

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมแผ่นใยไม้อัดที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์จากใบสับปะรด

ด้วยกาจากแป้งข้าวเหนียว



นางสาวดุขฎิ ไตรสุวรรณ

นายบรรพศึ ย้งช้วย

นางสาวมณฑิรา นิยม

๒๗.
๑๗๓๑ก
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....107862
วัน,เดือน,ปี.....- 8 ส.อ. 2553

b.....122141b4
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การเตรียมแผนใยไม้อัดที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์จากใบสับปะรด
ด้วยกาวจากแป้งข้าวเหนียว

นักศึกษา นางสาวดุษฎี ไตรสุวรรณ
นายบวรพงศ์ ยิ่งช่วย
นางสาวมณฑิรา นิยม

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ
กรรมการ อ.สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล
กรรมการ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์

.....
(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมแผ่นใยไม้อัดที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์จากใบสับปะรดด้วย กาวจากแป้งข้าวเหนียว	
นักศึกษา	นางสาวดุขฎิ	ไตรสุวรรณ
	นายบวรพงศ์	ยังช่วย
	นางสาวมณฑิรา	นิยม
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2550	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.มาลินี	ชัยศุภกิจสินธุ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยของใบสับปะรดกับกาวที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ โดยขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที อัตราส่วนของเส้นใยสับปะรดต่อกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 1:1 และความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมคือ 0.6 กรัม/ลบ.ซม. แล้วนำแผ่นใยไม้อัดไปทดสอบสมบัติเชิงกลรวมทั้งศึกษาโครงสร้างทางเคมีของกาวที่เตรียมได้

จากผลการทดลองพบว่าความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยวิธี IR พบว่าพีคที่แสดงค่าหมู่ $-OH$ ของแป้งข้าวเหนียวจะแคบขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ $-OH$ ของแป้งเกิดเป็น $-O^-Na^+$ ซึ่งดูน้ำได้ดียิ่งขึ้นส่งผลให้กาวแป้งข้าวเหนียวที่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและมอดุลัสแตกร้าวของแผ่นใยไม้อัดให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้แป้ง 30 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Preparation of Fire resistance Fiberboard from Pineapple leaf using formaldehyde-free adhesive Waxy Starch

Student Dudsadee Trisuwan
Borwonpong Youngchuay
Montira Niyom

Department Chemistry Faculty of Science

Program Industrial Chemistry

Year 2007

Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

The objective of this special project is to studied the mechanical and physical properties of fiberboard made from pineapple leaves and glue. Waxy starch was mixed with sodium hydroxide at various ratio for used as glue. Fiberboard was prepared by compression molding machine at room temperature for 10 min. The ratio of pineapple leaves and glue was 1:1 and board density was 0.6 g/cm^3 .

The experimental results showed that viscosity of glue increases with the increment of waxy starch and sodium hydroxide. FTIR spectrum suggested that broad peak of $-\text{OH}$ change to sharp peak after adding sodium hydroxide. This indicated that sodium hydroxide reacted with $-\text{OH}$ group and change to $-\text{O}^-\text{Na}^+$, leading to decreased hydrogen bond but increased viscosity. The highest modulus of elasticity and modulus of rupture were found when using 30 g of waxy starch and 10 g of NaOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย
ทางคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ ที่กรุณาแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจน
ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือ
ในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ผู้จัดทำวิจัย
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวดุชนิ ไตรสุวรรณ

นายบรรพศ ยังช่วย

นางสาวมณฑิรา นิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	IV
สารบัญรูป	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ความหมายของแผ่นขึ้นไม้อัด	3
2.1.1 ชนิดของแผ่นใยไม้อัด	4
2.1.2 วัตถุดิบ	5
2.2 กรรมวิธีการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด	7
2.3 เส้นใยธรรมชาติ	8
2.3.1 เซลลูโลส	8
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส	10
2.3.3 ลิกนิน	
2.4 สัณฐานวิทยาของใบสับปะรด	12
2.5 แป้ง	15
องค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง	15
2.6 สมบัติของแป้ง	29
2.6.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย	29
2.6.2 ความหนืด	34
2.7 ปัจจัยที่มีต่อสมบัติของแผ่นใยไม้อัด	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 ชนิดของวัตุดิบ	47
2.7.2 ชนิดของสารยึดติด	48
2.7.3 ระดับการแพร่ของความชื้น	50
2.7.4 ความหนาของแผ่นใยไม้อัด	50
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	51
<u>บทที่ 3</u> การดำเนินการวิจัย	54
3.1 วัตุดิบ	54
3.2 ชุดเครื่องมือในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด	55
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน	56
3.4 กรรวิธีกรการผลิตแผ่นใยไม้อัด	56
3.4.1 การเตรียมวัตุดิบ	57
3.4.2 สภาพะที่ใช้ในการผลิตแผ่นใยไม้อัด	57
3.4.3 การผสมกาว	57
3.4.4 การเตรียมอัดแผ่น	58
3.4.5 การอัดขึ้นรูป	58
3.4.6 การพักชิ้นงานและการตกแต่ง	59
3.4.7 การเตรียมชิ้นทดสอบในการทดสอบสมบัติเชิงกล	59
3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน	60
3.5.1 วิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ	60
3.5.2 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกล	61
<u>บทที่ 4</u> ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	63
4.1 ความหนืด	63
4.2 ความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัด	67
4.3 สมบัติเชิงกล	68
4.4 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR SPECTRUM	72
4.5 ภาพถ่ายด้านข้างชิ้นงาน	74
<u>บทที่ 5</u> สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 ผลการทดลอง	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 การนำไปใช้ประโยชน์	77
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
ภาคผนวก	78
เอกสารอ้างอิง	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของแผ่นขึ้นไม้อัด แบ่งตามลักษณะความหนาแน่น	5
2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและธาตุที่เป็นองค์ประกอบในใบสับประรด	14
2.3 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	17
2.4 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด	24
2.5 คุณสมบัติของแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน	25
2.6 ปริมาณอะมิโลสและขนาดโมเลกุลของแป้งที่สกัดจากมันสำปะหลัง 4 พันธุ์ ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน	26
2.7 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่าง	27
2.8 ปริมาณอะมิโลสและปริมาณไขมันในข้าวโพดพันธุ์ต่างๆ	28
2.9 คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95°C	32
2.10 คุณสมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	39
2.11 ลักษณะการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งแต่ละชนิด	43
2.12 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งชนิดต่างๆที่มีน้ำอยู่มากพอโดยใช้ DSC ซึ่งจะเป็นค่าระหว่างเริ่มต้น (T_0) ถึงสูงสุด (T_p)	44
2.13 อัตราการคืนตัวของแป้งละชนิด	46
3.1 สูตรการแปรรูปข้าวเหนียว	55
4.1 แสดงค่าความหนืด (cp) กาวจากแป้งข้าวเหนียวผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์	63
4.2 แสดงความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัดเส้นใยสับประรดในแต่ละสูตร	67
4.3 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่น(N/mm^2) มอดุลัสแตกร้าว(N/mm^2) และค่าความแข็งกด (hardness)	68
4.4 แสดงพิกัดสำคัญของหมู่ฟังก์ชันในรูป 4.9-4.12	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของแผ่นขึ้นไม้อัด	3
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส	8
2.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส	9
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส	10
2.5 โครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของลิกนิน	11
2.6 ใบและผลสืบประรด	12
2.7 แสดงลักษณะและโครงสร้างของใบสืบประรด	13
2.8 ระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งในฝรั่ง	15
2.9 โครงสร้างของอะมิโลส	16
2.10 ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารอินทรีย์	17
2.11 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส	18
2.12 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินและไขมัน	18
2.13 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน	19
2.14 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลส และทำการแยกสารด้วยโครมาโทกราฟีแบบการจำเพาะขนาดด้วยคอลัมไทโยเพิร์ล (Toyopearl HW55S และ Toyopearl HW50S)	20
2.15 การกระจายตัวของสายโซ่ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลสและทำการแยกด้วยโครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุ	20
2.16 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A , B และ C	21
2.17 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายผลึกและส่วนอสัณฐาน 1 = ส่วนผลึก , 2 = ส่วนอสัณฐาน	22
2.18 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทิน ในบริเวณสาย A และสาย B1	22
2.19 การจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกทินภายในวงแหวน	23
2.20 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งจากธัญพืช	24
2.21 โครมาโทแกรมของแป้งมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50	26
2.22 รูปแบบการพองตัวของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวฟ่างและแป้งไมโล	30
2.23 รูปแบบการละลายของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวฟ่างและแป้งโล	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวฟ่างและแป้งโมลโต	31
2.25 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง	34
2.26 รูปแบบความหนืดของแป้งสูกชนิดต่างๆ เมื่อแบ่งตามกำลังการพองตัว	35
2.27 จุดที่สำคัญในการวัดโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ อะมิโลกราฟ	37
2.28 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	38
2.29 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	40
2.30 ระยะในการเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้ง	41
2.31 %การเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด	42
2.32 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลัง กับน้ำ	44
2.33 กลไกการคืบตัวของแป้ง	45
3.1 แสดงขั้นตอนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด	56
3.2 เส้นใยสับปรัดจากการเตรียมแบบแห้ง	57
3.3 เครื่องผสม	58
3.4 เครื่องอัดขึ้นรูป	59
3.5 แสดงตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของขึ้นทดสอบ	60
3.6 การทดสอบหามอดุลัสแตกร้าวและมอดุลัสยืดหยุ่น	61
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของกาวจากแป้งข้าวเหนียว กับปริมาณแป้งผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์	64
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของกาวจากแป้งข้าวเหนียว กับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์	64
4.3 แสดงลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้ง	65
4.4 แสดงหมู่คาร์บอกซิล(carboxyl) และหมู่คาร์บอนิล(carbonyl) ในโมเลกุลของแป้ง	66
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (N/mm ²) ของแผ่นใยไม้อัด กับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสแตกกร้าว (N/mm^2) ของแผ่นใยไม้อัดกับกาวแบ่งข้าวเหนียวผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์	70
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น(N/mm^2) กับความหนืดของกาวแบ่งข้าวเหนียวผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์	70
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของแผ่นใยไม้อัด กับกาวแบ่งข้าวเหนียวผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์	71
4.9 แสดง FTIR Spectrum ของแบ่งข้าวเหนียว	72
4.10 FTIR Spectrum ของกาวแบ่งข้าวเหนียว 10 กรัม ผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 , 10 กรัม	72
4.11 FTIR Spectrum ของกาวแบ่งข้าวเหนียว 20 กรัม ผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 , 10 กรัม	73
4.12 FTIR Spectrum ของกาวแบ่งข้าวเหนียว 30 กรัม ผสม ไซเตียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 , 10 กรัม	73
4.13 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยสับปะรด กับกาวแบ่งข้าวเหนียว 10 กรัม ผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 และ 10 กรัม	74
4.14 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยสับปะรด กับกาวแบ่งข้าวเหนียว 20 กรัม ผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 และ 10 กรัม	75
4.15 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยสับปะรด กับกาวแบ่งข้าวเหนียว 30 กรัม ผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 และ 10 กรัม	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด (Partical board) หรือแผ่นใยไม้อัด (Fiberboard) นิยมใช้กาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ และกาวฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ แต่มีปัญหาเนื่องจากการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ตกค้างอยู่ในชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการกำจัดสารพิษจากวัสดุธรรมชาติ เช่น แปะ เนื่องจากแปะดิบจะไม่ละลายน้ำขณะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีนซ์ เพราะมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิสารผสมน้ำแปะเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแปะเกิดการพองตัวทำให้ละลาย ความหนืดเพิ่มขึ้นและใสขึ้น ซึ่งจากสมบัตินี้เองจึงนำกาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์มาเป็นสารยึดติดในแผ่นใยไม้อัด เพื่อปรับปรุงพัฒนาพอลิเมอร์คอมพอสิตใช้ในงานโครงสร้างและงานเฟอร์นิเจอร์ต่อไป

