน crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำ ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.2.4) โมเลกุลในส่วน crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้น และโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.2.4 การพองตัวของเม็ดแป้ง

ที่มา: www.opta-food.com/access/starch2.html

2.3.2 การเจลลาติไนซ์ (gelatinization)

การเจลลาติไนซ์ (gelatinization) คือปรากฏการณ์ของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง (starch granule) เนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชในเม็ดแป้ง สายพอลิเมอร์ของแอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกทิน (amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ เม็ดแป้งพองตัว และความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

อุณหภูมิที่สตาร์ชเริ่มเกิดการเจลลาติไนซ์ เรียกว่า gelatinization temperature หรือ pasting temperature อยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ช่วงนี้เม็ดแป้งยังคง

มีสภาพอยู่ได้โดยไม่แตกออก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นและมีความหนืดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกิดลักษณะของน้ำแป้งข้น (starch paste) ความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงสุด และให้ความหนืดสูงสุด (maximum viscosity) จากนั้นเม็ดแป้งจะแตกถึงจุดสูงสุด ซึ่งไม่สามารถคืนสภาพได้ หรือมีการกวนอย่างรุนแรงจนเม็ดแป้งแตกออก

อุณหภูมิในการเจลาติไนซ์ของแป้งกล้วยต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกัน เช่น แป้งกล้วยสายพันธุ์ Valety มีอุณหภูมิการเจลาติไนซ์ประมาณ 67-70 °C (Kayisu, Hood, & Vansoest, 1981) หรือ 69.5°C (Waliszewski, Aparicio, Bello, & Monroy, 2003) แป้งกล้วยสายพันธุ์ Cavendish มีอุณหภูมิการเจลาติไนซ์ 70.1-74.6 °C (Ling, Osman, Fernandes, & Reilly, 1982) แป้งกล้วยสายพันธุ์ Macho และ Criollo มีอุณหภูมิการเจลาติไนซ์ 74.6 °C และ 77 °C (Bello-Pérez, Agama-Acevedo, Sáyago-Ayerdi, Moreno-Damian, & Figueroa, 2000) ตามลำดับ

2.3.3 การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

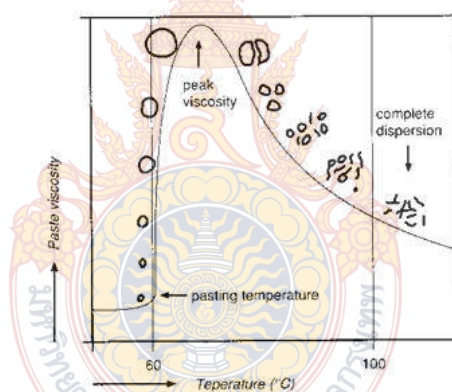
การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของแอมิโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก ห้ว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก/ห้ว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลแอมิโลสจะมาจัดเรียงตัวกันใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลแอมิโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็นเมทริกซ์ ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีแอมิโลเพกทินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลเพกทินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของแอมิโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลแอมิโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100 - 200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น

แป้งมันฝรั่งมีแอมิโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000 - 6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

2.3.4 ความหนืด (viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.2.5) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุด เนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้นความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง



รูปที่ 2.2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน

ที่มา: www.ftns.wau.nl/agridata/starchpackfoam.htm

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของแอมิโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า setback และปรากฏการณ์นี้คือการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทิน อุณหภูมิ shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ชนิดของแป้ง

2.4 फिल्म หรือสารเคลือบ (film/coating)

ฟิล์ม หมายถึง วัสดุแผ่นบางมีความหนาน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร ถ้ามีความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 250 ไมโครเมตร เรียกว่า ชีต (sheet) ฟิล์มที่บริโภคได้ (edible film) คือ ฟิล์มที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร ใช้เพื่อเคลือบหรือห่อหุ้มอาหารโดยตรง หรือเคลือบบรรจุภัณฑ์ชั้นใน (primary packaging) เช่น กระดาษ ฟิล์มพลาสติก ที่สัมผัสกับอาหาร วัตถุประสงค์ของการใช้ฟิล์มห่อหุ้มอาหาร เพื่อรักษาคุณภาพ และยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร เนื่องจากฟิล์มจะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงในด้าน กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของความชื้น และออกซิเจน (Arvanitoyannis, 1999; Tharanathan, 2003) ฟิล์มผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด ได้แก่

(1) ฟิล์มจากคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง (starch) ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งดัดแปร (modified starch) เพกทิน (pectin)

(2) ฟิล์มจากโปรตีน ซึ่งการเกิดฟิล์มเป็นสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน (functional properties of protein) ได้แก่ คอลลาเจน ฟิล์มจากน้ำมัน ฟองเต้าหู้ การศึกษาฟิล์มบริโภคได้จากโปรตีนยังมีน้อยมากเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิแซคคาไรด์ เนื่องจากฟิล์มที่ทำจากโปรตีนบางชนิดมีสมบัติในการขวางกั้นสารต่างๆ ได้ไม่ดีเท่ากับฟิล์มที่ทำจากพอลิแซคคาไรด์

(3) ฟิล์มจากไขมัน การใช้ไขมันห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การเคลือบช็อกโกแลต ผัก ผลไม้ สารประกอบไขมันหลายชนิดรวมทั้ง อะเซทิลเลต โมโนกลีเซอไรด์ (acetylate monoglyceride) ไขมันธรรมชาติ (natural xax) และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) สามารถนำมาเป็นสารเคลือบได้ เนื่องจากเป็นสารมีขั้วต่ำ มีสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความชื้น รวมทั้งมีการนำไขมันผสมพอลิแซคคาไรด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

(4) ฟิล์มจากพืชรสผลไม้ ฟิล์มบริโภคได้จากพืชรสของแอปเปิล สามารถป้องกันการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนได้ดี แต่ป้องกันการซึมผ่านไอน้ำยังไม่ดีนัก (T.H. McHugh & E. Senesi, 2000) จึงมีการปรับปรุงสมบัติฟิล์มโดยเพิ่มไขมันเข้าไปในการผลิตฟิล์ม เพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

2.4.1 การผลิตฟิล์มแป้ง

(1) การเตรียมสารละลายแป้ง

การเตรียมสารละลายแป้งต้องเตรียมให้มีปริมาณของแข็งที่เหมาะสม กล่าวคือมีปริมาณของแข็งในช่วง 10 - 15% เพื่อให้ฟิล์มขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง และเกิดความเสถียรในการขึ้นรูป การใช้สารละลายที่มีปริมาณของแข็งต่ำเกินไป (น้อยกว่า 4%) ทำให้พอลิเมอร์ของแป้งมีการละลายอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ยากต่อการเกิดเจลทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามถ้าสารละลายแป้งมีปริมาณของแข็งสูง มากกว่า 30% ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ เนื่องจากสารละลายมีความหนืดมากเกินไป

ปริมาณแอมโมเลียสในแป้งก็มีผลต่อสมบัติด้านการละลายของแป้งด้วยเช่นกัน การละลายแป้งที่มีปริมาณแอมโมเลียสสูง (มากกว่า 50%) ในน้ำ ต้องใช้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงมากกว่า 120 °C ที่ความดันเหนือบรรยากาศ ทำได้โดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำความดันสูง (Bader & Göritz, 1994) พบว่าอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในการเตรียมเม็ดแป้งปริมาณแอมโมเลียสสูง (55%) ให้เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ จนกลายเป็นสารเนื้อเดียวกัน (homogeneous solution) คือที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส ซึ่งสภาวะดังกล่าวทำให้สารละลายแป้งที่ได้มีความใส อย่างไรก็ตามสภาวะดังกล่าวอาจนำไปสู่การสลายตัวและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้งในน้ำ ซึ่งแนวทางป้องกันทำได้โดยให้ความร้อนกับสารละลายอย่างรวดเร็ว เช่น 2.5 °C ต่อนาที และรักษาสภาวะการละลายภายใต้การป้องกันบรรยากาศไนโตรเจน (Han, 2005)

การละลายแป้งที่มีแอมโมเลียสสูงในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำได้โดยเติมอะไมเลสลงไป ซึ่งเอนไซม์จะช่วยแยกแอมโมเลียสออกจากแป้ง โดยปกติแอมโมเลียสจะละลายได้ในน้ำร้อน เช่นในน้ำที่มีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ โดยสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าว ได้แก่สาร aliphatic alcohol ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล) สาร glycol ethers (diethyl cellulose) สารอินทรีย์ (pyridine) (Han, 2005)

(2) การขึ้นรูปฟิล์ม

โดยปกติสารละลายแป้งจะไม่เสถียร โดยเฉพาะในแป้งที่มีความเข้มข้นของปริมาณของแข็งสูงหรือมีปริมาณแอมโมเลียสสูง จะมีแนวโน้มการเกิดเจลอย่างรวดเร็วเมื่อเย็นตัวลง ทำให้การขึ้นรูปเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการเก็บรักษาสารละลายแป้ง ควรเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจล ก่อนที่จะขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม สำหรับสารละลายแอมโมเลียส อุณหภูมิในการเกิดเจลจะเป็นฟังก์ชันแบบเส้นตรงกับความเข้มข้นของแอมโมเลียส เมื่อสารละลายแอมโมเลียสมีปริมาณของแข็งร้อยละ 10-15 จะมีปริมาณการเกิดเจลเท่ากับ 60-74 องศาเซลเซียส ดังนั้นการป้องกันการเกิดเจลจึงควรเก็บสารละลายแอมโมเลียสที่อุณหภูมิ 80 °C ก่อนขึ้นรูปฟิล์ม (Han, 2005)

วิธีการขึ้นรูปฟิล์ม

(1) เทสารละลายลงบนวัสดุต่างๆ (solvent casting)

เป็นการผลิตฟิล์มโดยการนำสารผสมของฟิล์มเกลี่ยเป็นแผ่นบางลงบนแผ่นกระจก หรือพลาสติก แล้วนำไปทำให้แห้งด้วยลมร้อน เมื่อลอกออกได้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะโปร่งแสงละลายน้ำได้

(2) วิธีเอกซ์ทรูชัน (extrusion)

ใช้เครื่องมือทำให้ฟิล์มขึ้นรูปเป็นแผ่นบาง องค์ประกอบในการเตรียมฟิล์มคือ แป้งที่มีปริมาณแอมโมเลียสร้อยละ 50-80 พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 0-30 น้ำร้อยละ 20-50 ฟิล์มที่ได้จะมีความชื้นร้อยละ 7-15 ความหนา 1-4 mm

(3) วิธีการทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (drum drier)

ผ่านแผ่นฟิล์มเข้าไปยังลูกกลิ้งร้อน เพื่อรีดให้ฟิล์มเรียบและแห้ง ความหนาของฟิล์มที่ต้องการขึ้นกับแรงกดอัดของลูกกลิ้งบนแผ่นฟิล์ม และระยะระหว่างลูกกลิ้งสองลูกที่ผ่านฟิล์มเข้าไป

การทำแห้ง

การผลิตฟิล์มแข็งโดยทั่วไป จะขึ้นรูปสารละลายแข็งบนพื้นผิวที่เรียบแล้วนำมาทำแห้งจนสามารถลอกฟิล์มออกจากพื้นผิวได้ ในบางครั้งอาจมีการเติม release agent เช่น เลซิทีน เพื่อให้สามารถลอกฟิล์มได้ง่ายขึ้น

การทำแห้งเป็นสิ่งสำคัญมากต่อลักษณะปรากฏและประสิทธิภาพของฟิล์ม ไม่นิยมใช้การทำแห้งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากทำให้เกิดการแตกของแผ่นฟิล์ม หรือทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะผิดปกติ เกิดตำหนิ หรือเกิดเม็ดแข็งบนแผ่นฟิล์มได้ นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการทำแห้งที่นานเกินไปเพราะทำให้ฟิล์มเกิดการแตกหักได้ สำหรับความหนาของแผ่นฟิล์มควบคุมจากปริมาณของแข็งและปริมาณของสารละลายที่นำมาขึ้นรูป เช่นฟิล์มแอมโมโลสที่มีช่วงความหนา 11-170 ไมโครเมตร เตรียมจากสารละลายแข็งที่มีความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 7-15 แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยการเทให้มีความสูงตั้งแต่ 380-1270 ไมครอนบนพื้นผิวที่แห้ง (Han, 2005)

2.4.2 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ หมายถึง สารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติก หรือ elastomer แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนต่อการใช้งาน และการยืดตัว แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ external plasticizer เป็นสารที่เติลงไปในโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อน หรือการจับกลุ่มของโมเลกุล โดยพลาสติไซเซอร์จะไปยึดจับกับพอลิเมอร์ ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว (Mellan, Ibert., 1961) ส่วนพลาสติไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้เกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) โดยสมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์ม (compatible) โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก และละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ควรไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติไซเซอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำฟิล์มให้แห้ง ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถคงความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน พลาสติไซเซอร์ที่นำมาใช้ในฟิล์มบริโภคต้องได้รับอนุญาตจาก U.S. Food and Drug Administration โดยมีการพิสูจน์ และยอมรับว่าเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคทั้งในระยะเฉียบพลันและระยะยาว

พลาสติไซเซอร์เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง (strength) และความสามารถในการโค้งงอ (flexibility) สำหรับการเคลือบ แต่ส่งผลให้สารเคลือบผิวมีสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และแก๊สเพิ่มขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ พอลิโออล (polyol) หรือพอลิไฮดริค แอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) ซึ่งมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดี จึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับ

ความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ พอลิออลที่นำมาใช้เป็นพลาสติกไฮดรอกซีในฟิล์มบริโคมมีหลายชนิดได้แก่ กลีเซอรอล (glycerol) ซอร์บิทอล (sorbitol) แมนนิทอล (mannitol) โพรไพลีนไกลคอล (propylene glycol) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) เป็นต้น (Müller, Yamashita, & Laurindo, 2008) ศึกษาผลของการใช้พลาสติกไฮดรอกซี 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล และซอร์บิทอล ต่อสมบัติของฟิล์มที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่าฟิล์มมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของพลาสติกไฮดรอกซีสูงขึ้น และฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล เป็นพลาสติกไฮดรอกซีมีสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำดีกว่าฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอล

2.5 นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง หรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุ ในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้าน ฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ในปัจจุบันความสามารถควบคุม และสร้างวัสดุระดับนาโนเมตร ได้เปิดโอกาสในการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (nanocomposite) ของพอลิเมอร์ คือการผสมวัสดุที่มีอย่างน้อย 1 มิติที่มีขนาดระดับนาโนเมตร (<100 nm) กับพอลิเมอร์ วัสดุขนาดนาโนเมตรนี้ได้แก่ นาโนฟิวเลอร์ อนุภาคนาโน เป็นต้น วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงทนทาน ความทนทานต่ออุณหภูมิ ต่อไฟ มากกว่า พอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม นอกจากนี้วัสดุขนาดนาโนเมตรเพียงแค่ 1-5% ที่ผสมเข้าไปในพอลิเมอร์ก็สามารถเพิ่มคุณภาพของพอลิเมอร์ได้อย่างมาก เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวที่มหาศาลของวัสดุขนาดนาโนเมตร และหากวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรนี้มีส่วนผสมของพอลิเมอร์จากธรรมชาติก็จะเรียกว่าไบโอโนนาโนคอมโพสิต (bionanocomposite)

2.6 เส้นใยธรรมชาติ

พืชเส้นใย (fiber crops) หมายถึงพืชที่ใช้ประโยชน์จากเส้นใย

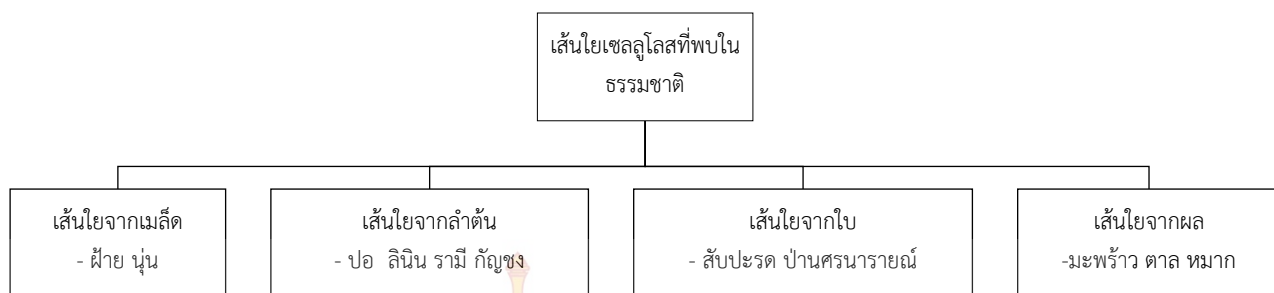
เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใดๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 สามารถขึ้นรูปเป็นผืนผ้าได้ และเป็นองค์ประกอบที่สามารถแยกย่อยในเชิงกลได้อีก

สมบัติของพืชเส้นใย ที่สามารถนำมาใช้งานสิ่งทอได้คือ สามารถปั่นได้ (can be spun) มีความต้านทานแรงดึง และทน (strength and durability) มีความสามารถในการดูดซับดี (absorbency)

เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ โดยเฉพาะทางด้านสิ่งแวดล้อม และต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยที่ได้มาจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยจากพืช สัตว์ และสาหร่ายหรือเห็ดรา โดยเส้นใยพืชที่ได้มาจากส่วนลำต้น เช่น เส้นใยกล้วย ปอ ลินิน เป็นต้น ส่วนเส้นใยที่ได้มาจากใบ

เช่น เส้นใยป่านศรนารายณ์ กล้วย เส้นใยจากผล เช่น เส้นใยมะพร้าว เส้นใยจากเมล็ด เช่น เส้นใยฝ้าย หนุ่น เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ ไหมพรมที่จากมาจากขนแกะ เป็นต้น

ในธรรมชาติจะพบเส้นใยเซลลูโลสจากส่วนต่าง ๆ ของพืชแตกต่างกันได้หลากหลาย บางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด บางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากลำต้น เส้นใยจากใบ หรือจากผล ดังแสดงในรูปที่ 2.6.1



รูปที่ 2.6.1 เส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติจากส่วนต่าง ๆ ของพืช

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose) มีองค์ประกอบของธาตุหลักคือ คาร์บอนร้อยละ 44.4 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.2 และออกซิเจนร้อยละ 49.4

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ มีความหลากหลายขึ้นกับชนิดของเส้นใย โดยเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยพอลิเมอร์หลัก 4 ชนิด คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เพกทิน (pectin) และลิกนิน (lignin) สัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลถึงสมบัติของเส้นใย องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.6.1

ตารางที่ 2.6.1 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น และมุมไมโครไฟบริลลา (microfibrillar angle)

Fiber	Cellulose (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)	Moisture content (wt%)	Waxes (wt%)	Microfibrillar (wt%)
Flax	71	18.6-20.6	2.2	2.3	8-12	1.7	5-10
Hemp	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	6.2-12	0.8	2-6.2
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	12.5-13.7	0.5	8
Kenaf	45-57	21.5	8-13	3-5			
Ramie	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9	7.5-17	0.3	7.5
Nettle	86				11-17		
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	10-22	2	10-22
Henequen	77.6	4-8	13.1				
Palf	70-82		5-12.7		11.8		14

Fiber	Cellulose (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)	Moisture content (wt%)	Waxes (wt%)	Microfibrillar (wt%)
Banana	63-64	10	5		10-12		
Abaca	56-63		12-13	1	5-10		
Oil palm EFB	65		19				42
Oil palm mesocarp	60		11				46
Cotton	85-90	5.7		0-1	7.85-8.5	0.6	
Coir	32-43	0.15-0.25	40-45	3-4	8		30-49
Cereal straw	38-45	15-31	12-20	8			

ที่มา: (Mohanty et al., 2005)

ผนังเซลล์ของพืชส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงภายในผนังเซลล์โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear polymer) ส่วนเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) เมื่อกำจัดลิกนินออกไป องค์ประกอบที่ยังคงเหลืออยู่กับเซลลูโลสคือเฮมิเซลลูโลส ซึ่งสมบัติทั่วไปของเฮมิเซลลูโลสคือมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส และเนื่องจากมันเป็นพอลิเมอร์ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) ดังนั้นจึงส่งผลต่อสมบัติการสลายตัวตามธรรมชาติการดูดความชื้นและการสลายตัวด้วยความร้อน องค์ประกอบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือลิกนินทำหน้าที่เป็นสารยึดติดภายในผนังเซลล์มีความเสถียรทางความร้อนสูงแต่มีผลกระทบกับการย่อยสลายโดยรังสีอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) ส่วนองค์ประกอบสุดท้ายคือเพกทินเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharides) เป็นเมทริกซ์ภายในผนังเซลล์ (Bhattacharya, Germinario, & Winter, 2008)

(1) เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีจำนวนมากที่สุดในโลก เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของเซลล์พืชทุกชนิด มนุษย์ได้นำเซลลูโลสมาใช้ในชีวิตประจำวันตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น อาหาร เสื้อผ้า กระดาษเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ยา เครื่องสำอาง และงานอุตสาหกรรม

เซลลูโลส คือองค์ประกอบส่วนใหญ่ของผนังเซลล์ มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กเรียกว่า ไมโครไฟเบอร์ (microfiber) เกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชัน ของหน่วยพื้นฐานคือกลูโคส สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ จะซ้ำกันใน 2 ลักษณะ เรียกว่า cellobiose unit ซึ่งส่วนปลายของทั้งสองข้างคือ reducing end group เป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ง่าย และ non-reducing end group เป็นส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา

เซลล์ูโลสมีความเหนียว น้ำหนักโมเลกุลสูง มีความเป็นผลึกสูง เป็นส่วนประกอบหลักของไม้ที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง และความสม่ำเสมอของเส้นใย และปริมาณของเซลล์ูโลสในเส้นใยจะส่งผลต่อสมบัติความคุ้มค่าคุ้มทุนในการผลิตเส้นใย โดยเส้นใยที่มีปริมาณเซลล์ูโลสมากจะเหมาะกับการนำไปใช้งานสิ่งทอและกระดาษ

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย กล่าวคือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำ ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่ยาว ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ในโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชัน หรือจากการถูกทำลายโดยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลขาดลงเป็นส่วนเล็กๆ คล้ายน้ำตาล และกลายเป็นอาหารของพืชและสัตว์ต่อไป

สมบัติทางกายภาพของเซลล์โลส

- การละลาย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรดเข้มข้น เช่นกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เซลลูโลสบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่นสารละลายนัลคาไลไฮดรอกไซด์ บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้
- ความหนืด ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น
- การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับหรือการคายไอน้ำหรือของเหลวอื่นๆในบรรยากาศรอบตัวของมันจนถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพประการ
- ความหนาแน่น เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยว จะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มา หรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

เซลล์โลสเป็นเส้นใยเล็กๆ ที่รวมกันอยู่โดยจัดเรียงเป็นเส้นๆ ขนานกันอยู่ล้อมรอบด้วยลิกนิน และเฮมิเซลล์โลส คุณสมบัติของเซลล์โลสคือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี ความหนาแน่นต่ำ ย่อยสลายได้ (Bhattacharya et al., 2008; Luz, Gonçalves, & Del'Arco, 2007; Mandal & Chakrabarty, 2011; Suryanegara,

Nakagaito, & Yano, n.d.) ไมโครไฟบิลสามารถเตรียมได้จากการแยกเส้นใยเซลลูโลสภายใต้แรงเฉือนสูงๆ ร่วมกับแรงกระแทกซึ่งเป็นกระบวนการผลิตนาโนเซลลูโลสโดยวิธีทางกล ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือในการผลิต เช่น การใช้เครื่องรีไฟเนอร์ และวิธีทางเคมีเพื่อลดขนาดของเส้นใยร่วมกับเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ทำให้เกิดแรงเฉือนภายใต้ความดันเซลลูโลสจึงมีขนาดเล็กลง (Bhattacharya et al., 2008; Luz et al., 2007; Suryanegara et al., n.d.; Turbak, Snyder, & Sandberg, 1983)

การใช้เส้นใยระดับไมโครเมตรจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับเมทริกซ์จึงทำให้มี ประสิทธิภาพในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์มากขึ้น และการใช้นาโนเซลลูโลสเป็นส่วน เสริมแรงสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการส่องผ่านของแสงให้แก่คอมพอสิต มากกว่าการใช้เส้นใยขนาดใหญ่ มีงานวิจัยการใช้นาโนเซลลูโลสเป็นส่วนเสริมแรงในพลาสติก PLA พบว่าคอมพอสิตมีความอดุลีและค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น (Iwatake, Nogi, & Yano, 2008; Nakagaito & Yano, 2005)

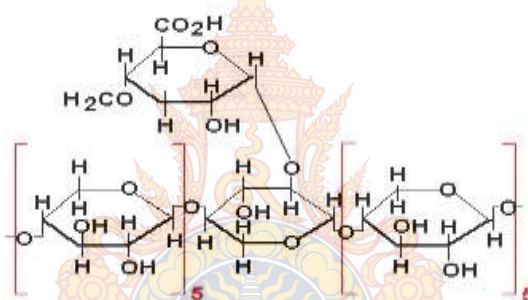
การศึกษาการปรับสภาพเส้นใยบวบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) คือ NaOH 4%/H₂O₂10% พบว่าเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากมัดเส้นใยเป็นเส้นใยขนาดเล็กและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะทำให้มีเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงขึ้น (Mandal & Chakrabarty, 2011) ผลิตนาโนเซลลูโลสจากชานอ้อย การใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 4% ร่วมกับการโฮโมจีไนเซชันเพื่อใช้ในการ กำจัดลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ไขมัน และทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงด้วยการโฮโมจีไนเซชัน (Bhattacharya et al., 2008; Mandal & Chakrabarty, 2011)

ปัจจุบันการศึกษาการใช้ประโยชน์ จากเซลลูโลสซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่สามารถสร้างทดแทน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการผลิตและการใช้ประโยชน์จากนาโนเซลลูโลส ซึ่งปัจจุบันนาโนเซลลูโลสสามารถผลิตได้จากหลายวิธี ได้แก่ acid hydrolysis ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตฟลิกนาโนเซลลูโลส (cellulose nanowhiskers) นอกจาก acid hydrolysis แล้ว ฟลิกนาโนเซลลูโลส ยังสามารถเตรียมได้จากวิธีอื่นได้แก่ การ shearing หรือ การใช้ high-pressure homogenizing, การใช้เอนไซม์ย่อย วิธีการสังเคราะห์ และ electrospinning เป็นต้น ปัจจุบันนาโนเซลลูโลสสามารถผลิตได้จากพืช สัตว์ และแบคทีเรีย ลักษณะและขนาดของฟลิกนาโนเซลลูโลสนั้นจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาเตรียม โดยทั่วไปฟลิกนาโนเซลลูโลสที่เตรียมจากต้นไม้จะมีความยาวประมาณ 100-300 nm และความกว้างประมาณ 3-10 nm (Elazzouzi-Hafraoui et al., 2008) ค่า modulus ของฟลิกนาโนเซลลูโลสประมาณ 138-167 GPa(Nishino et al., 1995) เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นของนาโนเซลลูโลสที่มีความต้านทานแรงดึงประมาณ 25% ของคาร์บอนนาโนทิวป์ (carbon nanotube) และข้อได้เปรียบทางด้านราคาซึ่งมีราคาถูก จึงทำให้ฟลิกนาโนเซลลูโลสเป็นที่สนใจที่จะนำไปผสมกับโพลิเมอร์ ชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์เช่น poly (S-co-BuA), PVC, polypropylene, waterborne epoxy และ poly (oxyethylene) หรือ พอลิเมอร์ธรรมชาติเช่น แป้ง silk fibroin และ cellulose acetate butyrate (CAB) เพื่อสร้างเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (nanocomposite)

เพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึง หรือสร้างคุณสมบัติพิเศษให้แก่พอลิเมอร์นั้นๆ (Samir, Zikry, & Gaber, 2005) และหากเปรียบเทียบกับฟิวเลอร์ (filler) ที่เป็นสารอนินทรีย์ นาโนเซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติมีข้อได้เปรียบดังนี้ เช่น สามารถสร้างทดแทนได้ มีจำนวนมาก เป็นวัตถุดิบที่ไม่ใช่อาหาร ใช้พลังงานต่ำในการผลิต ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ ความต้านทานแรงดึงสูง และสามารถดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสได้ เป็นต้น นอกจากนี้นาโนเซลลูโลสยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆอีก เช่น ด้านการแพทย์ ด้านวัสดุบรรจุภัณฑ์ และด้านเครื่องสำอางค์ เป็นต้น

(2) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

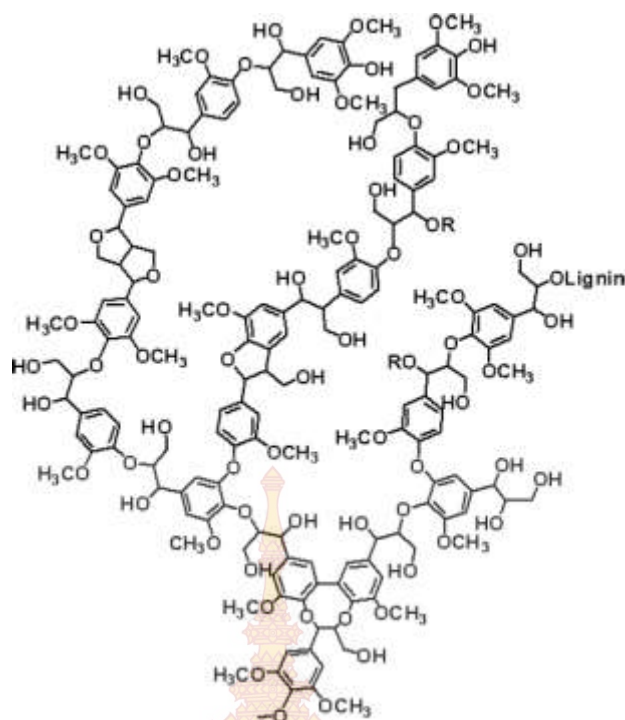
สารกึ่งเซลลูโลส หรือเฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งจะแทรกตัวอยู่ระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน ประกอบด้วย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ได้แก่ เฮกโซส (hexoses, จำนวน C = 6) : กลูโคส (glucose), แมนโนส (mannose), กาแลกโทส (galactose) และ เพนโทส (pentose, จำนวน C = 5) : ไซโลส (xylose), อะราไบโนส (arabinose) รวมทั้งกรดกลูโคนิก (glucuronic acid) และกาแลกทูโรนิก (galacturonic) ในทางเชิงกล เฮมิเซลลูโลสช่วยให้เส้นใยมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 2.6.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

(3) ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนกว่าเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดเป็นสารแอโรมาติก ไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติยืดหยุ่น เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ที่มีมารองจากเซลลูโลส ลิกนินทำหน้าที่เป็นเหมือนกาวที่เชื่อมระหว่างเส้นใยกับผนังเซลล์ ช่วยให้เส้นใยมีสมบัติต้านทานต่อแรงกด และป้องกันไม่ให้เส้นใยได้รับผลกระทบจากปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี ปริมาณของลิกนินในเส้นใยจะส่งผลต่อโครงสร้าง สมบัติ ความยืดหยุ่น และอัตราการย่อยสลายของเส้นใย



รูปที่ 2.6.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (ICFAR, 2010)

ในเนื้อไม้แต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ ไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งมาก และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุนานจะมีปริมาณลิกนินมากกว่า

(4) สารแทรก (extractive)

สารแทรก คือ สารที่ไม่ใช่องค์ประกอบของโครงสร้างของผนังเซลล์ มีตั้งแต่ สารไอโซพรีน สารเทอร์พีน สารประกอบเฮตเทอโรไซคลิก กรด เรซิน สารพอลิฟีนอลต่าง ๆ และอัลคาลอยด์ เป็นต้น เป็นสารประกอบที่แสดงถึงสมบัติของพันธุ์ไม้แต่ละชนิด สารประกอบเหล่านี้จะทำให้พืชแต่ละชนิดมีสี กลิ่น รส และความแข็งที่แตกต่างกัน มีประมาณร้อยละ 5 - 30 โดยมวล รวมไปถึง สารส่วนน้อย (minor constituent) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดได้แก่ สารประกอบแคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสเฟส และซิลิกา เป็นต้น สารส่วนน้อยมีประมาณร้อยละ 0.1 - 3 โดยมวล การใช้ประโยชน์ของสารแทรกขึ้นกับสมบัติทางเคมีของสารนั้น เช่น สารแทรกพวกเทอร์พีนนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย น้ำหอม ยา สบู่ กาว และใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ สารพวกพอลิฟีนอลใช้ในการฟอกหนัง สักเคราะห์กาว ส่วนพวกอัลคาลอยด์ ส่วนใหญ่มีประโยชน์ทางเภสัชกรรม

ในระดับโครงสร้างของเส้นใย พบว่าที่ผิวของเส้นใยจะมีสารเคลือบ เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพกทิน ห่อหุ้มอยู่ภายนอก ซึ่งมีไว้ปกป้องเซลลูโลสด้านใน เมื่อเส้นใยผ่านกระบวนการสกัดเส้นใย สารเคลือบส่วนใหญ่จะถูกทำลายไป ทำให้ผิวของเส้นใยมีความหยาบ จึงมีกระบวนการทางเคมี ชีวภาพ และทาง

กล เพื่อปรับปรุงสมบัติของเส้นใย แม้ว่าเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด แต่เนื่องจากทุกชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกัน ทำให้สมบัติของเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติมีความคล้ายคลึงกัน และสะท้อนไปยังสมบัติของผลิตภัณฑ์

สมบัติของเส้นใย เช่น ความหนาแน่น ความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานแรงดึง การดูดซับความชื้น และผลึกในเส้นใย ต่างเป็นผลเนื่องจากโครงสร้างภายใน และส่วนประกอบของเส้นใย เส้นใยที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสในปริมาณสูง และมีส่วนประกอบอื่นในปริมาณต่ำ จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี สำหรับเส้นใยที่มีปริมาณลิกนินสูง และมีอัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างต่ำ จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่มีความยืดหยุ่นสูง

2.7 มะพร้าว (Coconut)

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera* Linn.

แหล่งผลิต

ภาคเหนือ: ตาก เพชรบูรณ์ นครสวรรค์ พิจิตร

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ: นครราชสีมา ศรีสะเกษ บุรีรัมย์

ภาคตะวันออก: ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ฉะเชิงเทรา

ภาคตะวันตก: ราชบุรี สมุทรสงคราม เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์

ภาคใต้: ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ปัตตานี นราธิวาส

จังหวัดที่ปลูกมากได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช

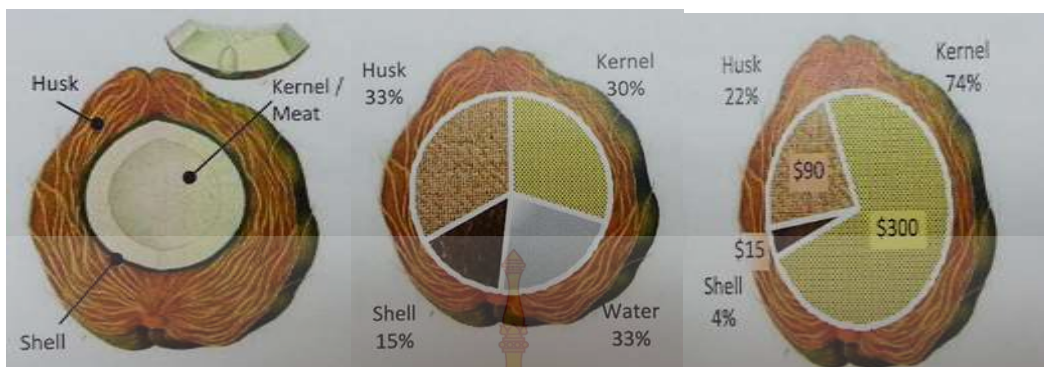
มะพร้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจพืชหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยใช้น้ำมะพร้าว ในการบริโภคเป็นอาหารทั้งคาวและหวานในชีวิตประจำวัน ซึ่งจากสำนักงานสถิติแห่งชาติสำรวจพบว่า ประชากรไทย 1 คน จะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559)

ตารางที่ 2.7.1 สถิติการผลิต

	2554	2555	2556	2557
จำนวนผู้ปลูก (ครัวเรือน)	286,829	280,344	273,085	268,984
พื้นที่ให้ผล (ล้านไร่)	1.349	1.332	1.303	1.29
ผลผลิตเฉลี่ย (กก./ไร่)	782	793	775	773
ผลผลิตรวม (ล้านตัน)	1.055	1.056	1.01	1.0

ที่มา: (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559)

จากตารางจะเห็นว่าประเทศไทยมีผลผลิตของมะพร้าวจำนวนมาก ผลมะพร้าวนอกจากจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการบริโภคโดยตรงแล้ว ส่วนที่เป็นเปลือกสามารถนำไปแปรรูปเพื่อประโยชน์ใช้สอยอย่างอื่น โดยส่วนของเปลือกแยกได้สองส่วน ประกอบด้วยเส้นใยมะพร้าว และขุยมะพร้าว งานวิจัย (Smith et al., 2009) พบว่าโดยเฉลี่ยน้ำหนักเนื้อมะพร้าวจะมีปริมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักผล โดยมีโครงสร้างของผลมะพร้าว และสัดส่วนน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.7.1



รูปที่ 2.7.1 โครงสร้างของผลมะพร้าว และสัดส่วนน้ำหนัก

ที่มา: (Smith et al., 2009)





บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- (1) แป้งมันสำปะหลัง
- (2) เส้นใยมะพร้าว
- (3) กลีเซอรอล (glycerol)
- (4) ไกลคอล (glycol)
- (5) โซเดียมอัลจีเนต (sodium alginate)
- (6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)
- (7) กรดสเตียริก (stearic acid)
- (8) เอทานอล (ethanol)
- (9) อะซิโตน (acetone)
- (10) กรดซิตริก (citric Acid)
- (11) กรดไฮโดรคลอริก (HCL)
- (12) มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic Anhydride Grafted Polypropylene , MAAP)
- (13) โทลูอีน (Toluene)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- (2) เครื่องกวนแม่เหล็ก รุ่น IKA C-MAGvHS 7
- (3) เครื่อง Homogenizer รุ่น OV5
- (4) ตู้อบความร้อน
- (5) เครื่อง Ultrasonic (Bandelin Sonorex Digitec)
- (6) เครื่องกรองสุญญากาศ
- (7) ตู้ดูดควัน
- (8) เครื่องวัดความต้านทานแรงดึงและความยืดหยุ่น
- (9) เครื่องวัดค่าความส่องสว่าง

3.3 วิธีการวิจัย

3.3.1 การเตรียมนาโนเซลลูโลสจากใยมะพร้าว

(1) การสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากใยมะพร้าว

นำเส้นใยมะพร้าวปั่นให้เป็นผง ด้วยเครื่องปั่น และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 (w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองผงเส้นใยมะพร้าว และล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชประมาณ 7 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้จากใยมะพร้าวตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI Standards Method ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่วิเคราะห์ คือ เซลลูโลส และลิกนิน

(2) การไฮโดรไลซิสผงใยมะพร้าว

นำผงเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 (w/v) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วนำไปแช่ในเครื่องอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองเส้นใยมะพร้าว และล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชประมาณ 7

(3) การปรับสภาพผิวเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำผงเส้นใยมะพร้าวมาปรับสภาพผิวโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 (w/v) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองผงเส้นใยมะพร้าว แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชประมาณ 7 เติมน้ำกลั่นลงไปบนเส้นใยมะพร้าวแล้วไปปั่นด้วยเครื่องโฮมจีเนเซชัน 7 นาที กรองเส้นใยมะพร้าวแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 8 ชั่วโมง นำมาร่อนผ่านตะแกรง ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM

(4) การปรับสภาพผิวเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายกรดสเทียริก

นำผงเส้นใยมะพร้าวมาปรับสภาพผิวโดยการแช่ในสารละลายกรดสเทียริก (เข้มข้น 10 กรัม/250 มิลลิลิตรเอทิลแอลกอฮอล์) แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนใบพัด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 45 นาที นำมากรองและล้างด้วยอะซิโตนปริมาณ 1 ลิตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง แล้วนำมา ร่อนผ่านตะแกรง ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM

(5) การปรับสภาพผิวเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายกรดซิตริก

นำผงเส้นใยมะพร้าวมาปรับสภาพผิวโดยการแช่ในสารละลายกรดซิตริก (เข้มข้น 10 กรัม/250 มิลลิลิตรเอทิลแอลกอฮอล์) แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนใบพัด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 45 นาที นำมากรองและล้างด้วยอะซิโตนปริมาณ 1 ลิตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง แล้วนำมา ร่อนผ่านตะแกรง ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM

(6) การปรับสภาพผิวเส้นใยมะพร้าวด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