นอกจากนี้ ยังได้มีการเลือกใช้เส้นใยใบสับปะรดเป็นเส้นใยธรรมชาติของแผ่นใยไม้อัดด้วย เนื่องจาก ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกสับปะรดในรูปสับปะรดกระป๋อง เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์หลัก เกษตรกรจึงมีความนิยมในการปลูกสับปะรดกันสูงขึ้น ทำให้เกิดปัญหาของใบสับปะรดที่เหลือทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งไม่เกิดประโยชน์ใดๆและไม่ก่อให้เกิดรายได้แก่เกษตรกร จึงได้มีการคิดค้นที่จะนำเอาใบสับปะรดเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น การนำมาทำเป็นเส้นใยถักทอเสื้อผ้า การนำมาทำกระดาษ เป็นต้น และเนื่องจากใบสับปะรดมีเส้นใยที่ค่อนข้างเหนียว จึงน่าจะมีความสามารถในการรับแรงได้ดี ในงานวิจัยนี้จึงนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นใยไม้อัด

การนำเอาแปะดิบเหนียวและใบสับปะรดมาประยุกต์ใช้ จะช่วยในการลดปัญหาขยะใบสับปะรด และเพิ่มมูลค่าให้กับแปะดิบเหนียวที่มีการผลิตออกมามากมาย อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งและชิ้นงานที่ได้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นการช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรในอนาคตอีกด้วย

วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้คือ การเตรียมและทดสอบสมบัติของแผ่นใยไม้อัดซึ่งทำจากเส้นใยของใบสับปะรดที่มีการผสมกาวที่เตรียมจากแปะดิบเหนียว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการเตรียมแผ่นใยไม้อัดที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์จากใบสับปะรดด้วยกาวจากแป้งข้าวเหนียว

1. เพื่อพัฒนาการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์
2. เพื่อพัฒนาพอลิเมอร์คอมพอสิตเพื่อใช้ในงานโครงสร้างและงานเฟอร์นิเจอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด ที่ใช้เส้นใยจากใบสับปะรดเป็นส่วนเสริมแรงในแผ่นใยไม้อัดและกาวแป้งข้าวเหนียวเป็นสารยึดติด และศึกษาเปรียบเทียบถึงสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมได้ รวมทั้งสมบัติของกาวแป้งข้าวเหนียวที่เตรียมได้ และทำการขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานที่มีความหนาแน่น 0.6 g/cm^3 ศึกษาสมบัติทางเคมีของกาวด้วย FTIR SPECTRUM

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

1. เตรียมแผ่นใยไม้อัดจากเส้นใยสับปะรดกับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมไซเตียมไฮดรอกไซด์
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีของกาวที่เตรียมได้และสมบัติเชิงกลของแผ่นใยไม้อัด
3. สรุปผลการทดลอง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดปริมาณขยะและเพิ่มมูลค่าให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือใบสับปะรด โดยดัดแปลงมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด
2. ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยสับปะรด ต่อสารยึดติดที่ทำให้ได้แผ่นใยไม้อัดที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดี
3. เพื่อเป็นแนวทางให้โรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นใยไม้อัด ผลิตแผ่นใยไม้อัดจากวัสดุที่มีในประเทศและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

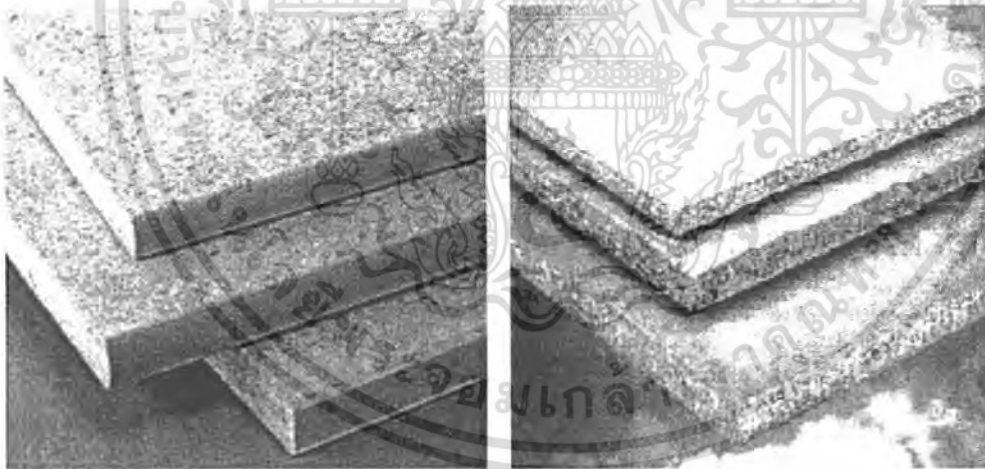
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความหมายของแผ่นซีเมนต์อัด (Particle board) [1]

แผ่นซีเมนต์อัด (Particleboard, PB) หมายถึง แผ่นไม้ประกอบ (Wood Composites) ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตมาจากการนำเอาวัสดุที่ทำจากไม้หรือวัสดุที่มีเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักมาตัดท่อนเป็นชิ้นเล็กๆแล้วนำมาวมกันเป็นแผ่นโดยใช้ตัวประสานอินทรีย์เช่น กาวสังเคราะห์เชื่อมให้ติดกันเกิดเป็นขบวนการเชื่อมยึดกันระหว่างชิ้นวัสดุภายใต้ความร้อนและแรงอัดและยังสามารถใช้สารเติมแต่งอื่นๆ ผสมลงในแผ่นเพื่อให้เกิดคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ ด้วย ความแตกต่างของแผ่นซีเมนต์อัด และ แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboard, MDF) ก็คือลักษณะของไม้ในแผ่นใยไม้อัด (Fiberboard,FB) จะเป็นเส้นใยไม้ระหว่างเส้นใยไม้จะเชื่อมติดกันด้วยกาว สำหรับแผ่นซีเมนต์อัดจะประกอบด้วยชิ้นไม้แล้วใช้กาวเชื่อมยึดติดระหว่างชิ้นไม้ให้เป็นแผ่นขึ้นมา ชิ้นไม้ที่สามารถใช้ทำแผ่นซีเมนต์อัดได้ คือ ซีเลื่อยจนถึงเกล็ดไม้(Flake) ที่มีความยาวถึง 3 นิ้ว



รูปที่ 2.1 ลักษณะของแผ่นใยไม้อัด [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ชนิดของแผ่นขึ้นไม้อัด

2.1.1.1 จำแนกชนิดตามวิธีการอัด

ขึ้นไม้ที่ผสมตัวประสานและสารเติมแต่งอื่น ๆ แล้ว จะถูกนำไปทำแผ่นเตรียมอัด (Form mat) เพื่อทำการอัดร้อนต่อไป แรงอัดที่ใช้ในการอัดร้อน มีใช้กันอยู่ 2 ทิศทาง หากใช้แรงอัดให้มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแผ่นซึ่งอาจทำเป็นแผ่นๆ หรือ ทำต่อเนื่อง เรียกแผ่นขึ้นไม้อัดแบบนี้ว่า (Flat-Platen Pressed PB หรือ Mat-Formed PB) เป็นแผ่นขึ้นไม้อัดที่นิยมผลิตกันอยู่ในปัจจุบัน หากให้ทิศทางแรงอัดขนานกับระนาบของแผ่นไปตามความยาวของแผ่น เรียกแผ่นขึ้นไม้อัด แบบนี้ว่า (Extruded PB) แผ่นชนิดนี้จะอัดออกมาตามแบบ แผ่นที่หนามากจะต้องใช้ท่อร้อนกลางแผ่นช่วยให้ความแข็งตัวเร็วขึ้น จึงมีรูปกลมยาวกลางแผ่นขึ้นไม้อัด และมีการผลิตกันน้อย