นำผงเส้นใยมะพร้าวมาปรับสภาพผิวโดยการแช่ในสารละลายมาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้มข้นร้อยละ 8 (w/w) ของน้ำหนักเส้นใยมะพร้าว แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนใบพัด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 45 นาที นำมากรองและล้างด้วยอะซิโตนปริมาณ 1 ลิตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรง ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM

3.3.2 การเตรียมกรีนคอมพอลิตจากแป้งมันสำปะหลังกับนาโนเซลลูโลส

(1) สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง ที่ความเข้มข้น 2% , 3% , 4% (w/v) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังลงในน้ำกลั่น นำไปกวนด้วย Magnetic Stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจนเกิดเจลาตินไนซ์ เซชัน หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซชัน 15 นาที เทสารละลายลงในภาชนะช้อน ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

(2) ปริมาณและชนิดของพลาสติกไซเซอร์ในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 3% (w/v) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังลงในน้ำกลั่น นำไปกวนด้วย Magnetic Stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจนเกิดเจลาตินไนซ์เซชัน เติมหีสเตอร์ , โกลคอลล ที่ความเข้มข้น 5% , 7.5% , 10% (w/w) ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซชัน 15 นาที เทสารละลายลงในภาชนะช้อน ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

(3) ศึกษาปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 3% (w/v) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังลงในน้ำกลั่น นำไปกวนด้วย Magnetic Stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจนเกิดเจลาตินไนซ์เซชัน เติมผงโซเดียมอัลจิเนตอย่างช้า ๆ จนเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายแป้ง ที่ความเข้มข้น 15% , 20% , และ 25% (w/w) ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง เติมหีสเตอร์ ที่ความเข้มข้น 5% (w/w) ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซชัน 15 นาที เทสารละลายลงในภาชนะช้อน ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

(4) ศึกษาปริมาณของนาโนเซลลูโลสในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 3% (w/v) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังลงไปในน้ำกลั่นนำไปกวนด้วย Magnetic Stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจนเกิดเจลาติไนซ์เซชัน โพรยผงโซเดียมอัลจินเตอย่างช้า ๆ จนเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายแป้ง ที่ความเข้มข้น 25% (w/w) ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง เติมผงนาโนเซลลูโลส 0.5% , 0.75% และ 1% (w/v) ของสารละลาย เติมกลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 5% (w/w) ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซชัน 15 นาที เติสารละลายลงในภาชนะเชื้อ ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

3.3.3 วิธีการทดสอบแผ่นฟิล์ม

(1) การทดสอบการบวมน้ำ

นำแผ่นฟิล์มที่ต้องการทดสอบ มาตัดขนาด 5 cm x 5 cm จำนวน 3 แผ่นวางบนภาชนะเชื้อขนาดเล็ก แล้วนำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักภาชนะและน้ำหนักแผ่นฟิล์ม แล้วเทน้ำกลั่นลงในภาชนะที่มีแผ่นฟิล์มที่ตัดแล้ว 30 มิลลิลิตร สังเกตการเปลี่ยนแปลง จนครบ 60 วินาที แล้วซับน้ำออกจากภาชนะให้หมด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าการบวมน้ำ

การคำนวณหาค่าการบวมน้ำ

$$\frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100$$

(2) การทดสอบการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์

นำแผ่นฟิล์มที่ต้องการทดสอบ มาตัดขนาด 5 cm x 5 cm จำนวน 3 แผ่นวางบนภาชนะเชื้อขนาดเล็ก แล้วนำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักภาชนะและน้ำหนักแผ่นฟิล์ม แล้วเทเอทานอล , โทลูอิน ลงในภาชนะที่มีแผ่นฟิล์มที่ตัดแล้ว 30 มิลลิลิตร สังเกตการเปลี่ยนแปลง จนครบ 60 วินาที แล้วซับน้ำออกจากภาชนะให้หมด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์

การคำนวณหาค่าการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์

$$\frac{\text{น้ำหนักหลังแช่สาร} - \text{น้ำหนักก่อนแช่สาร}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่สาร}} \times 100$$

(3) การทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มมาขนาด 3 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น ทดสอบด้วยเครื่อง Testometric M350-5 AT แล้วคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

(4) การทดสอบความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มมาขนาด 3 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น ทดสอบด้วยเครื่อง Testometric M350-5 AT แล้วคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม





บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมนาโนเซลลูโลสจากไยมะพร้าว

4.1.1 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากไยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำเส้นใยมะพร้าวปั่นให้เป็นผง ด้วยเครื่องปั่น และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 (w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองผงเส้นใยมะพร้าว และล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชประมาณ 7 กระบวนการสกัดและเส้นใยที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1.1 - 4.1.2



เส้นใยมะพร้าว



ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2
มิลลิเมตร



สกัดด้วยสารละลาย
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 นาน 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.1.1 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากไยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.1.2 เส้นใยเซลลูโลสจากไยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

เส้นใยเซลลูโลสที่ได้มีลักษณะละเอียดเป็นผง สีคล้ำ ปริมาณเส้นใยที่ได้หลังจากสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 56.01

(2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและเส้นใยเซลลูโลส

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้จากเส้นใยมะพร้าวตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI Standards Method โดยการนำเส้นใยที่สกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% (w/v) L:R 1:20 ได้ผลการทดลองแสดงในตารางภาคผนวกที่ ก1 - ก4 ตารางที่ 4.1.1

ตารางที่ 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวก่อนการปรับปรุงเส้นใย

องค์ประกอบทางเคมี	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
สารแทรกละลายในแอลกอฮอล์	1.33	0.32
ลิกนิน	41.21	37.43
ไฮโดรเซลลูโลส	85.3	77.42
แอลฟาเซลลูโลส	55.64	71.77
เฮมิเซลลูโลส	29.66	5.65

*หมายเหตุ : เฮมิเซลลูโลส = ไฮโดรเซลลูโลส – แอลฟาเซลลูโลส

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว พบว่าองค์ประกอบหลักของเส้นใยมะพร้าวคือแอลฟาเซลลูโลสมีปริมาณร้อยละ 85.3 รองลงมาเป็นปริมาณลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส มีปริมาณร้อยละ 41.21 และ 29.66 ตามลำดับ เส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% (w/v) มีปริมาณสารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์ ร้อยละ 0.32 ปริมาณลิกนิน ร้อยละ 37.43 ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสร้อยละ 77.42 ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ร้อยละ 71.77 และปริมาณเฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 5.65 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันพบว่าองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ มีความใกล้เคียงกัน (Venkateshwaran & Elayaperumal, 2010) เส้นใยมะพร้าวมีปริมาณลิกนินค่อนข้างสูง (John & Thomas, 2008) ทำให้มีความต้านทานแรงดึง สามารถนำไปเสริมความต้านทานแรงดึงให้กับวัสดุคอมพอสิตได้ดี

4.1.2 การปรับสภาพผิวเส้นใยมะพร้าว

(1) การปรับสภาพผิวเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำผงเส้นใยมะพร้าวมาปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 2 (w/v) กรดสเทียริก (10 กรัม/250 มิลลิลิตรเอทิลแอลกอฮอล์) กรดซิทริก (10 กรัม/250 มิลลิลิตรเอทิลแอลกอฮอล์) มาเลือกแอนไฮไดรต์เข้มข้นร้อยละ 8 (w/w) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้น กรองผงเส้นใยมะพร้าว แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชประมาณ 7 เติมน้ำกลั่นลงไปในเส้นใยมะพร้าวแล้ว ไปปั่นด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซชัน 7 นาที กรองเส้นใยมะพร้าวแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 8 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1.3) นำมาร้อนผ่านตะแกรง ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM แสดงในรูปที่ 4.1.4

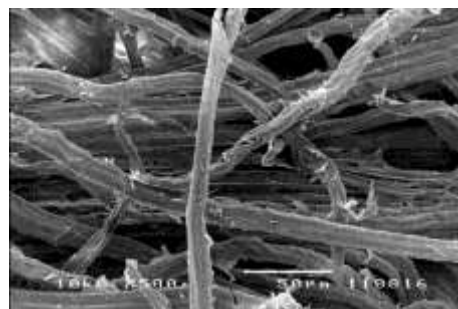


ปั่นเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซชัน
20000 รอบ/นาที 7 นาที

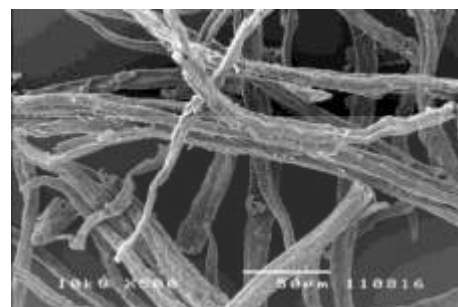
อบแห้ง 80 °C 8 hr

รูปที่ 4.1.3

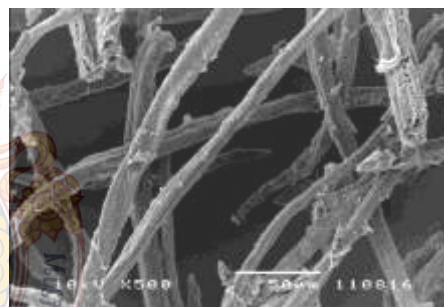
การปรับสภาพผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



ผงเส้นใยที่ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



ผงเส้นใยที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดสเทียริก



ผงเส้นใยที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดซิตริก



ผงเส้นใยที่ปรับสภาพผิวด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

รูปที่ 4.1.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้อง SEM

ผงเซลลูโลสที่เตรียมได้ มีขนาดประมาณ 0.10-0.15 มิลลิเมตร นำไปใช้สำหรับการเตรียมคอมพอสิตในขั้นต่อไป

(2) เปรียบเทียบปริมาณแอลฟาเซลลูโลสและปริมาณลิกนินของผงเซลลูโลส

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเซลลูโลสที่เตรียมได้จากเส้นใยมะพร้าวตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI Standards Method โดยการนำเส้นใยมาปั่นละเอียด แล้วปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดสเทียริก มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และกรดซิทริก ได้ผลการทดลองแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข1 นำค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสที่ปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิดกันมาวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อทดสอบว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมีต่างกัน มีผลต่อค่าเฉลี่ยองค์ประกอบต่างๆ ของเส้นใยหรือไม่ ได้ผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1.1 - 4.1.2

ตารางที่ 4.1.1 ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยสารเคมีต่างกัน

สารเคมีที่ใช้ปรับสภาพเส้นใย	N	Mean	Std. deviation	F	P
เส้นใยที่ไม่ปรับสภาพ	3	36.343	0.716	1.7316	0.219
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	3	35.437	0.801		
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดสเทียริก	3	35.507	0.629		
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	3	35.070	0.123		
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซิทริก	3	35.575	0.563		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 3.4780

ตารางที่ 4.1.2 ปริมาณลิกนินในเส้นใยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยสารเคมีต่างกัน

สารเคมีที่ใช้ปรับสภาพเส้นใย	N	Mean	Std. deviation	F	P
เส้นใยที่ไม่ปรับสภาพ	3	34.313	0.662	2.5606	0.104
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	3	33.433	0.711		
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดสเทียริก	3	33.370	0.187		
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	3	33.220	0.100		
เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซิทริก	3	33.220	0.100		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 3.4780

ผลการทดสอบด้วยค่าสถิติ F-test ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการใช้สารเคมีในการปรับสภาพเส้นใยเซลลูโลส ไม่มีผลต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส แกมมาเซลลูโลส เบต้าเซลลูโลส และปริมาณลิกนินในผงเส้นใย

4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

4.2.1 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้ง

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2, 3, 4 (w/v) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังลงไปในน้ำกลั่น กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนเกิดเจลลาติไนเซชัน (ประมาณ 30 นาที) หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซอร์ 15 นาที เทสารละลายลงในภาชนะเชื้อขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น ได้ฟิล์มแป้งลักษณะแสดงในรูปที่ 4.2.1 นำฟิล์มแป้งที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องมือวัดค่าความแข็ง SUNDOO-SH-500 ได้แสดงผลในตารางผนวกที่ ค1 นำค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึงมาทดสอบค่าสถิติ F test ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2.1



แป้งมันสำปะหลัง 2%

แป้งมันสำปะหลัง 3%

แป้งมันสำปะหลัง 4%

รูปที่ 4.2.1 ลักษณะแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.2.1 การทดสอบผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มแป้ง

แป้งมันสำปะหลัง % (w/v)	Mean (N)	SD	F	P
2	2.493	0.302	92.0060	<0.001
3	5.731	0.600		
4	5.260	0.220		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 3.8853

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มแป้งด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มที่ได้ก็จะมากขึ้น แต่หากเพิ่มความเข้มข้นไปอีก มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มที่ได้ลดลง ผลการทดลองพบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (w/v) ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ในภาชนะเชื้อขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 14.5 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น อย่างไรก็ตามแผ่นฟิล์มแบ่งที่ได้มีลักษณะ เปราะ ขาดง่าย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงเติมพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) เพื่อให้แผ่นฟิล์มอ่อนตัว และมีความยืดหยุ่น

4.2.2 ผลของพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแบ่ง

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 3 (w/v) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังลงในน้ำกลั่น กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจนเกิดเจลลิตีในเซชัน (ประมาณ 30 นาที) เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 7.5, 10 (w/w) ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจิไนเซชัน 15 นาที เทสารละลายลงในภาชนะเชื้อ ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มแล้วเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ผลการทดลองพบว่าการเติมกลีเซอรอลทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะยืดหยุ่นมากขึ้น ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2.2 นำแผ่นฟิล์มไปวัดความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง SUND00-SH-500 ได้แสดงผลในตารางผนวกที่ ค2 นำค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึง มาทดสอบค่าสถิติ F test ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2.2



รูปที่ 4.2.2 ลักษณะแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 3 %

ตารางที่ 4.2.2 การทดสอบผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแบ่ง

แป้งมันสำปะหลัง % (w/v)	กลีเซอรอล % (w/w of starch)	Mean (N)	SD	F	P
3	5	8.198	0.272		
3	7.5	7.338	0.579	17.6011	ค.0.001
3	10	5.826	0.905		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 3.8853

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มแบ่งที่เตรียมด้วยปริมาณกลีเซอรอลต่างกัน ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อค่าความต้านทาน

แรงดึงของฟิล์มแบ่งอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแบ่งลดลง ผลการทดลองพบว่า การใช้แบ่งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (w/v) และกลีเซอรอลปริมาณร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักแบ่ง ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ในสภาพเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง ให้แผ่นฟิล์มที่ลอกออกได้ง่าย มีความต้านทานแรงดึง และมีความยืดหยุ่นมากกว่าการไม่เติมสารพลาสติกไซเซอร์ ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม โดยเฉพาะสมบัติด้านความอ่อนตัว ทำให้ดัดโค้งได้ง่าย โดยลดค่า T_g ของพอลิเมอร์ ทำให้สภาพดัดโค้งหยุ่นตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มลดลง แต่ความยาว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์ม เพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยให้แผ่นฟิล์มมีความทนแรงกระแทกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (H. Liu, Wu, & Zhang, 2009; Sothornvit, Olsen, McHugh, & Krochta, 2003)

4.2.3 ผลของปริมาณโซเดียมอัลจินตต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแบ่ง

ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังโดยใช้แบ่งมันสำปะหลังปริมาณร้อยละ 3 กลีเซอรอลร้อยละ 5 ของน้ำหนักแบ่งมันสำปะหลัง โดยแปรผันปริมาณโซเดียมอัลจินตร้อยละ 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักแบ่งมันสำปะหลัง เทส่วนผสมทั้งหมดในปริมาณ 70 มิลลิลิตร อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2.3 นำแผ่นฟิล์มไปวัดค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง SUNDOO-SH-500 ได้แสดงผลในตารางผนวกที่ ค3 นำค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานแรงดึงมาทดสอบค่าสถิติ F test ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.2.3



ความเข้มข้น 18%

ความเข้มข้น 20%

ความเข้มข้น 25%

รูปที่ 4.2.3 ผลของปริมาณโซเดียมอัลจินตต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแบ่ง

ตารางที่ 4.2.3 การทดสอบผลของปริมาณโซเดียมอัลจิเนตต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้ง

แป้งมันสำปะหลัง % (w/v)	กลีเซอรอล % (w/w of starch)	โซเดียมอัลจิเนต % (w/w of starch)	Mean (N)	SD	F	P
3	5	18	6.958	0.355		
3	5	20	8.163	0.489	117.4398	<0.001
3	5	25	11.259	0.513		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 3.8853

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มแป้งที่เตรียมด้วยปริมาณโซเดียมอัลจิเนตต่างกันด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณโซเดียมอัลจิเนตมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้งอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณโซเดียมอัลจิเนตมากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแป้งเพิ่มขึ้น ผลการทดลองพบว่า การใช้แป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (w/v) และกลีเซอรอลปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักแป้ง โซเดียมอัลจิเนตปริมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักแป้ง เทปปริมาณส่วนผสม 70 มิลลิลิตร ในภาชนะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง ให้แผ่นฟิล์มที่ลอกออกได้ง่าย และมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด

4.3 การเตรียมกรีนคอมพอสิตจากฟิล์มแป้งมันสำปะหลังกับผงเส้นใย

4.3.1 ผลของการปรับสภาพผิวเส้นใยต่อความต้านทานแรงดึงของแผ่นกรีนคอมพอสิต

เตรียมสารละลายโดยใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 25 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง ในน้ำกลั่น กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนเกิดเจลาคีโนเซชัน (ประมาณ 30 นาที) เติมกลีเซอรอลปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซอร์ 15 นาที หลังจากนั้นผสมผงเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง เทส่วนผสมลงในภาชนะเชื้อ ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3.1 ทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นคอมพอสิต ที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวต่างกันด้วยเครื่องวัดความต้านทานแรงดึง และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ด้วยเครื่อง Testometric M350-5 AT ได้ผลทดสอบแสดงในตารางผนวกที่ ค4 นำค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงมาทดสอบค่าสถิติ F test ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3.1 - 4.3.2



รูปที่ 4.3.1 ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ผสมเส้นใยที่ปรับสภาพแบบต่างๆ

ตารางที่ 4.3.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วย สารต่างชนิด

แผ่นฟิล์ม	Mean (N)	SD	F	P
เส้นใยปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	69.49	0.757	30.5605	<0.001
เส้นใยปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	88.01	3.852		
เส้นใยปรับปรุงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	77.53	1.986		
เส้นใยปรับปรุงด้วยกรดซิตริก	80.393	1.906		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ตารางที่ 4.3.2 การทดสอบค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วย สารต่างชนิด

แผ่นฟิล์ม	Mean (mm)	SD	F	P
เส้นใยปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	3.453	0.453	8.9765	<0.001
เส้นใยปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก	4.312	0.181		
เส้นใยปรับปรุงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	3.984	0.029		
เส้นใยปรับปรุงด้วยกรดซิตริก	4.425	0.123		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มคอมพอสิตที่ผสมผง เซลลูโลสปริมาณร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแห้ง โดยใช้ผงเซลลูโลสที่ปรับสภาพผิวด้วยวิธีต่างกัน ด้วยวิธี วิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการปรับสภาพผิวเส้นใยมีผลต่อความต้านทานแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด ของกรีนคอมพอสิตอย่างมีนัยสำคัญ

เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดสเทียริกให้ความต้านทานแรงดึงของแผ่นกรีนคอมพอสิตสูงที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ โดยมี ค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นกรีนคอมพอสิตดังนี้ 88.01, 80.39, 77.53, และ 69.49 นิวตัน ตามลำดับ

เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก ให้ค่าความยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นกรีนคอมพอสิตสูง ที่สุด รองลงมาเป็นเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดสเทียริก มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ โดยมีค่าความยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นกรีนคอมพอสิตดังนี้ 4.425, 4.312, 3.984 และ 3.453 มิลลิเมตร ตามลำดับ

การปรับสภาพผิวเส้นใยในด้วยสารเคมีต่างชนิด ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของเส้นใยที่ได้จะมีความ ขรุขระต่างกัน ทั้งนี้พื้นผิวเส้นใยมีลักษณะขรุขระส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ดีขึ้น (Vilaseca et al., 2007)



4.3.3 ผลของปริมาณเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกต่อความต้านทานแรงดึงของแผ่นกรีนคอมพอสิต

เตรียมสารละลายโดยใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 25 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง ในน้ำกลั่น กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนเกิดเจลในเซชัน (ประมาณ 30 นาที) เติมกลีเซอรอลปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจิไนเซอร์ 15 นาที หลังจากนั้นผสมผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75, และ 1.00 โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง เทส่วนผสมลงในถาดเพาะเชื้อ ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาทดสอบความต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส ด้วยเครื่อง Testometric M350-5 AT ได้ผลทดสอบแสดงในตารางผนวกที่ ค4 นำค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึง มาทดสอบค่าสถิติ F test ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3.3 - 4.3.5

ตารางที่ 4.3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วย กรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน

ปริมาณผงเส้นใย (%) โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง	Mean (N)	SD	F	P
0.25	156.763	5.193	28.1569	<0.001
0.50	164.733	3.923		
0.75	171.433	3.896		
1.00	185.987	2.801		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ตารางที่ 4.3.4 การทดสอบค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในปริมาณต่างกัน

ปริมาณผงเส้นใย (%) โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง	Mean (mm)	SD	F	P
0.25	1.063	0.064	1.6464	0.254
0.50	1.028	0.105		
0.75	1.028	0.955		
1.00	0.885	0.164		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ตารางที่ 4.3.5 การทดสอบค่ามอดูลัส ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วย กรดซิทริกในปริมาณต่างกัน

ปริมาณผงเส้นใย (%) โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง	Mean (N/mm ²)	SD	F	P
0.25	558.537	6.642	3.7302	0.061
0.50	543.691	6.024		
0.75	533.249	3.422		
1.00	513.482	32.671		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

การทดสอบปริมาณของผงเส้นใยต่อความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของแผ่นคอมพอสิต พบว่าปริมาณผงเส้นใยไม่มีผลต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของแผ่นคอมพอสิต แต่มีผลค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้ปริมาณผงเซลลูโลสมากขึ้น แผ่นคอมพอสิตที่ได้มีความต้านทานแรงดึงมากขึ้น ทั้งนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับที่มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพอลิเมอร์ตามธรรมชาติ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และโปรตีนจากถั่วเหลือง มาใช้ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ ที่นำมาเสริมความแข็งแรงแก่แผ่นฟิล์ม/คอมพอสิต พบว่าชนิดและปริมาณเส้นใยที่ใช้ มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มที่ได้ (Corradini, Imam, Agnelli, & Mattoso, 2009; Khondker, Ishiaku, Nakai, & Hamada, 2006; W. Liu, Misra, Askeland, Drzal, & Mohanty, 2005; Ochi, 2006; Torres, Arroyo, Grande, & Esparza, 2006)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้ผงเซลลูโลสจากเส้นใยธรรมชาติ จะช่วยลดต้นทุนในการเพิ่มความแข็งแรงให้แผ่นคอมพอสิตลงได้แทนการการใช้เส้นใยสังเคราะห์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์กรีนคอมพอสิตยังสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ

4.3.3 ผลของปริมาณเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกต่อการบวมน้ำ และบวมในสารละลาย

อินทรีย์ ของแผ่นกรีนคอมพอสิต

เตรียมสารละลายโดยใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 25 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง ในน้ำกลั่น กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนเกิดเจลในเซชัน (ประมาณ 30 นาที) เติมน้ำเกลือปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนโฮโมจีไนเซอร์ 15 นาที หลังจากนั้นผสมผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซิทริกในปริมาณต่างๆ เทส่วนผสมลงในภาชนะเชื้อ ขนาด 14.5 เซนติเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 16 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาทดสอบการบวมน้ำ และบวมในสารละลายอินทรีย์ ได้ผลทดสอบแสดงในตารางผนวกที่ ค5 - ค6 นำค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงมาทดสอบค่าสถิติ F test ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.3.6 - 4.3.8

ตารางที่ 4.3.6 การทดสอบร้อยละของการบวมในน้ำ ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในปริมาณต่างกัน

ปริมาณผงเส้นใย (%) โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง	Mean (N/mm ²)	SD	F	P
0.25	576.818	8.671	7.7361	0.009
0.50	364.858	5.614		
0.75	343.967	4.545		
1.00	339.344	2.099		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ตารางที่ 4.3.7 การทดสอบร้อยละของการบวมในเอทานอล ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในปริมาณต่างกัน

ปริมาณผงเส้นใย (%) โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง	Mean (N/mm ²)	SD	F	P
0.25	146.954	1.106	3121.8983	<0.001
0.50	125.449	2.408		
0.75	75.074	1.087		
1.00	45.406	0.224		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ตารางที่ 4.3.8 การทดสอบร้อยละของการบวมในโทลูอีน ของแผ่นคอมพอสิตที่เตรียมจากผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในปริมาณต่างกัน

ปริมาณผงเส้นใย (%) โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง	Mean (N/mm ²)	SD	F	P
0.25	59.203	0.629	1116.109	<0.001
0.50	39.499	0.572		
0.75	35.282	0.813		
1.00	27.015	0.787		

Critical Value ($\alpha=0.05$) = F-table = 4.0662

ผลการทดสอบค่าการบวมตัวในน้ำ เอทานอล และโทลูอีน ของแผ่นฟิล์มคอมพอสิตที่ผสมผงเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในปริมาณต่างกัน ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณผงเส้นใยมีผลต่อค่าการบวมตัวในน้ำ เอทานอล และโทลูอีน ของกรีนคอมพอสิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณของผงเส้นใยเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าร้อยละการบวมในน้ำ เอทานอล และโทลูอีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 กระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

ภาวะที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณเส้นใยมะพร้าว : สารละลาย (กรัม : มิลลิลิตร) 1 : 10

ความเข้มข้นของสารละลาย (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 20

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) 80

เวลา (ชั่วโมง) 24

ภาวะที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพเส้นใยด้วยกรดสเทียริก กรดซิตริก และมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ปริมาณเส้นใยมะพร้าว : สารละลาย (กรัม : มิลลิลิตร) 1 : 10

กรดสเทียริก กรดซิตริก และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ : เอทิลแอลกอฮอล์ (กรัม : มิลลิลิตร)
10 : 250

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) 80

เวลา (ชั่วโมง) 12

5.2 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมกรีนคอมพอสิต

ภาวะที่ใช้ในการเตรียมกรีนคอมพอสิต

ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 3

ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง) 5

ปริมาณโซเดียมอัลจิเนต (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง) 25

ปริมาตรสารละลายทั้งหมด (มิลลิลิตร) 70

อุณหภูมิในการอบแห้ง (องศาเซลเซียส) 60

เวลา (ชั่วโมง) 16

5.3 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังผสมผงเซลลูโลส

ภาวะที่ใช้ในการเตรียมคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลัง และผงเซลลูโลส

ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	3
ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง)	5
ปริมาณโซเดียมอัลจิเนต (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง)	25
ปริมาณผงนาโนเซลลูโลส (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	0.5
ปริมาตรสารละลายทั้งหมด (มิลลิลิตร)	70
อุณหภูมิในการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	60
เวลา (ชั่วโมง)	16

5.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลังผสมผงเซลลูโลส

แป้งมันสำปะหลังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยอัตราส่วนของพลาสติกไฮเซอร อัลจิเนต ผงเส้นใย สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของแผ่นคอมพอสิต โดยเมื่อใช้ปริมาณกลีเซอรอลและอัลจิเนตเพิ่มมากขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มมีสมบัติความยืดหยุ่นดีขึ้น