2.1.1.2 จำแนกตามการใช้งาน

- PB Core Stock เป็นไม้อัดที่ต้องเอาวัสดุมาปิดทับหน้า เพราะมีผิวหยาบมาก และมี Strength ต่ำ
- PB Panel เป็นแผ่นขึ้นไม้อัด ไม่จำเป็นต้องปิดทับหน้า ตัวของมันเองมีความแข็งแรงสวยงาม เช่น Flakeboard เซฟวิงบอร์ด
- PB Floor Underlayment เป็นวัสดุที่รองพื้นชั้นล่างแล้วมีพวกปาแก้ปิดทับอีกที่ทำให้พื้นมีระดับสม่ำเสมอ
- Prefinished PB เป็น PB แบบแต่งสำเร็จมาจากโรงงาน เช่น เคลือบสีสำเร็จ หรือเคลือบสีลายไม้ เพื่อความสวยงาม
- Acoustical PB เป็นแผ่น PB ผลิตในด้านเก็บเสียง โดยเฉพาะพวกนี้ทำมาจากแผ่นไม้อัดเจาะรู หรือ เซาะร่องเป็นร่องลวดลายต่างๆ เพื่อให้มีพื้นที่ดูดซับเสียงได้มากขึ้น

2.1.1.3 จำแนกตามการผลิตและชื่อทางการค้า

Okal Board ในต่างประเทศใช้เรียกชื่อ PB ที่ผลิตด้วย Okal Process เป็นชื่อคนเยอรมัน Novo Board ของอังกฤษ

Novopan ของอเมริกา

Tenex เป็นชื่อการค้าของ Flakeboard ที่ผลิต USA

Lanewood เป็นชื่อการค้าผลิต USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.4 จำแนกตามความหนาแน่นของแผ่นPB ออกเป็น 3 พวก

ในการประชุมวิชาการกรุงเจนีวา จะจำแนกโดยถือความหนาแน่นเป็นหลักเราสามารถแบ่ง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของแผ่นชั้นไม้อัด แบ่งตามลักษณะความหนาแน่น [1]

PB	Density (g/cm ³)
1. Low density (Insulating type)	0.25-0.4
2. Medium density	>0.4-0.8
3. High density (Hard board type)	>0.8-1.2

2.1.1.5 จำแนกตามลักษณะโครงสร้างของแผ่น

แผ่นชั้นไม้อัดชั้นเดียว (Single Layer or Homogenous Particle) หมายถึง แผ่นชั้นไม้อัดที่ทำมาจากชั้นไม้ที่มีลักษณะ และขนาดเหมือนกันมีส่วนผสมของกาวและสารเติมแต่งอย่างเดียวกันตลอดความหนาของแผ่นชั้นไม้อัด

แผ่นชั้นไม้อัด 3 ชั้น (Three Layer Particleboard) หมายถึง แผ่นชั้นไม้อัดที่แบ่งตามลักษณะของชั้นไม้ออกเป็น 3 ชั้น ตลอดความหนาของแผ่นในแต่ละชั้นประกอบด้วยชั้นไม้ที่มีลักษณะ และ ขนาด ตลอดจนส่วนผสมของกาวเหมือนกัน ปกติใช้ชั้นไม้ขนาดเล็กและบาง เป็นชั้นผิวหน้าทั้ง 3 ด้าน ส่วนชั้นไส้ใช้ชั้นไม้หยาบและใหญ่กว่า ไม้ที่ใช้ทำชั้นไส้อาจเป็นชนิดที่ใช้ทำผิวหน้าก็ได้ ปริมาณกาวที่ใช้ผสมผิวหน้าทั้งสองมากกว่าชั้นไส้ เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่สมดุลกัน มีผิวแข็งและแน่นขึ้น

แผ่นชั้นไม้อัดขนาดลดหลั่น (Graduated Particleboard) หมายถึง แผ่นชั้นไม้อัดที่ทำจากชั้นไม้ที่มีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างของแผ่นประกอบด้วยชั้นไม้ขนาดใหญ่ และหยาบกว่าอยู่ตรงแนวกลางแผ่น ตลอดความหนาจากแนวกลางแผ่นชั้นไม้จะมีขนาดลดหลั่นจากใหญ่ไปหาเล็กถึงผิวหน้าทั้ง 2 ข้าง โดยไม่มีการแบ่งชั้นแน่นอน

2.1.2 วัตถุดิบ

วัตถุดิบของแผ่นชั้นไม้อัด คือ ไม้หรือเศษวัสดุเหลือใช้ที่ให้เส้นใย กาวและสารเคลือบกันชื้น แผ่นชั้นไม้อัดที่มีคุณภาพดีจะต้องขึ้นอยู่กับ วัตถุดิบและขนาดขบวนการผลิตที่ปรับปรุงให้เหมาะสมอีกด้วยกาวและสารเคลือบก็มีอิทธิพลกับคุณภาพของแผ่นชั้นไม้อัดเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 ไม้ (Wood) วัสดุไม้ที่ใช้สำหรับการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

ก) ผลิตผลป่าไม้ที่ยังไม่ได้แปรรูป (Unprocessed Forest Products) เช่น ไม้ขนาดเล็กที่ได้จากการตัดสายขยายระยะ (Thinning) และกิ่งก้านที่หนาหรือใหญ่ (Thick branches) ข) เศษไม้ขนาดใหญ่ที่เหลือจากอุตสาหกรรม (Coarse Industrial residues) เช่น ปีกไม้ (Slabs) ขอบไม้ (Edgings) เศษไม้ที่ตัดทิ้งจากโรงเลื่อย (Off cuts from sawmills) ไม้ที่เหลือจากการลอก (Peeler cores) และส่วนเสียที่ถูกตัดทิ้งออกจากการผลิตไม้บาง (Rejects from veneer manufacture)

ค) เศษเหลือขนาดเล็กจากอุตสาหกรรม (Fine industrial residues) โดยเฉพาะขี้กบ (Planer mill shavings) และขี้เลื่อย (Sawdust)

ง) ชิปไม้ หรือ ขึ้นไม้สับ (Wood chips) จากการตัดไม้ด้วยเครื่องตัดไม้

จ) เศษเหลือ เช่น แผ่นไม้ ขอบไม้ หรือเศษไม้ระแนงและส่วนอื่นๆ ที่ถูกตัดทิ้งจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และอุตสาหกรรมอบไม้

2.1.2.2 ลักษณะขึ้นไม้ ที่นำมาใช้ในการผลิตนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน และถูกย่อยด้วยเครื่องจักรที่แตกต่างกันด้วย พอสรุปได้ดังนี้

ชิป (Chips) หรือขึ้นไม้สับ หมายถึง ขึ้นไม้ที่มีขนาดสม่ำเสมอซึ่งได้จากการตัด หรือ คล้ายสับด้วยขวานในเครื่องตัดขึ้นไม้ที่เรียกว่า ชิปปเปอร์ (Chipper) คล้ายกับของอุตสาหกรรมกระดาษ หรือผลิตโดยเครื่องย่อยขึ้นไม้อย่างหยาบที่เรียกว่า Hog หรือผลิตโดยเครื่อง Hammermills เป็นต้น

เกล็ด (Flake) หมายถึง ขึ้นไม้ที่ผลิตขึ้นเป็นพิเศษมีลักษณะบางเรียบมีทิศทางของเส้นไม้ขนานกับผิว ได้จากการใช้มีดตัดในทิศทางขวางเส้น ซึ่งอาจเป็นด้านรัศมี ด้านสัมผัส หรือทำมุมกันระหว่างด้านทั้งสอง (Radially , Tangentially) การตัดลักษณะนี้จะได้ขึ้นไม้ ที่มีความหนาสม่ำเสมอ

เกล็ดใหญ่ (Wafer) หมายถึง ขึ้นไม้ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับ เกล็ด แต่มีความกว้าง และความหนามากกว่า

แถบ (Strand) หมายถึง ขึ้นไม้ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับเกล็ด แต่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และมีความหนาสม่ำเสมอตลอดความยาวของแถบ

ขี้กบ (Planer shaving) หมายถึง ขึ้นไม้ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นขนาดเล็ก มีความหนาไม่เท่ากัน คือ หนาที่ปลายด้านหนึ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งบาง และมีลักษณะเป็นแฉกขนนก และมักจะโค้งงอด้วย ซึ่งได้จากการไสไม้ด้วยเครื่องไสไม้ชนิดหัวตัดหมุน (Rotary cutterhead)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่ง (Splinter or sliver) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมองทางหน้าตัด และมีความยาวตามแนวเส้นไม้น้อยกว่า 4 เท่าของหนา

เม็ด (Granule) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะขี้เลื่อย ซึ่งมีความกว้าง ความยาว และความหนาเกือบเท่ากัน

ฝอยไม้ (Wood wool or excelsior) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะเป็นแถบ แต่มีความยาวกว่า และโค้งงอ ต้องใช้เครื่องชูดเป็นพิเศษ ใช้สำหรับเป็นองค์ประกอบรวมสำหรับแผ่นชิ้นไม้อัดบางประเภท

2.2 กรรมวิธีการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด [1]

การผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด (Particleboard) นั้น นอกจากวัตถุดิบอื่น ได้แก่ ไม้ กาว และสารเติมแต่ง แล้วจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตเพื่อผสมวัตถุดิบทั้งหมดเข้าด้วยกันและก่อเป็นรูปร่างลักษณะแผ่นชิ้นไม้อัดที่มีความแข็งแรงคงสภาพเป็นแผ่นให้ใช้งานได้เป็นระยะเวลาต่างๆ กระบวนการผลิตจึงเป็นหัวใจหลักที่สำคัญที่สุดในการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด

การผลิตแผ่นชิ้นไม้อัดมี 2 ระบบ คือ ระบบการอัดแบบกระทุ้ง (Extrusion) และการอัดแบบอัดราบ (Flat-press) การอัดแบบกระทุ้งมีข้อจำกัดมากมาย เช่น ต้องเลือกวัตถุดิบที่มีสมบัติง่ายต่อการสิ้นไหลของแผ่นงาน ในขณะที่อัดทะลักออกมาจากแบบอัด และให้คุณสมบัติของแผ่นที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องรับแรงทางผิวหน้าของแผ่น นอกจากนี้ยังไม่สามารถผลิตแผ่นในลักษณะ 3 ชั้นที่มีผิวหน้าละเอียดเหมือนของแผ่นชิ้นไม้อัดแบบอัดราบได้ ดังนั้นปัจจุบันจึงหันมาพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ทางการอัดแบบแนวราบทั้งสิ้น เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและเนื้อที่ จึงขอกล่าวเฉพาะกรรมวิธีการอัดแผ่นชิ้นไม้อัดแบบราบเท่านั้น ขั้นตอนหลักๆ ในการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด ประกอบด้วย

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 2.2.1 การเตรียมชิ้นไม้ | (Particle Preparation) |
| 2.2.2 การอบชิ้นไม้ | (Particle Drying) |
| 2.2.3 การคัดแยกชิ้นไม้ | (Particle Classification) |
| 2.2.4 การผสม | (Blending) |
| 2.2.5 การเตรียมแผ่นก่อนอัด | (Mat Formation) |
| 2.2.6 กรรมวิธีการอัด | (Pressing Operation) |
| 2.2.7 การตกแต่ง | (Finishing) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) [2]

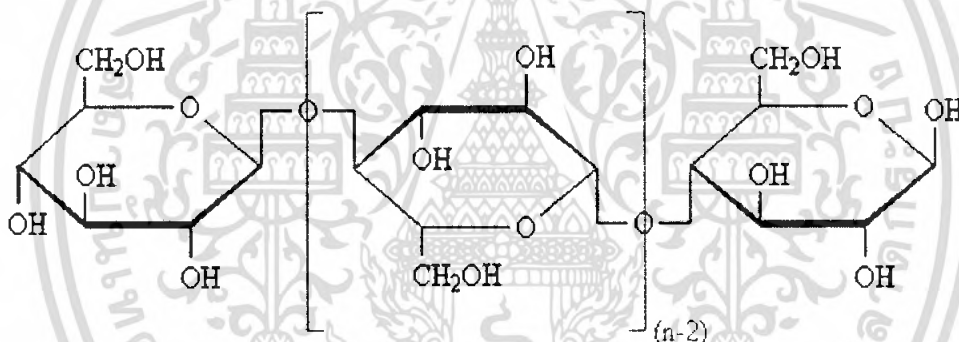
เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติและมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงใช้เป็นสารเติมแต่งประเภทสารตัวเติมและสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เพิ่มปริมาณและลดต้นทุนการผลิต

โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose) [2]

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากที่สุดและพบโดยทั่วไปในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด ปริมาณของเซลลูโลสในพืชต่างชนิดกัน จะมีปริมาณไม่เท่ากัน นอกนั้นเป็นลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

เซลลูโลสเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างประกอบด้วยกลูโคส (Glucose) ประมาณ 10,000 หน่วยต่อกันเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์ ดังรูป 2.2

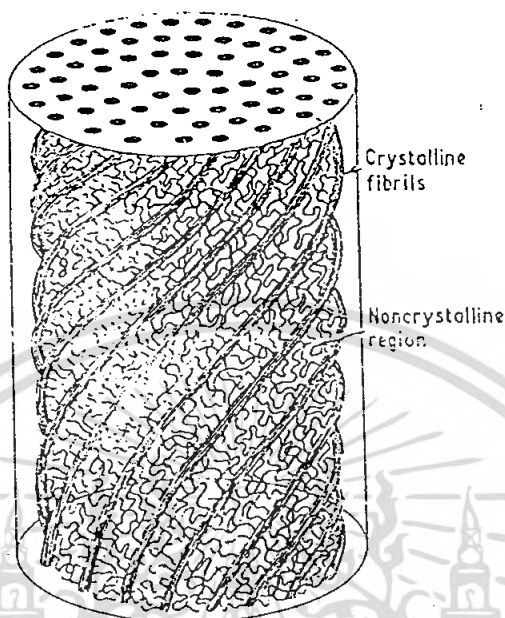


รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส [2]

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส คือ poly(β -1,4-D-anhydroglucopyranose) แต่ละหน่วยของเซลลูโลสเรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose, $C_6H_{10}O_5$) เพราะเกิดการขจัดน้ำออกจากกลูโคส เซลลูโลสธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยแตกต่างกัน เนื่องจากเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ถึง 3 หมู่ จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมาก ประกอบกับการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของหน่วยที่ซ้ำๆ กันในโมเลกุล เซลลูโลสจึงมีปริมาณความเป็นผลึกสูง (Degree of crystallinity) คือมีค่าประมาณร้อยละ 60-80 ทำให้คุณสมบัติหลอมตัวสูงมาก จะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว และมีความสามารถในการละลายต่ำ ทนทานต่อตัวทำละลายและสารเคมี โดยมีสารเคมีที่มีความสามารถละลายเซลลูโลสได้ไม่กี่ชนิด เช่น กรดกำมะถัน (> 68%) กรดเกลือ (> 41%) สังกะสีคลอไรด์ สารประกอบแอมโมเนียมควอเตอร์นารี (Quaternary ammonium compound) สารประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงซ้อนบางชนิด ถ้าเซลลูโลสอยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้วสูงรวมทั้งน้ำจะเกิดการบวม (swell) เล็กน้อยเท่านั้นในแหล่งของโมเลกุลที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous regions)



รูปที่ 2.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส [2]

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1. ความหนาแน่น
ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งแปรตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี
2. การดูดซับความชื้น
เซลลูโลสเป็นของแข็งไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่นๆที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆจนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงดึง
3. การละลาย
เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดแร่เข้มข้น เช่น 72% กรดซัลฟิวริก 40% กรดไฮโดรคลอริก และ 78% กรดฟอสฟอริก เซลลูโลสจะเกิดไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดแร่ที่อุณหภูมิห้องและปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

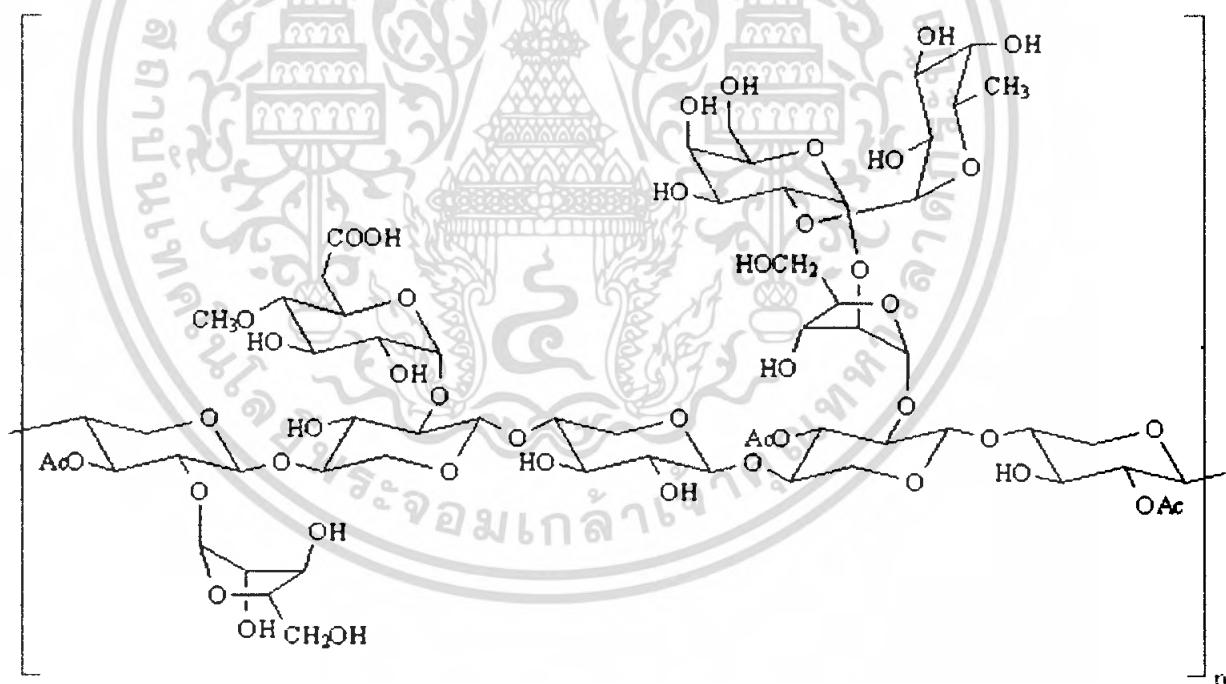
สารละลายเกลือบางชนิดที่เข้มข้น เช่น 72% ซิงค์คลอไรด์ และสารละลายอัลคาไลด์ไฮดรอกไซด์จะทำให้เซลลูโลสบวมและเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆละลายได้

4. ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลสโดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลสความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) [2]

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส (Mannose) ไชโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่น เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกลบ ชังข้าวโพด เฮกซะแซน (Hexosan) สูตรเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_{2n}$ โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.4

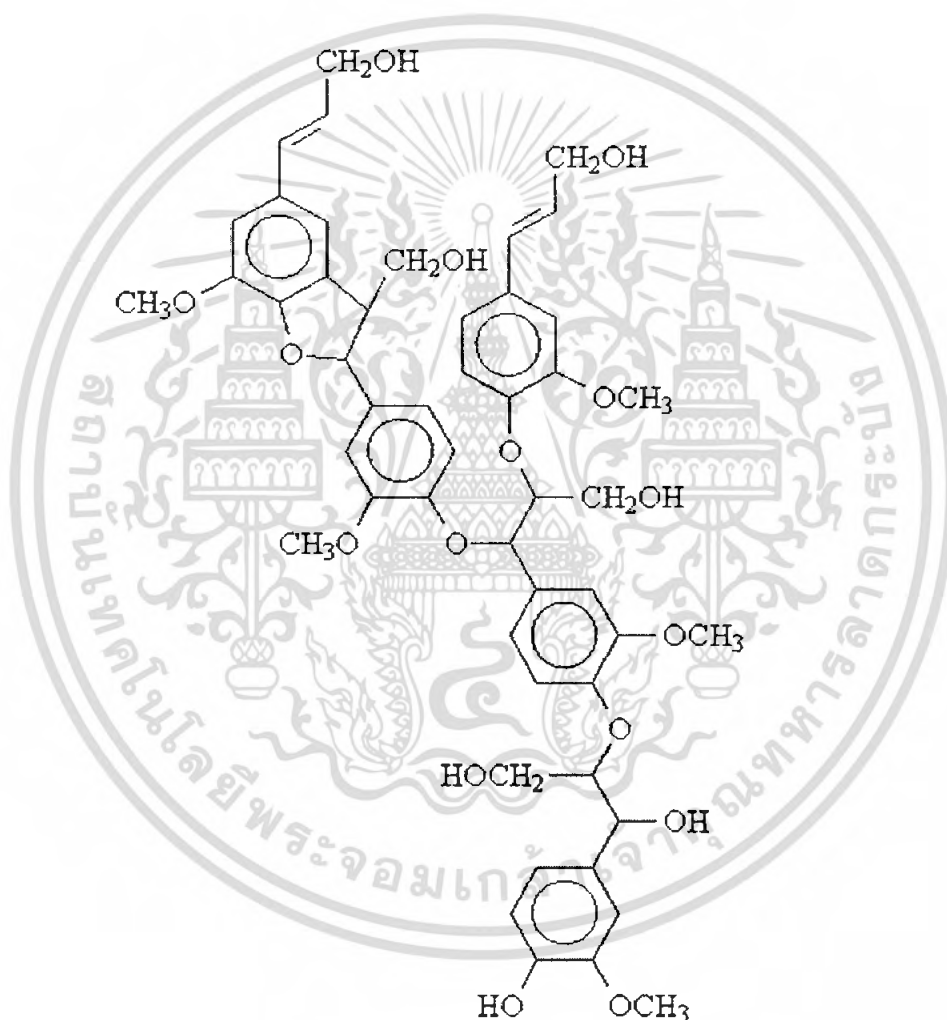


รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ลิกนิน (Lignin) [2]

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (สารที่ประกอบด้วยธาตุ C, H และ O รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติก) ที่รวมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ผนังเซลล์ ผนังของสเกลอแรงคิมาไซเลม เวสเซลและเทรคีด ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น จึงทำให้ต้นไม้หรือพืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงคงทน เมื่อพืชตาย ลิกนินจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือ ลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.5



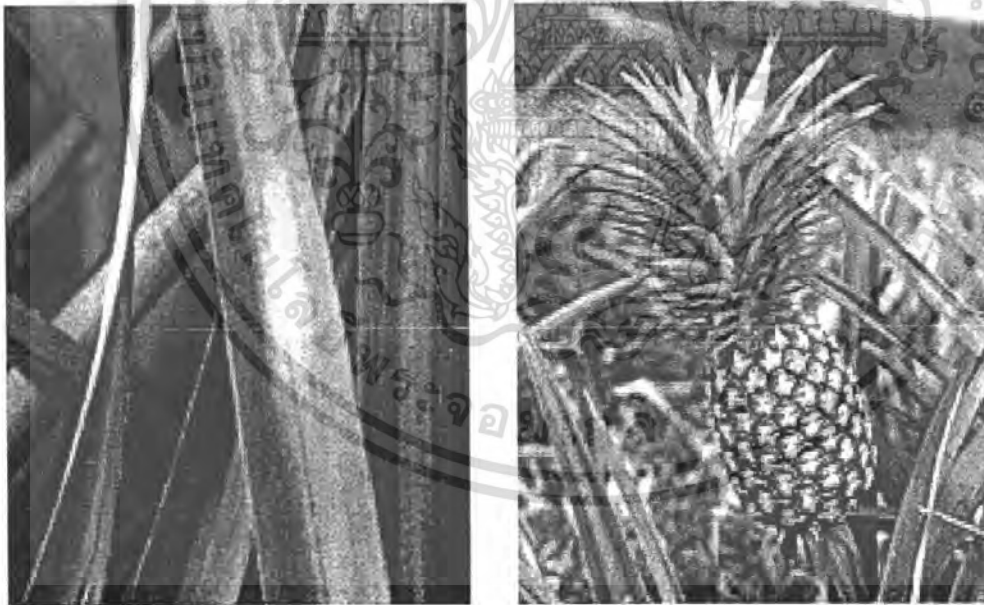
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของลิกนิน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สัณฐานวิทยาของใบสับประรด (Morphology of Pineapple leaf) [4]

สับประรดที่ปลูกร่วมกันอยู่โดยทั่วไปจะใช้ส่วนของลำต้นคือ จุก หน่อ และตะเกียง เป็นส่วนขยายพันธุ์ อายูการให้ผลของสับประรดในประเทศไทยถ้าปลูกร่วมกันจุกจะใช้เวลาประมาณ 15-20 เดือน ผลสับประรดพัฒนามาจากช่อดอกที่เกิดขึ้นที่ปลายยอดของลำต้น เมื่อผลเริ่มพัฒนาไปได้ระยะหนึ่งตาที่อยู่ตามมุมใบของลำต้นจะเจริญเติบโตขึ้นมากลายเป็นหน่อ หลังจากเก็บเกี่ยวสับประรดจากต้นแม่ (plant crop) ไปแล้ว ต้นสับประรดต้นเดิมก็จะเสื่อมโทรมไป หน่อที่เจริญขึ้นมาจากตาตามมุมใบก็จะกลายเป็นสับประรดต้นใหม่ สับประรดที่พัฒนามาจากหน่อบนต้นแม่นี้เรียกว่า สับประรดหน่อรุ่นแรก (first ratoon) ซึ่งเมื่อให้ผลแล้วตาที่อยู่ตามมุมใบของสับประรดหน่อรุ่นแรกก็จะเจริญเติบโตเป็นต้นใหม่ได้อีก เรียกว่าสับประรดหน่อรุ่นที่สอง (second ratoon) การเกิดต้นใหม่แทนกันเช่นนี้จะดำเนินไปได้หลายรอบถ้ามีสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโต

สับประรดที่ปลูกร่วมกันอยู่โดยทั่วไปมีหลายพันธุ์ แต่พันธุ์ที่ปลูกร่วมกันแพร่หลายมากที่สุดคือพันธุ์ปัตตาเวีย ต้นสับประรดที่เจริญเต็มที่แล้วพุ่มใบจะมีความกว้างและความสูงประมาณ 100 เซนติเมตร ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญคือ ราก ลำต้น ใบ ช่อดอก และผล ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะในส่วนของใบสับประรดที่ใช้ทำการศึกษานั้น

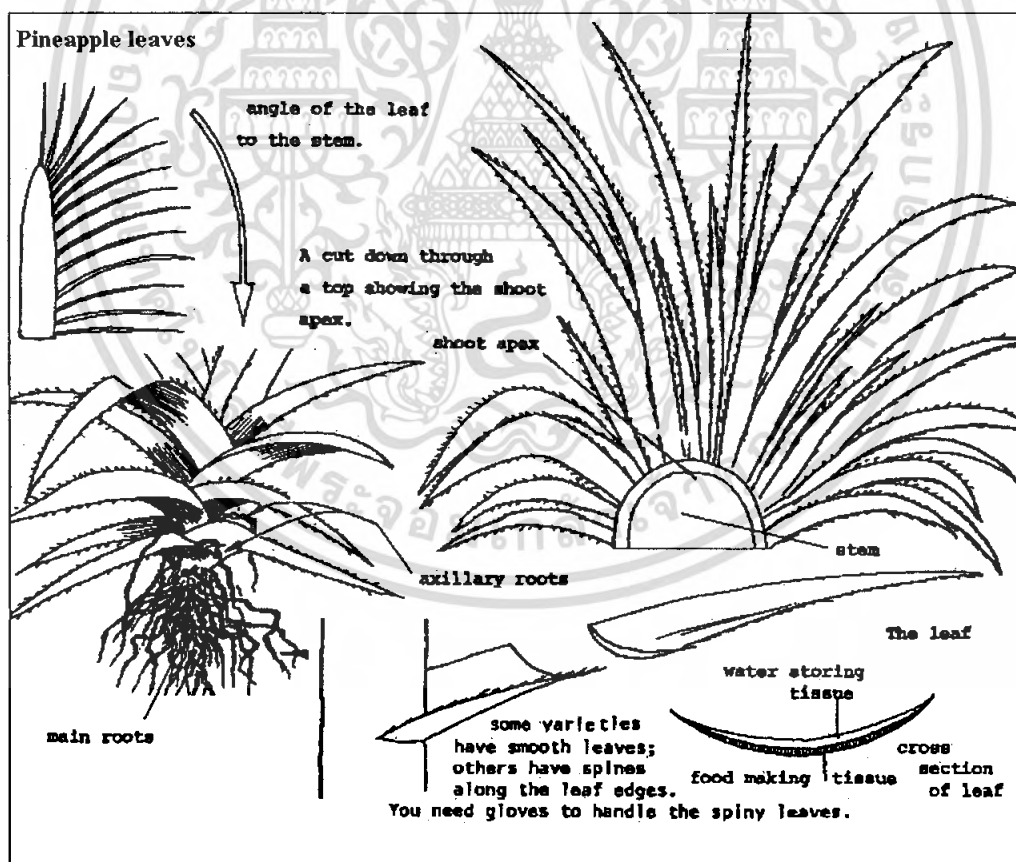


รูปที่ 2.6 ใบและผลสับประรด [4]