แผ่นฟิล์มแป้งเมื่อนำมาเสริมแรงด้วยผงเส้นใยเป็นวัสดุคอมพอสิต พบว่าการเติมผงเส้นใยช่วยทำให้แผ่นคอมพอสิตที่ได้มีความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น มีความคงทนต่อน้ำและสารละลายอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการปรับสภาพผิวเส้นใยด้วยสารต่างชนิดกัน ทำให้เส้นใยที่ได้มีสภาพความขรุขระของผิวต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเข้ากันได้ของผงเส้นใยกับเมทริกซ์ และส่งผลความต้านทานแรงดึงของแผ่นคอมพอสิต

5.5 ข้อเสนอแนะ

- (1) ทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแผ่นคอมพอสิต
- (2) นำแผ่นคอมพอสิตที่ได้ไปทดลองบรรจุอาหาร เพื่อตรวจสอบการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

บรรณานุกรม

- Arvanitoyannis, I. S. (1999). Totally and Partially Biodegradable Polymer Blends Based on Natural and Synthetic Macromolecules: Preparation, Physical Properties, and Potential as Food Packaging Materials. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 39(2), 205–271. <https://doi.org/10.1081/MC-100101420>
- Bader, H. G., & Göritz, D. (1994). Investigations on High Amylose Corn Starch Films. Part 3: Stress Strain Behaviour. *Starch - Stärke*, 46(11), 435–439. <https://doi.org/10.1002/star.19940461106>
- Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Sáyago-Ayerdi, S. G., Moreno-Damian, E., & Figueroa, J. D. C. (2000). Some Structural, Physicochemical and Functional Studies of Banana Starches Isolated from two Varieties Growing in Guerrero, México. *Starch - Stärke*, 52(2–3), 68–73. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-379X\(200004\)52:2/3<68::AID-STAR68>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-379X(200004)52:2/3<68::AID-STAR68>3.0.CO;2-1)
- Beukers, A. 2001. “Polymer Matrix Composites: Application”, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Buscow, K.H.J., Cahn, R.W., Flemings, M.C., Ilcewicz, L.B., Kramer, E. J and. Mahajan, S Eds. Amsterdam: Elsevier, pp. 7384-7388.
- Bhattacharya, D., Germinario, L. T., & Winter, W. T. (2008). Isolation, preparation and characterization of cellulose microfibers obtained from bagasse. *Carbohydr. Polym*, 73, 371–377.
- Chawla, K.K. 2001 “Fibrous Reinforcements for Composites: Overview” in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Buscow, K.H.J., Cahn, R.W., Flemings, M.C., Ilcewicz, L.B., Kramer, E.J and. Mahajan, S Eds. Amsterdam: Elsevier, pp. 3160-3167
- Corradini, E., Imam, S. H., Agnelli, J. A. M., & Mattoso, L. H. C. (2009). Effect of Coconut, Sisal and Jute Fibers on the Properties of Starch/Gluten/Glycerol Matrix. *Journal of Polymers and the Environment*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301664937>
- Elazzouzi-Hafraoui, S., Nishiyama, Y., Putaux, J.-L., Heux, L., Dubreuil, F., & Rochas, C. (2008). The shape and size distribution of crystalline nanoparticles prepared by acid hydrolysis of native cellulose. *Biomacromolecules*, 9(1), 57–65. <https://doi.org/10.1021/bm700769p>

- Glenn, G. ., & Orts, W. . (2001). Properties of starch-based foam formed by compression/explosion processing. *Industrial Crops and Products*, 13(2), 135–143. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(00\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(00)00060-1)
- Han, J. H. (Ed.). (2005). *Innovations in food packaging*. Amsterdam: Elsevier.
- Hannant, D.J. 2000. “Cenment-based Composites”, in *Comprehensive Composite Materials*. Kelly, A. and Zweben, C. Eds. Amsterdam: Elsevier, pp. 323-362.
- Hizukuri, S., Kaneko, T., & Takeda, Y. (1983). Measurement of the chain length of amylopectin and its relevance to the origin of crystalline polymorphism of starch granules. *Biochimica et Biophysica Acta*, 760, 188–191.
- Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials* (2nd ed). Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- ICFAR. (2010, November 19). What is Lignin? | Lignoworks. Retrieved September 26, 2017, from <http://www.icfar.ca/lignoworks/content/what-lignin.html>
- Iwatake, A., Nogi, M., & Yano, H. (2008). Cellulose nanofiber-reinforced polylactic acid. *Composites Science and Technology*, 68(9), 2103–2106. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.006>
- Jiang, L., & Hinrichsen, G. (1999). Flax and cotton fiber reinforced biodegradable polyester amide composites, 2. Characterization of biodegradation. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 268(1), 18–21. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-9505\(19990701\)268:1<18::AID-APMC18>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-9505(19990701)268:1<18::AID-APMC18>3.0.CO;2-T)
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., & Laohakunjit, N. (2012). Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 542–546. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.034>
- Kasemsuwan, T., Jane, J., Chen, Y. Y., Lee, L. F., McPherson, A. ., Wong, K. S., & Radosavljevic, M. (1999). Effects of Amylopectin Branch Chain Length and Amylose Content on the Gelatinization and Pasting Properties of Starch. *Cereal Chemistry*, 76(5), 629–637.
- Kayisu, K., Hood, L. F., & Vansoest, P. J. (1981). Characterization of Starch and Fiber of Banana Fruit. *Journal of Food Science*, 46(6), 1885–1890. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04511.x>

- Khondker, O. A., Ishiaku, U. S., Nakai, A., & Hamada, H. (2006). A novel processing technique for thermoplastic manufacturing of unidirectional composites reinforced with jute yarns. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(12), 2274–2284. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.030>
- Ling, L.-H., Osman, E. M., Fernandes, J. B., & Reilly, P. J. (1982). Physical Properties of Starch from Cavendish Banana Fruit. *Starch - Stärke*, 34(6), 184–188. <https://doi.org/10.1002/star.19820340603>
- Liu, H., Wu, Q., & Zhang, Q. (2009). Preparation and properties of banana fiber-reinforced composites based on high density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends. *Bioresource Technology*, 100(23), 6088–6097. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.076>
- Liu, W., Misra, M., Askeland, P., Drzal, L. T., & Mohanty, A. K. (2005). ‘Green’ composites from soy based plastic and pineapple leaf fiber: fabrication and properties evaluation. *Polymer*, 46(8), 2710–2721. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.01.027>
- Luo, S., & Netravali, A. N. (1999a). Interfacial and mechanical properties of environment-friendly “green” composites made from pineapple fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin. *Journal of Materials Science*, 34(15), 3709–3719. <https://doi.org/10.1023/A:1004659507231>
- Luo, S., & Netravali, A. N. (1999b). Mechanical and thermal properties of environment-friendly “green” composites made from pineapple leaf fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin. *Polymer Composites*, 20(3), 367–378. <https://doi.org/10.1002/pc.10363>
- Luz, S. M., Gonçalves, A. R., & Del’Arco, A. P. (2007). Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fibers reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(6), 1455–1461. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.014>
- Mandal, A., & Chakrabarty, D. (2011). Isolation of nanocellulose from waste sugarcane bagasse (SCB) and its characterization. *Carbohydrate Polymers*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201600050322>
- Mellan, Ibert. (1961). *The behavior of plasticizers*. New York: Pergamon Press.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press.

- Müller, C. M. O., Yamashita, F., & Laurindo, J. B. (2008). Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach. *Carbohydrate Polymers*, 72(1), 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.026>
- Nakagaito, A. N., & Yano, H. (2005). Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. *Applied Physics A*, 80, 155–159.
- Nishino, T., Takano, K., Nakamae, K., Saitaka, K., Itakura, S., Azuma, J., & Okamura, K. (1995). Elastic modulus of the crystalline regions of cellulose triesters. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 33(4), 611–618. <https://doi.org/10.1002/polb.1995.090330411>
- Ochi, S. (2006). Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), 1879–1883. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.019>
- Oksman, K., Skrifvars, M., & Selin, J.-F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1317–1324. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00103-9)
- Pavlath, A. E., & Robertson, G. H. (1999). Biodegradable Polymers vs. Recycling: What Are the Possibilities. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 29(3), 231–241. <https://doi.org/10.1080/10408349891199400>
- Salomonsson, A.-C., & Sundberg, B. (1994). Amylose Content and Chain Profile of Amylopectin from Normal, High Amylose and Waxy Barleys. *Starch - Stärke*, 46(9), 325–328. <https://doi.org/10.1002/star.19940460902>
- Samir, I. Z., Zikry, A. A. F., & Gaber, S. H. (2005). Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules*, 6(2), 612–626.
- Smith, N., Nguyen, M. H., Hoang, D., Nguyen, T. S., Baulch, B., & Nguyen, T. L. T. (2009, August 1). Coconut in the Mekong Delta: An Assessment of Competitiveness and Industry Potential [Monograph]. Retrieved February 27, 2016, from <http://eprints.leedsbeckett.ac.uk/1434/>
- Soares, R. M. D., Lima, A. M. F., Oliveira, R. V. B., Pires, A. T. N., & Soldi, V. (2005). Thermal degradation of biodegradable edible films based on xanthan and starches from

- different sources. *Polymer Degradation and Stability*, 90(3), 449–454.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.007>
- Sothornvit, R., Olsen, C. w., McHugh, T. h., & Krochta, J. m. (2003). Formation Conditions, Water-vapor Permeability, and Solubility of Compression-molded Whey Protein Films. *Journal of Food Science*, 68(6), 1985–1999. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb07006.x>
- Stevenson, D. L., & Kennedy, J. F. (1987). Starch conversion technology: Edited by C. M. A. Beynum and J. A. Roels, Marcel Dekker Inc., New York, 1985. pp. 362, price £44.00, \$65.00. ISBN 0-8247-7194-X. *British Polymer Journal*, 19(3–4), 417–417.
<https://doi.org/10.1002/pi.4980190338>
- Suryanegara, L., Nakagaito, A. N., & Yano, H. (n.d.). The Effect of Crystallization of PLA on the Thermal and Mechanical Properties of Microfibrillated Cellulose-Reinforced PLA Composites. *Composites Science and Technology*, 69, 1187–1192.
- Susan, A. A., & Bailey, S. J. (2005). *Annual Book of ASTM Standards, section 7*.
- Takagi, H., & Asano, A. (2008). Effects of processing conditions on flexural properties of cellulose nanofiber reinforced “green” composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(4), 685–689.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.08.019>
- Takagi, H., & Ichihara, Y. (2004). Effect of Fiber Length on Mechanical Properties of “Green” Composites Using a Starch-Based Resin and Short Bamboo Fibers. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 47(4), 551–555. <https://doi.org/10.1299/jsmea.47.551>
- Tanada-Palmu, P. S., & Grosso, C. R. F. (2003). Development and characterization of edible films based on gluten from semi-hard and soft Brazilian wheat flours (development of films based on gluten from wheat flours). *Food Science and Technology (Campinas)*, 23(2), 264–269. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612003000200027>
- TAPPI Test Methods. (1988). *Technical association of the pulp and paper industry* (No. Method T 222 om-88). Atlanta, GA.
- T.H. McHugh, & E. Senesi. (2000). Apple Wraps: A Novel Method to Improve the Quality and Extend the Shelf Life of Fresh-cut Apples. *Journal of Food Science*, 65(3), 480–485.
- Tharanathan, R. . (2003). Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 71–78.
[https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00280-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00280-7)

- Torres, F. G., Arroyo, O. H., Grande, C., & Esparza, E. (2006). Bio- and Photo-degradation of Natural Fiber Reinforced Starch-based Biocomposites. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 55(12), 1115–1132.
<https://doi.org/10.1080/00914030600692109>
- Turbak, A. F., Snyder, F. W., & Sandberg, K. R. (1983). Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential. *Journal of Applied Polymer Science, Applied Polymer Symposium*, 37, 815–827.
- Venkateshwaran, N., & Elayaperumal, A. (2010). Banana Fiber Reinforced Polymer Composites - A Review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(15), 2387–2396. <https://doi.org/10.1177/0731684409360578>
- Vilaseca, F., Mendez, J. A., Pèlach, A., Llop, M., Cañigüeral, N., Gironès, J., ... Mutjé, P. (2007). Composite materials derived from biodegradable starch polymer and jute strands. *Process Biochemistry*, 42(3), 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.09.004>
- Vilay, V., Mariatti, M., Mat Taib, R., & Todo, M. (2008). Effect of fiber surface treatment and fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 68(3–4), 631–638.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.005>
- Waliszewski, K. N., Aparicio, M. A., Bello, L. A., & Monroy, J. A. (2003). Changes of banana starch by chemical and physical modification. *Carbohydrate Polymers*, 52(3), 237–242. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00270-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00270-9)
- Zhang, S.-D., Zhang, Y.-R., Zhu, J., Wang, X.-L., Yang, K.-K., & Wang, Y.-Z. (2007). Modified Corn Starches with Improved Comprehensive Properties for Preparing Thermoplastics. *Starch - Stärke*, 59(6), 258–268.
<https://doi.org/10.1002/star.200600598>
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, & นิธิยา รัตนพานนท์. (2015). Polysaccharide / พอลิแซ็กคาไรด์. Food Network Solution Co., Ltd. Retrieved from <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1101/polysaccharide-%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%81%E0%B8%8B%E0%B9%87%E0%B8%81%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B9%84%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B9%8C>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2559). มะพร้าว-ศูนย์ข้อมูลผลไม้. Retrieved from <http://www.oae.go.th/fruits/index.php/coconut-data>

ภาคผนวก ก

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว

1ก องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว

วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานของ TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

- ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบสำหรับวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI T264-om88
- ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์หาปริมาณสารแทรกที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ ตามมาตรฐาน TAPPI T204- om88
- ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน ตามมาตรฐาน TAPPI T222-om88
- ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ตามวิธี Acid chlorite ของ Browning ใน Wethod of Wood Chemistry
- ขั้นตอนที่ 5 การหาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T203-om88