ใบมีลักษณะเรียวยาวและเป็นร่องโค้งซึ่งลักษณะเป็นร่องโค้งเช่นนี้ ช่วยให้ใบสับประรดมีความแข็งแรงและทนทานต่อการหักพับได้ดีเป็นพิเศษ การเรียงตัวของใบจะเป็นแบบเวียนรอบลำต้น มีรอบการเรียงตัว (phyllotaxy) เท่ากับ $5/13$ หรือจำนวนใบที่เกิดเวียนรอบลำต้นไปได้ 5 รอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้าง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีจำนวนใบเท่ากับ 13 ใบและใบที่ 14 จะเกิดตรงกับตำแหน่งของใบที่ 1 ลักษณะของใบที่เรียวยาวเป็นร่องโค้งและเรียงตัวเวียนรอบลำต้นสลับปะรดแบบนี้มีความสำคัญในการดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำน้อย ละอองฝนหรือน้ำค้างที่ตกลงมาสัมผัสกับพุ่มใบจะถูกรวบรวมมาไว้ที่ส่วนโคนต้นให้รากในดินหรือรากตามมุมใบใช้ประโยชน์ได้

ใบที่ระดับต่างๆ ของต้นสลับปะรดมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันโดยใบแก่ที่อยู่โคนต้นมีรูปร่างแบบแลนซีโอเลท (lanceolate) มีส่วนคอดที่ใกล้โคนใบ ถัดส่วนคอดนี้ลงไปทางโคนใบจะกว้างขึ้นเรื่อยๆ จนถึงรอยต่อของโคนใบกับลำต้นซึ่งจะเป็นรูปโค้งเว้า ใบอ่อนกว่าที่อยู่ในตำแหน่งที่สูงขึ้นมาบนลำต้น จะเพิ่มความยาวขึ้นเรื่อยๆ และส่วนโคนที่ติดกับลำต้นซึ่งเคยขยายตัวกว้างก็จะค่อยๆ ลดความกว้างลงจนกระทั่งถึงกลุ่มใบที่ยาวที่สุดซึ่งเป็นกลุ่มใบที่กำลังอยู่ในระยะเจริญเต็มที่ทางสรีระ ถัดจากนั้นไปใบอ่อนกว่าที่อยู่สูงขึ้นไปบนลำต้นจะค่อยๆ ลดความยาวลง ส่วนของโคนใบที่เคยขยายตัวกว้างออกจะค่อยๆ แคบเข้า พื้นที่บริเวณโคนใบส่วนหนึ่งจะมีสีเขียวซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีคลอโรฟิลล์ ในใบแก่จะมีสัดส่วนของพื้นที่โคนใบสีเขาน้อย สัดส่วนของพื้นที่โคนใบสีเขียวจะมีมากขึ้นในใบที่มีอายุน้อย



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะและโครงสร้างของใบสลับปะรด [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sideris, Krauss และ Young [5] ได้แบ่งใบของต้นสับปะรดที่เจริญเติบโตเต็มที่ทางลำต้น ใกล้เคียงระยะออกดอกแล้วออกตามรูปร่าง ตำแหน่งของใบบนลำต้น และอายุของใบ ออกเป็นกลุ่มต่างๆ ดังนี้คือ:

A-leaves เป็นกลุ่มของใบซึ่งอยู่ล่างสุดของลำต้น มีอายุมากที่สุด ส่วนของปลายใบเริ่มแห้งและไม่มีความสำคัญในด้านการสร้างอาหารจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงแล้ว

B-leaves เป็นกลุ่มใบที่อยู่ถัดขึ้นมา แก่เต็มที่แล้ว มีส่วนในการสร้างอาหารให้ต้นสับปะรดได้บ้างเล็กน้อย

C-leaves เป็นกลุ่มใบที่เจริญเต็มที่แล้วยังสามารถสร้างอาหารให้ต้นสับปะรดได้ดีกว่าใบกลุ่ม B

D-leaves เป็นกลุ่มใบที่อยู่ในระยะกำลังเจริญเติบโตทางสีเขียวเต็มที่คือมีกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของต้นสับปะรดสูงสุด มักเป็นกลุ่มของใบที่มีความยาวมากที่สุด และเป็นกลุ่มใบที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สถานะทางสีเขียวที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของต้นสับปะรด เช่นระดับธาตุอาหาร ปริมาณกรดและแป้งที่สร้างขึ้นจากการสังเคราะห์ด้วยแสง และปริมาณ คลอโรฟิลล์ เป็นต้น

E-leaves เป็นกลุ่มใบที่ยังเจริญเติบโตไม่เต็มที่ ใบมีสีอ่อนกว่าใบกลุ่ม D

F-leaves เป็นกลุ่มใบอ่อนที่สุด อยู่บริเวณปลายยอดของลำต้น มีขนาดเล็กที่สุด และมีสีเขียวจาง

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและธาตุที่เป็นองค์ประกอบในใบสับปะรด [5]

Name	Pineapple leaf
Chemical composition (wt% dry) ¹	
Ash	6.04
SiO ₂	1.26
Extractive	6.55
Hemicellulose	63.2
Lignin	18.68
Cellulose	32.16
Elemental composition (wt% dry) ²	
Carbon	48.8
Hydrogen	6.2
Nitrogen	1.1
Oxygen	37.9
Calorific value ³ , kJ/g-dry	19.4

1. TAPPI test method

2. Elemental analyzer; Perkin Elmer, CHN 2400 or AMCO, NA 1500

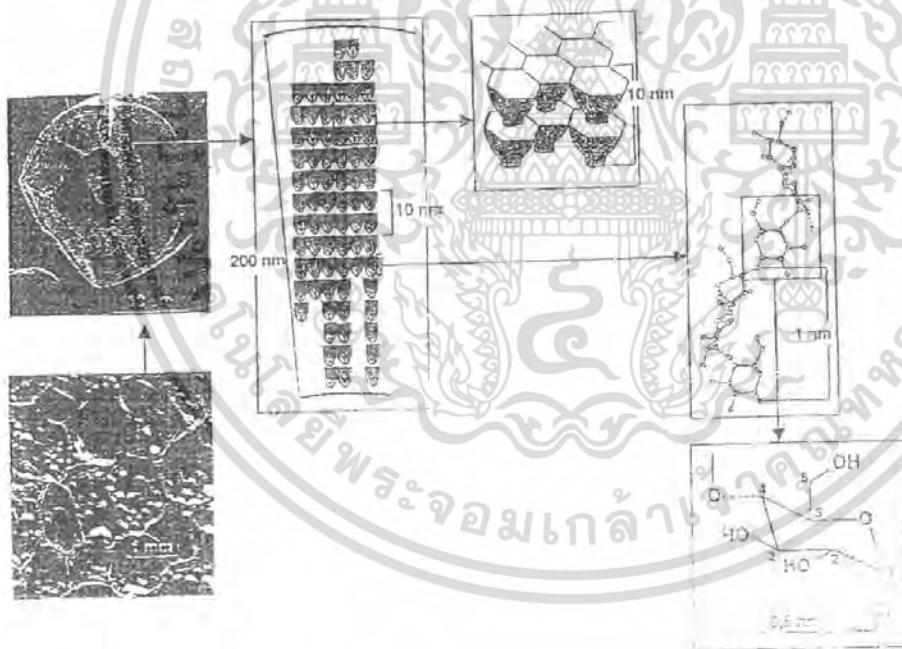
3. Calorie meter; Shimadzu, CA-4P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 แป้ง

2.5.1 องค์ประกอบภายในแป้ง [3]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วาดัวโนแนวร์สมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.8 แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.8 ระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งในฝรั่ง [3]

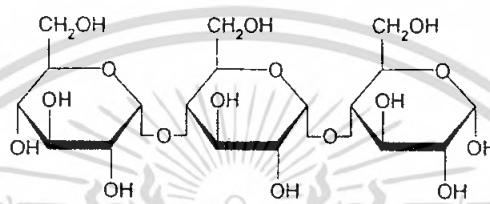
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

1. อะมิโลส (amylose)
2. อะมิโลเพกทิน (amylopectin)
3. สารตัวกลาง (intermediate material)

2.5.1.1 อะมิโลส [3]

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดอัลฟา-1,4 ดังรูปที่ 2.9

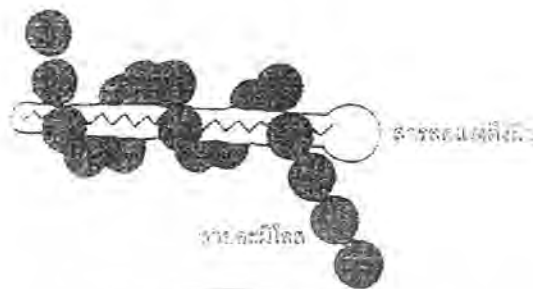


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอะมิโลส [3]

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งในฝรั่ง แป้งสาคุ มีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ไม่มีอะมิโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize) มีอะมิโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งในฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 1000 ถึง 6000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 200 ถึง 1200 หน่วยแป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันลง (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกึ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก คุณสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายๆชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์

ดังภาพที่ 2.10 นอกจากนี้อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส



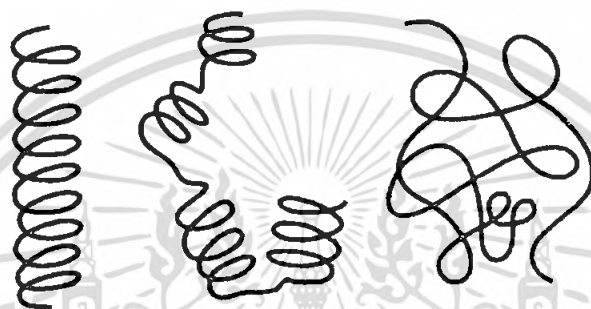
รูปที่ 2.10 ภาพจำลองการจับตัวของอะมิโลสกับสารอินทรีย์ [3]

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [3]

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สายประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สายประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	อัลฟา-1,4	อัลฟา-1,4 และ อัลฟา-1,6
ขนาด	200-2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

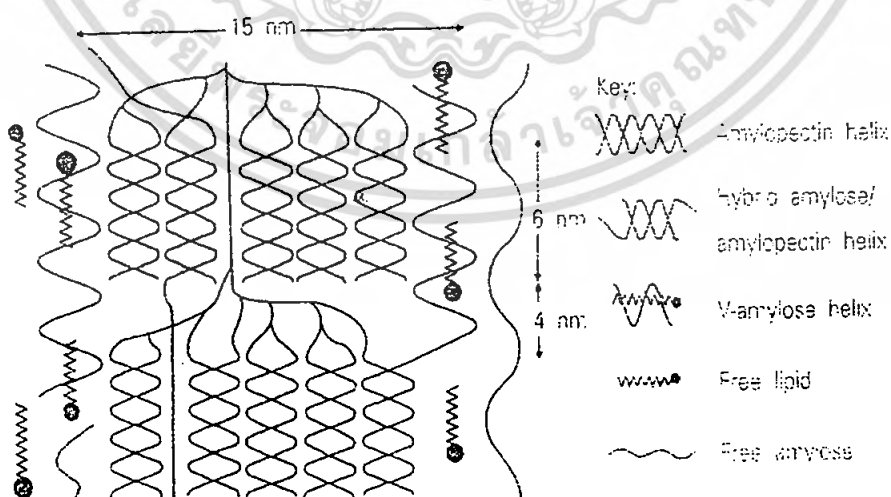
ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสภาพพันธะของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ในทั้งส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) ในแป้งสาลีพบอะมิโลสอยู่ในส่วนอสัณฐาน ในแป้งในฝรั่งพบอะมิโลสอยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินในส่วนผลึก การศึกษาการเกิดเจลาตินในซอสของแป้งมันฝรั่ง พบอะมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดมากกว่าที่อยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ในกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง จากการศึกษาคลอสมิงของอิมิโลสและอะมิโลเพกทินจากแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่ง พบว่าอะมิโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของอะมิโลเพกทินมากกว่าที่จะรวมกันเป็นกลุ่ม

โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) ดังรูปที่ 2.9 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลอีกด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6500 ถึง 160000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 หรือมากกว่า 160000 จะมีโมเลกุลม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



รูปที่ 2.11 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส [3]

แบบจำลองของโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทิน และไขมัน (monoacyl lipid) ในส่วนลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.11 อะมิโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินเป็นเกลียวคู่ (double helix)

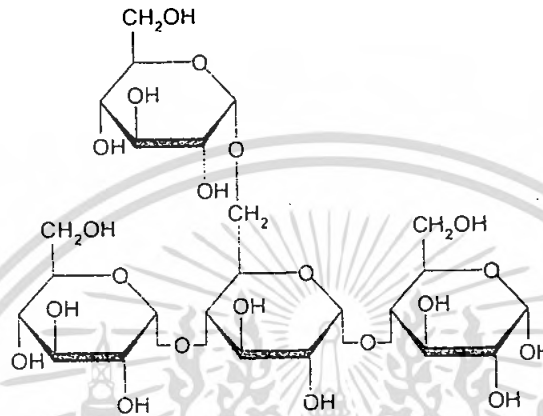


รูปที่ 2.12 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินและไขมัน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 อะมิโลเพกทิน [3]

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด อัลฟา-1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด อัลฟา-1,6 ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน [3]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด อัลฟา-1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่าของอะมิโลส คือประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

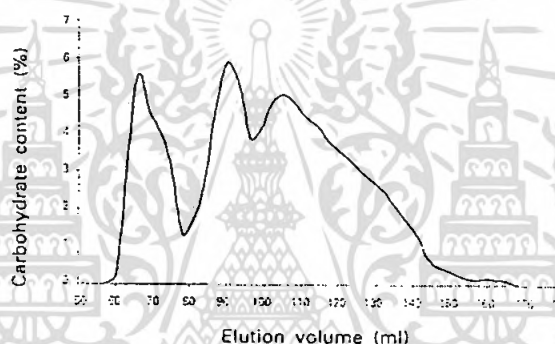
ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ

- 1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched strure)
- 2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และ B ในอัตราส่วน 0.8 – 0.9 : 1
- 3) สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

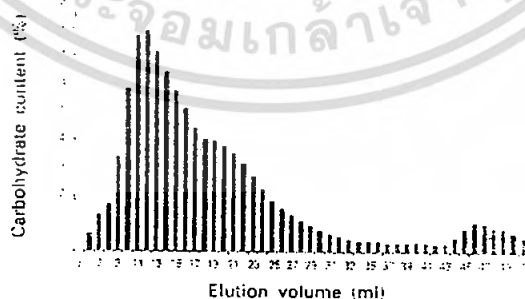
เมื่อนำอะมิโลสและอะมิโลเพกทินมาย่อยเอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) เช่นไอโซอะมิเลส (isoamylase) และพุลูลานเนส (pululanase) เป็นต้น และนำไปแยกโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดแบบการจำเพาะขนาด (size exclusion chromatography) พบว่า โครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขนาดต่างๆกัน 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับไอโอดีน (ค่าความยาวคลื่นสูงสุด และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน) ได้แก่ส่วนที่ 1(Fraction I) ส่วนที่ 2 (Fraction II) และส่วนที่ 3 (Fraction III) (รูปที่ 2.14) โดยส่วนที่ 1 จะประกอบด้วยอะมิโลส ในขณะที่ส่วนที่ 2 และ 3 เป็นส่วนของอะมิโลเพกทินที่มีขนาดความยาวสายต่างกัน ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยสาย B ที่มีขนาดยาว (long B chain) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลประมาณ 45 หน่วย และส่วนที่ 3 ประกอบด้วยสาย B ที่มีขนาดสั้น และ สาย A (Short B และ A chain) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลประมาณ 15 หน่วย เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างละเอียดของอะมิโลเพกทิน โดยการย่อยอะมิโลเพกทินด้วยเอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่งและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบการแลกเปลี่ยนประจุแอนไอออน (Anion-Exchange Chromatography) พบว่า ขนาดของสายโซ่ในโครงสร้างอะมิโลเพกทินจะมีตั้งแต่ขนาดโมเลกุลเล็ก (DP 6) จนถึงขนาดโมเลกุลใหญ่ (DP 50-60) ดังรูปที่ 2.15



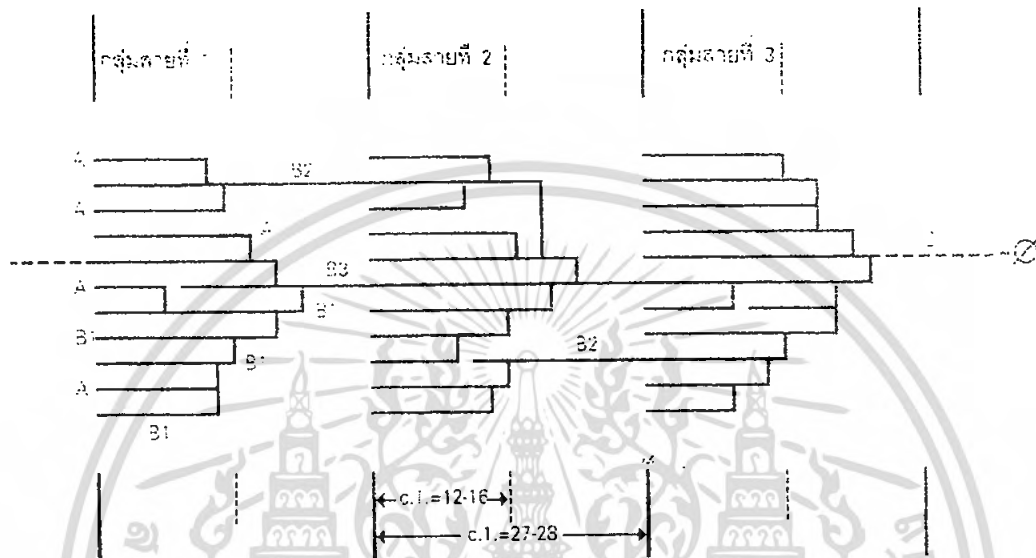
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลส และทำการแยกสารด้วยโครมาโทกราฟีแบบการจำเพาะขนาดด้วยคอลัมน์โทโยเพิร์ล (Toyopearl HW55S และ Toyopearl HW50S) [3]



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของสายโซ่ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลสและทำการแยกด้วยโครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุ [3]