- 1) การวิเคราะห์หาปริมาณสารแทรก ที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์
 - ล้างทำความสะอาดขวดก้นกลม 250 ml นำไปอบแห้ง
 - ชั่งตัวอย่าง 6 กรัมลงในขวดก้นกลม อบ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน dessicator เต็มเอธานอล ปริมาตร 400 ml
 - ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและจุดเดือดของตัวทำละลาย ใช้เวลาในการสกัดเป็นเวลา 5-7 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้เทใส่บีกเกอร์ที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำบีกเกอร์ไประเหยที่อุณหภูมิ 105 ± 3 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปเก็บไว้ใน dessicator แล้วชั่งน้ำหนักของสารที่เหลือรวมกับน้ำหนักของบีกเกอร์
 - ทำ blank โดยระเหยเอธานอล 400ml
 - คำนวณหาร้อยละของสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลาย

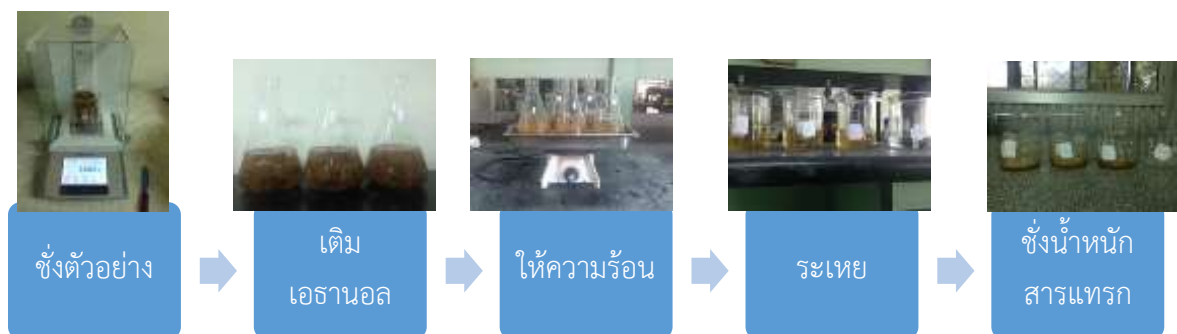
จากสูตร

$$\% \text{ สารแทรก} = [(W_e - W_b) / W_p] \times 100$$

เมื่อ W_e คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของสารที่ถูกสกัด

W_b คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของ blank

W_p คือ หนักแห้งเป็นกรัมของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก-1 ขั้นตอนในการทดลองวิเคราะห์หาปริมาณสารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์

ตารางที่ ก-1 ปริมาณสารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์ของเส้นใยมะพร้าว

ตัวอย่าง	No.	น้ำหนักแห้งของ ตัวอย่าง (Wp) (g)	น้ำหนัก ปิ๊กเกอร์ (g)	น้ำหนัก ปิ๊กเกอร์ + สาร แทรก (g)	น้ำหนักแห้ง ของสารที่ถูก สกัด(We) (g)	ร้อยละ ของสาร แทรก (%)
เส้นใยก่อนปรับ สภาพ	1	6.0002	177.9199	177.9952	0.0753	1.27
	2	6.0008	176.5769	176.6532	0.0763	1.38
	3	6.0003	176.4280	176.5037	0.0757	1.35
	mean				0.0758	1.33
เส้นใยหลังปรับ สภาพด้วยNaOH	1	6.0004	177.1428	177.1629	0.0201	0.29
	2	6.0006	178.0022	178.0242	0.0220	0.33
	3	6.0002	179.8901	179.9102	0.0201	0.29
	mean				0.0207	0.31
Blank			177.2189	177.2213		

2) การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน

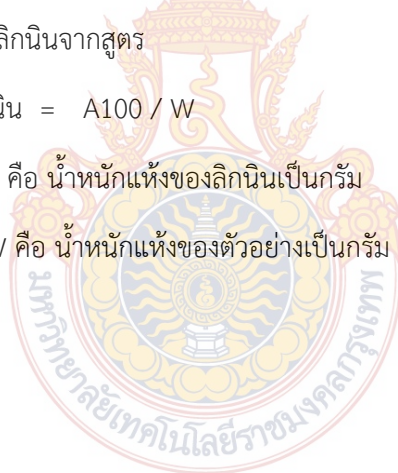
- ชั่งน้ำหนักแห้งที่ปราศจากสารแทรกของตัวอย่าง น้ำหนัก 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 mL วางบีกเกอร์ในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นค่อยๆ เติม 72% H_2SO_4 ที่แช่เย็น 15 mL. ขณะที่เติมกรดให้วางบีกเกอร์ในอ่างน้ำแข็ง และกวนตลอดเวลาจนกระทั่งสารละลายกระจายตัวทั่วทั้งเส้นใยมะพร้าว
- ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ทุกๆ 15 นาที
- เติมน้ำกลั่นปริมาตร 200 mL. ลงในขวดกั่นกลมขนาด 500 mL. และถ่ายสารละลายจากบีกเกอร์ลงในขวดกั่นกลม และใช้กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 3% ล้างบีกเกอร์ และเทลงในขวดกั่นกลม
- ให้ความร้อน 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
- กรองตัวอย่างผ่าน glass crucible ที่ทราบน้ำหนัก ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 3^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- ทำให้เย็นใน desicator และนำไปชั่งน้ำหนักรวมของ glass crucible และลิกนิน

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ลิกนินจากสูตร

$$\% \text{ ลิกนิน} = A100 / W$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักแห้งของลิกนินเป็นกรัม

W คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างเป็นกรัม





รูปที่ ก-2

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณปริมาณสารลิกนินในเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ก-2 ปริมาณลิกนินในเส้นใยมะพร้าว

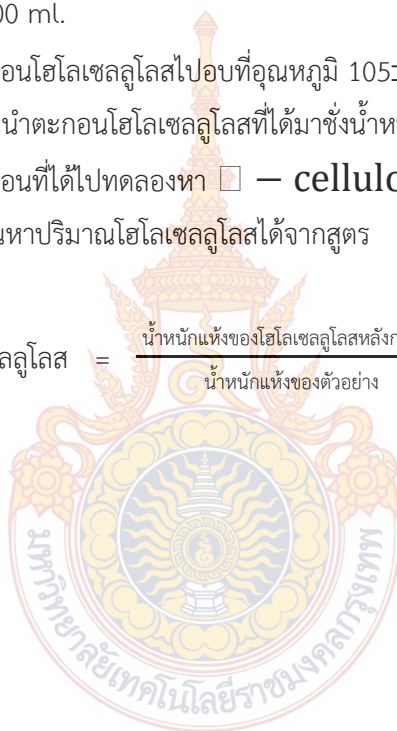
ตัวอย่าง	No.	น้ำหนักแห้ง เส้นใย (g)	น้ำหนัก กระดาษกรอง (g)	น้ำหนัก กระดาษกรอง และสารลิกนิน (g)	น้ำหนักแห้ง ของลิกนิน (g)	ร้อยละของ ปริมาณลิกนิน (%)
เส้นใยก่อน ปรับสภาพ	1	1.0007	1.1387	1.5410	0.4023	40.20
	2	1.0002	1.129	1.5510	0.4220	42.19
	3	1.0008	1.172	1.5846	0.4126	41.23
	mean				0.4123	41.21
เส้นใยหลัง ปรับสภาพ ด้วย NaOH	1	1.0005	1.1446	1.5248	0.3802	38.00
	2	1.0004	1.1645	1.5693	0.4048	40.46
	3	1.0004	1.1746	1.5129	0.3383	33.82
	mean				0.3744	37.43



3) การวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเซลลูโลส

- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ปราศจากสารแทรก 3 กรัม ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 ml.
- เติมน้ำกลั่น 150 ml. กรดอะซิติก 0.5 ml. และโซเดียมคลอไรด์ 1.5 กรัม ตามลำดับใส่ลงในขวดก้นกลมและทำในตู้ควั่น
- นำไปให้ความร้อนโดยใช้ water bath ที่มีอุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 30 นาที
- หลังจากครบ 30 นาที เติมกรดอะซิติก 0.5 ml. และโซเดียมคลอไรด์ 1.5 กรัม ลงในสารละลายที่ยังร้อนอยู่แล้วเขย่าขวด ให้ความร้อนต่อไปอีก 30 นาที
- นำขวดก้นกลมมาวางในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นนำสารละลายมารองผ่าน glass crucible ที่ทราบน้ำหนัก และล้างด้วยน้ำเย็นจนหมด Cl_2 (สารละลายจะใส) แล้วตามด้วย อะซิโตน 100 ml.
- นำตะกอนไฮโดรเซลลูโลสไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตะกอนไฮโดรเซลลูโลสที่ได้มาชั่งน้ำหนัก
- นำตะกอนที่ได้ไปทดสอบหา ☐ — cellulose ต่อไป
- คำนวณหาปริมาณไฮโดรเซลลูโลสได้จากสูตร

$$\text{ไฮโดรเซลลูโลส} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของไฮโดรเซลลูโลสหลังการอบ}}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง}} \times 100$$





กรดอะซิติก 0.5 ml.
โซเดียมคลอไรด์ 1.5
กรัม ให้ความร้อน
ต่อไปอีก 30 นาที

ซึ่งตัวอย่างที่ปราศจาก
สารแทรก 3 กรัม

เติมน้ำกลั่น 150 ml. กรดอะ
ซิติก 0.5 ml. โซเดียมคลอไรด์
1.5 กรัม

ให้ความร้อน 30 นาที (อย่าให้
เดือด)



อบที่ $T=105^{\circ}\text{C}$ เวลา 1 hr



กรองโดยล้างด้วยน้ำเย็นจน
หมด Cl_2 อะซิโตน 100 ml.

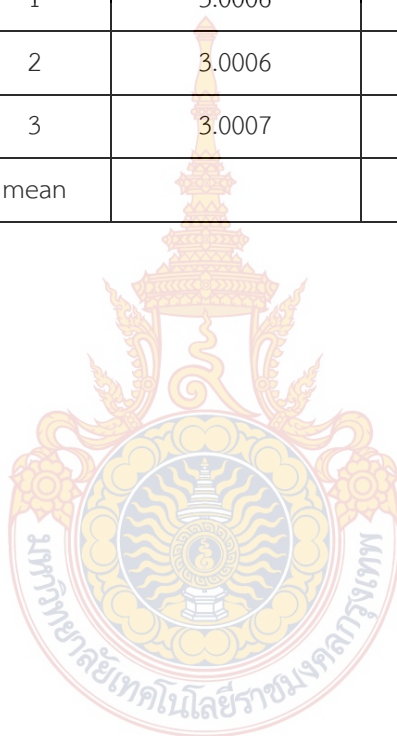


ทิ้งให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง

รูปที่ ก-3 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนคลอไรด์ในเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ก-3 ปริมาณฮาโลเซลลูโลสในเส้นใยมะพร้าว

ตัวอย่าง	No.	น้ำหนักแห้งเส้นใย (g)	น้ำหนักของฮาโล. เซลลูโลส (g)	ร้อยละของปริมาณ ฮาโลเซลลูโลส (%)
เส้นใยก่อนปรับสภาพ	1	2.9995	2.6452	88.19
	2	3.0006	2.4608	82.01
	3	3.0007	2.572	85.71
	mean		2.559	85.30
เส้นใยหลังปรับสภาพ ด้วย NaOH	1	3.0006	2.4095	80.30
	2	3.0006	2.1508	71.68
	3	3.0007	2.4094	80.29
	mean		2.323	77.42



4) การวิเคราะห์ปริมาณ แอลฟา-เซลลูโลส

- ชั่งตัวอย่างที่ได้จากการหาไฮโดรเซลลูโลส 1.5 กรัม ลงในบีกเกอร์ 500 ml. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 10 ml.
- กวนจนสารละลายกระจายทั่วเส้นใย
- เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 ml. ทุกๆ 5 นาที จนครบ 30 นาที
- เติมน้ำกลั่น 33 ml. จากนั้นกวนตัวอย่างด้วยแท่งแก้วอีก 1 ชั่วโมง
- เมื่อครบเวลา กรองตัวอย่างด้วย glass crucible (ห้ามล้างน้ำ) เก็บสิ่งที่กรองได้จะได้เป็นสารละลายสีเหลืองใส

การวิเคราะห์หาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

วิธีการทดลอง

- ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 25 ml. ใส่ใน flask 250 ml. และเติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 0.5 N ปริมาตร 10 ml. และกวนสารละลาย
- ค่อยๆ เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 50 ml. ลงไป
- เติมน้ำกลั่น 50 ml. ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- เติม ferroin indicator 2-4 หยด และไตเตรตด้วย 0.1 N ของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วง
- ทำ blank โดยการเตรียมสารละลาย NaOH 17.5% ปริมาตร 12.5 ml. ผสมกับน้ำกลั่น 12.5 ml.
- คำนวณหา % α -cellulose ได้จาก

$$\% \alpha\text{-cellulose} = 100 - \frac{6.85(V_2 - V_1) \times N \times 20}{W \times 100}$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง (ml)

V_2 คือ ปริมาตรที่ใช้ในการไตเตรตblank (ml)

N คือ Normality ของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

A คือ ปริมาตรของส่วนที่กรองได้ (ml)

W คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)



รูปที่ ก-4 การวิเคราะห์ปริมาณ แอลฟา-เซลลูโลสในเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ก-4 ปริมาณ แอลฟา-เซลลูโลสในเส้นใยมะพร้าว

ตัวอย่าง	No.	น้ำหนัก แห้งเส้น ใยก่อน (g)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (g)	น้ำหนัก กระดาษกรอง และสาร ลิกนิน (g)	น้ำหนักของ เส้นใยหลัง (g)	ปริมาตร ไตรเตต (ml)
เส้นใยก่อน ปรับปรุงสภาพ	1	1.4992	1.1084	2.5105	1.4021	17.2
	2	1.4991	1.1520	2.5845	1.4325	20.5
	3	1.4996	1.1316	2.6042	1.4726	19.1
เส้นใยหลังปรับปรุง สภาพด้วย NaOH	1	1.5009	1.1485	2.6353	1.4868	21.3
	2	1.4998	1.1410	2.5254	1.3844	21.7
	3	1.5004	1.1544	2.5530	1.3986	21.5



ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการขึ้นรูปกรีนคอมพอสิตกับนาโนเซลลูโลส



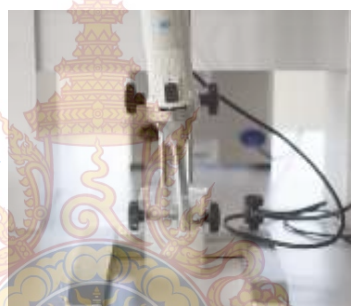
เตรียมแป้ง



และโซเดียมอัลจิเนต

ละลายด้วยน้ำร้อน และกวน
ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก

และผสมด้วยเส้นใยมะพร้าว



กวนด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์



ผสมด้วยกลีเซอรอล

กวนให้เส้นใยและเจลเป็นเนื้อ
เดียวกัน ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์เทลงถาดเพาะเชื้อแล้ว
อบที่ 40 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ภาคผนวก ค

การทดสอบสมบัติของแผ่นกรีนคอมพอสิต

การทดสอบความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มขนาด 10×10 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ทดสอบด้วยเครื่องมือวัดค่าความต้านทานแรงดึง SUND00-SH-500 แล้วคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม 1

นำแผ่นฟิล์มขนาด 3×10 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ทดสอบด้วยเครื่อง Testometric M350-5 AT แล้วคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

การทดสอบความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มขนาด 3×10 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ทดสอบด้วยเครื่อง Testometric M350-5 AT แล้วคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม



ตารางที่ ค1 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

ครั้งที่	ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง		
	2%	3%	4%
1	2.383	6.670	5.370
2	2.050	5.050	4.880
3	2.700	5.430	5.350
4	2.500	5.770	5.430
5	2.830	5.733	5.270
Mean	2.081	4.781	4.390
SD	1.045	2.388	2.140

ตารางที่ ค2 ผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม (ใช้แป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ3)

ครั้งที่	ปริมาณกลีเซอรอล		
	5%	7.50%	10%
1	8.430	7.570	4.870
2	8.230	6.500	6.800
3	8.270	8.030	6.630
4	8.330	7.070	4.950
5	7.730	7.520	5.880
Mean	6.840	6.128	4.872
SD	3.697	3.278	2.710

ตารางที่ ค3 ผลของปริมาณอัลจินตต่อความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม (แป้งมันสำปะหลังเข้มข้นร้อยละ 3 กลีเซอรอลที่ปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง)

ครั้งที่	ปริมาณอัลจินต		
	18%	20%	25%
1	6.587	8.290	11.900
2	6.725	8.660	11.687
3	6.950	7.600	10.825
4	7.513	7.700	11.125
5	7.015	8.567	10.756
mean	5.828	6.845	9.416
SD	2.785	3.260	4.538

ตารางที่ ค4 สมบัติทางกายภาพของกรีนคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสไยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยสารต่างชนิด

Test name		Force Peak (N)	Elong Peak (mm)	Elong Break (mm)	Stress Peak (N/mm ²)
เส้นใยที่ปรับปรุงด้วย NaOH 0.5%w/v	1	68.65	1.063	3.063	1.546
	2	70.12	0.95	3.95	1.885
	3	69.7	1.069	3.345	1.588
	Mean	69.49	1.027	3.453	1.673
	SD	0.757	0.067	0.453	0.185
เส้นใยที่ปรับปรุงด้วย Stearic 0.5%w/v	1	89.53	1.506	4.517	3.581
	2	90.87	1.178	4.178	3.035
	3	83.63	1.508	4.24	3.345
	Mean	88.01	1.397	4.312	3.32
	SD	3.852	0.19	0.181	0.274
เส้นใยที่ปรับปรุงด้วย Maleic 0.5%w/v	1	79.04	1.51	4.018	3.162
	2	75.28	1.385	3.966	2.971
	3	78.27	1.392	3.968	2.891

Test name		Force Peak (N)	Elong Peak (mm)	Elong Break (mm)	Stress Peak (N/mm ²)
	Mean	77.53	1.429	3.984	3.008
	SD	1.986	0.07	0.029	0.139
เส้นใยที่ปรับปรุง ด้วย Citric 0.5%w/v	1	80.47	1.383	4.283	3.019
	2	82.26	1.382	4.49	2.89
	3	78.45	1.301	4.501	3.538
	Mean	80.393	1.355	4.425	3.149
	SD	1.906	0.047	0.123	0.343

การขึ้นรูปฟิล์ม

- แป้งมันสำปะหลัง 3%w/v
- กลีเซอรอล 5% ของแป้งมันสำปะหลัง
- อัลจิเนต 25% ของแป้งมันสำปะหลัง

***ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบงานเพาะเชื้อ 70 มิลลิลิตร



ตารางที่ ค4 สมบัติทางกายภาพของกรีนคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสใยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสใยมะพร้าวต่างกัน

Test name		Elong. @Peak (mm)	Force @Peak (N)	Tangential Modulus @0.000% (N/mm2)	Youngs Modulus @0.000% (N/mm2)	Elong. @Break (mm)
นาโนเซลลูโลสใย มะพร้าว 0.25%	1	0.919	182.76	169.687	564.473	0.919
	2	0.707	187.79	174.615	559.775	0.707
	3	1.029	187.41	169.474	551.363	1.029
	Mean	0.885	185.9867	171.2587	558.537	0.885
	SD	0.16367	2.800827	2.90862	6.642101	0.16367
นาโนเซลลูโลสใย มะพร้าว 0.50%	1	0.914	174.47	159.688	541.381	0.914
	2	0.922	172.79	156.945	539.164	0.922
	3	1.028	167.04	151.429	550.529	1.028
	Mean	0.954667	171.4333	156.0207	543.6913	0.954667
	SD	0.063634	3.896362	4.206372	6.024453	0.063634
นาโนเซลลูโลสใย มะพร้าว 0.75%	1	1.023	166.19	134.375	536.842	1.023
	2	0.926	160.29	141.429	530.028	0.926
	3	1.136	167.72	134.595	532.876	1.136
	Mean	1.028333	164.7333	136.7997	533.2487	1.028333
	SD	0.105102	3.923345	4.010629	3.422252	0.105102
นาโนเซลลูโลสใย มะพร้าว 1.00%	1	1.027	151.41	124.286	489.621	1.027
	2	1.137	161.78	123.75	500.107	1.137
	3	1.026	157.1	120	550.717	1.026
	Mean	1.063333	156.7633	122.6787	513.4817	1.063333
	SD	0.063799	5.193191	2.335223	32.67019	0.063799

การทดสอบการบวมน้ำ

อุปกรณ์และสารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. ถาดเพาะเชื้อ
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบ
5. ชิ้นตัวอย่างทดสอบ

วิธีการทดสอบ

นำแผ่นฟิล์มที่ต้องการทดสอบ มาตัดขนาด 5 cm x 5 cm จำนวน 3 แผ่นวางบนถาดเพาะเชื้อขนาดเล็ก แล้วนำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักถาดและน้ำหนักแผ่นฟิล์ม แล้วเทน้ำกลั่นลงในถาดที่มีแผ่นฟิล์มที่ตัดแล้ว 30 มิลลิลิตร สังเกตการเปลี่ยนแปลง จนครบ 60 วินาที แล้วซับน้ำออกจากถาดให้หมด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าการบวมน้ำ

การคำนวณหาค่าการบวมน้ำ

$$\frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100$$



การทดสอบการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์

อุปกรณ์และสารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. ถาดเพาะเชื้อ
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบ
5. ชิ้นตัวอย่างทดสอบ

วิธีการทดสอบ

นำแผ่นฟิล์มที่ต้องการทดสอบ มาตัดขนาด 5 cm x 5 cm จำนวน 3 แผ่นวางบนถาดเพาะเชื้อขนาดเล็ก แล้วนำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักถาด และน้ำหนักแผ่นฟิล์ม แล้วเติมเอทานอล , โทลูอิน ลงในถาดที่มีแผ่นฟิล์มที่ตัดแล้ว 30 มิลลิลิตร สังเกตการเปลี่ยนแปลงจนครบ 60 วินาที แล้วชั่งน้ำหนักออกจากถาดให้หมด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์

การคำนวณหาค่าการบวมในตัวทำละลายอินทรีย์

$$\frac{\text{น้ำหนักหลังแช่สาร} - \text{น้ำหนักก่อนแช่สาร}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่สาร}} \times 100$$



ตารางที่ ค5 ร้อยละการบวมน้ำของกรีนคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสไยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสไยมะพร้าวต่างกัน

ปริมาณผงไยมะพร้าวชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกในแผ่นฟิล์ม		น้ำหนัก ถาด	น้ำหนักผง ก่อนแช่	น้ำหนักผง หลังแช่ กับถาด	น้ำหนักผง หลังแช่	ร้อยละ การบวม น้ำ	Mean	SD
0.25%	1	42.4728	0.3961	45.125	2.6522	569.5784	576.8184	8.671546
	2	41.414	0.3941	44.072	2.658	574.4481		
	3	41.3427	0.406	44.1296	2.7869	586.4286		
0.50%	1	44.5406	0.5583	47.1295	2.5889	363.7113	364.8575	5.613566
	2	44.4856	0.5083	46.8233	2.3377	359.9056		
	3	45.0209	0.5922	47.8099	2.789	370.9558		
0.75%	1	42.5818	0.491	44.7864	2.2046	349.002	343.9669	4.545191
	2	41.789	0.4898	43.9575	2.1685	342.7317		
	3	42.5783	0.4551	44.5815	2.0032	340.167		
1.00%	1	43.238	0.4926	45.4136	2.1756	341.6565	339.344	2.09873
	2	43.4702	0.4846	45.5967	2.1265	338.8155		
	3	45.0143	0.4992	47.1986	2.1843	337.5601		

การขึ้นรูปฟิล์ม

- แป้งมันสำปะหลัง 3%w/v
 - กลีเซอรอล 5% ของแป้งมันสำปะหลัง
 - อัลจินต 25% ของแป้งมันสำปะหลัง
- ***ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบเฉพาะเชื้อ 70 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค6 ร้อยละการบวมในเอทานอลของกรีนคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสไยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสไยมะพร้าวต่างกัน

ปริมาณผงไยมะพร้าวชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกในแผ่นฟิล์ม		น้ำหนัก ถาด	น้ำหนัก ก่อนแช่	น้ำหนัก หลังแช่ กับถาด	น้ำหนัก หลังแช่	ร้อยละ การบวม ในเอทานอล	Mean	SD
0.25%	1	42.7776	0.3012	43.523	0.7454	147.4768	146.9542	1.10612
	2	41.4857	0.373	42.4021	0.9164	145.6836		
	3	41.3426	0.3547	42.2212	0.8786	147.7023		
0.50%	1	42.5801	0.4001	43.471	0.8909	122.6693	125.4499	2.408046
	2	41.789	0.5803	43.1053	1.3163	126.8309		
	3	42.5789	0.4853	43.6798	1.1009	126.8494		
0.75%	1	44.54	0.3117	45.0831	0.5431	74.23805	75.07464	1.086589
	2	44.4841	0.3235	45.0492	0.5651	74.68315		
	3	45.0192	0.2418	45.4455	0.4263	76.30273		
1.00%	1	43.2334	0.5217	43.9908	0.7574	45.17922	45.40585	0.224355
	2	43.468	0.5774	44.3076	0.8396	45.41046		
	3	45.012	0.3934	45.5849	0.5729	45.62786		

การขึ้นรูปฟิล์ม

- แป้งมันสำปะหลัง 3%w/v
- กลีเซอรอล 5% ของแป้งมันสำปะหลัง
- อัลจิเนต 25% ของแป้งมันสำปะหลัง

***ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบเฉพาะเชื้อ 70 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค7 ร้อยละการบวมในโพลูอินของกรีนคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสไยมะพร้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ที่ปริมาณนาโนเซลลูโลสไยมะพร้าวต่างกัน

ปริมาณผงไยมะพร้าวชนิดที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกในแผ่นฟิล์ม		น้ำหนัก ถาด	น้ำหนัก ก่อนแช่	น้ำหนัก หลังแช่ กับถาด	น้ำหนัก หลังแช่	ร้อยละ การบวม ในโพลูอิน	Mean	SD
0.25%	1	41.3429	0.505	42.1502	0.8073	59.86139	59.20286	0.629959
	2	42.1389	0.6055	43.1025	0.9636	59.14121		
	3	41.5349	0.5165	42.3541	0.8192	58.606		
0.50%	1	44.4834	0.5176	45.2066	0.7232	39.72179	39.49934	0.572707
	2	44.6753	0.4986	45.3676	0.6923	38.84878		
	3	44.3857	0.5237	45.1185	0.7328	39.92744		
0.75%	1	42.5784	0.4024	43.119	0.5406	34.34394	35.28168	0.81317
	2	42.3881	0.4135	42.9496	0.5615	35.79202		
	3	42.7138	0.4125	43.2736	0.5598	35.70909		
1.00%	1	41.7895	0.4195	42.3186	0.5291	26.12634	27.01477	0.787094
	2	41.5876	0.4023	42.0997	0.5121	27.29306		
	3	41.8925	0.4543	42.4723	0.5798	27.62492		

การขึ้นรูปฟิล์ม

- แป้งมันสำปะหลัง 3%w/v
- กลีเซอรอล 5% ของแป้งมันสำปะหลัง
- อัลจิเนต 25% ของแป้งมันสำปะหลัง

***ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบงานเพาะเชื้อ 70 มิลลิลิตร