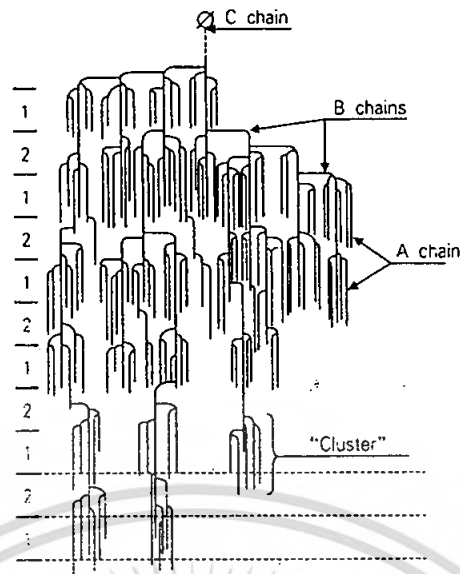
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะมิโลเพกทินดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีอัตราส่วนของสาย A และสาย B เท่ากับ 0.8-0.9 : 1 และมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการย่อยของอะมิโลเพกทิน จากโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน ลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไปทำให้เกิดเป็นกลุ่มสาย 2 และ 3 กลุ่ม ตามลำดับ โดยสาย A B1 และ B2 จำมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 6-12, 13-24 และ 25-45 ตามลำดับ



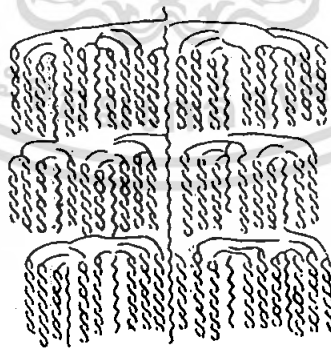
รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A , B และ C [3]

ขนาดของอะมิโลเพกทินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้จะอยู่รวมตัวกันเป็นก้อน ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะมิโลเพกทินโดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) และเบต้าอะมิเลส (β -amylase) ย่อยอะมิโลเพกทินจากมันฝรั่ง แสดงโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน ดังรูปที่ 2.17 ส่วนที่ 1 แสดงถึงส่วนผลึก (crystallite region) ส่วนที่สองที่เป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อม แสดงถึงส่วนอสัณฐาน (amorphous region)



รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายผลึกและส่วนอสัณฐาน
1 = ส่วนผลึก , 2 = ส่วนอสัณฐาน [3]

สำหรับอะมิโลเพกทินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80 - 90 % ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆและที่เหลืออีก 10 - 20 % จะเป็นส่วนที่เชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบด้วยสายประมาณ 22 - 25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับตัวกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกทินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์ ลักษณะโครงสร้างที่เป็นเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินบริเวณสาย A และสาย B1 แสดงดังรูปที่ 2.18

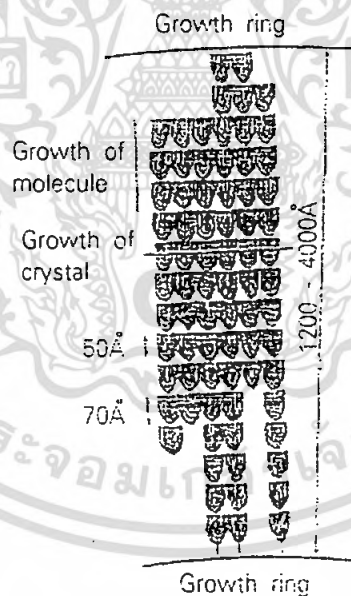


รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทิน ในบริเวณสาย A และสาย B1 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวัลเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

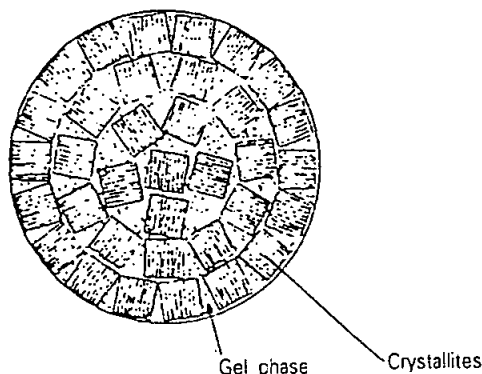
ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน (growth ring) หนาแน่น ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) ลักษณะเม็ดแป้งที่เป็ยกและสดจะสังเกตเห็นวงแหวนได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษา (Canna) ที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็นวงแหวนได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบวงแหวนสำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์และแป้งเจ้าจะสังเกตได้ยากจากกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือเอนไซม์ และศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอน จากโครงสร้างของวงแหวน ดังรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วนปลายที่มีหมูรีดิวซิง (reducing end) ของโมเลกุลแป้ง มีส่วนปลายที่ไม่มีหมูรีดิวซิง (non-reducing end) ของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะมิโลเพกทินอยู่ในส่วนอสังฐานและสายอยู่ในส่วนผลึก



รูปที่ 2.19 การจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกทินภายในวงแหวน [3]

แบบจำลองของเม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยอะมิโลเพกทิน แสดงดังรูปที่ 2.20 ในแบบจำลองนี้แสดงถึงลักษณะเกลียวม้วนคู่ของอะมิโลเพกทินที่รวมกันเป็นผลึก รวมทั้งส่วนของอะมิโลเพกทินที่อยู่อย่างอิสระหรืออยู่ร่วมกับไขมันในลักษณะเป็นเกลียวซึ่งจะพบในแป้งจากธัญพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งจากธัญพืช [3]
ปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.4
ตารางที่ 2.4 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด [3]

	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าว เหนียว
อะมิโลส (%น้ำหนักแห้ง)	21	28	28	17	0
อะมิโลเพกทิน (%น้ำหนักแห้ง)	79	72	72	83	100
ขนาดโมเลกุล (DP) ของอะมิโลส (หน่วยน้ำตาลกลูโคส)	3000	800	800	3000	-
ขนาดโมเลกุล (DP) อะมิโลเพกทิน (หน่วยน้ำตาลกลูโคส)	2×10^6	2×10^6	2×10^6	2×10^5	2×10^6
จำนวนโมเลกุลอะมิโลส ($\times 10^{20}$) ในแป้ง 1 กรัม	30	130	130	20	0
จำนวนโมเลกุลอะมิโลเพกทิน ($\times 10^{17}$) ในแป้ง 1 กรัม	150	130	130	150	190
สัดส่วนจำนวนโมเลกุลของ อะมิโลสต่ออะมิโลเพกทิน	200	1000	1000	150	0
ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ยของ โมเลกุลแป้ง (หน่วยน้ำตาลกลูโคส)	14000	3000	3000	18000	2000000

อะมิโลเพกทินถือว่ามีค่าความสำคัญมากกว่าอะมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะมิโลเพกทินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 แบ่งจากข้าวโพดสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสสูงถึง 70 % คือ ข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize) และสายพันธุ์ที่ไม่มีอะมิโลส คือ ข้าวโพดเหนียว (Waxy maize)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของแบ่งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน [3]

ชนิดแบ่ง	ปริมาณอะมิโลส (%)	คุณสมบัติ
ข้าวเหนียว	0 – 1	แบ่งเปียกใส มีการคืนตัวหลังสุก (setback) น้อย ไม่เกิดเจล และเจลมีการสูญเสียน้ำ (syneresis) น้อย ยืดหยุ่นได้
ข้าวโพด (mize)	27	เกิดเจลที่แข็งแรง แบ่งเปียกขุ่น
ข้าวโพดอะมิโลเมส	50 – 70	เม็ดแบ่งพองตัวได้ยาก เกิดเจลที่แข็ง แบ่งเปียกขุ่น อุณหภูมิการเกิดแบ่งเปียกสูง

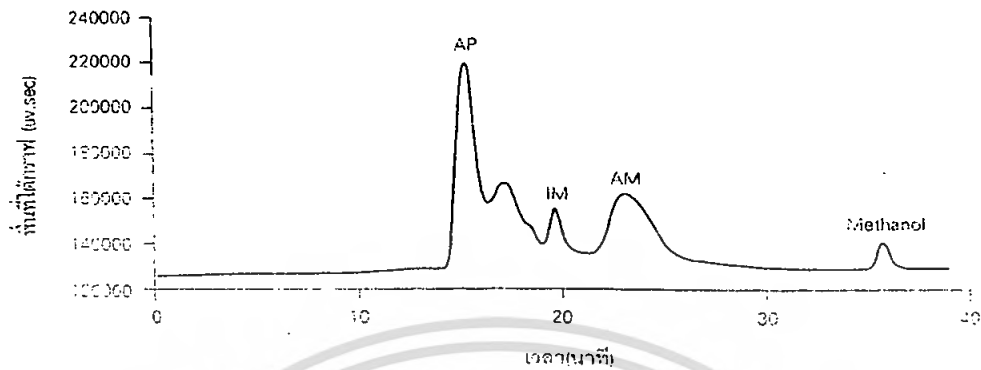
2.5.1.3 สารตัวกลาง [3]

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแบ่งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทิน แต่ใหญ่กว่าอะมิโลเพกทิน และเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (^{13}C Nuclear Magnetic Resonance) พบว่าสารตัวกลางในแบ่งสาละจะมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับอะมิโลเพกทินแต่มีกิ่งที่สั้นกว่า นอกจากนี้มีรายงานว่าสารตัวกลางในแบ่งข้าวโอตสามารถเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะมิโลส แต่มีค่าสัมพรรคภาพไอโอดีน (iodine affinity) และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน (blue value) ต่ำกว่าอะมิโลสแต่มากกว่าค่าของอะมิโลเพกทิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช จากการศึกษาการตรวจสอบองค์ประกอบของแบ่งมันสำปะหลังโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบการจำเพาะขนาดสามารถแยกองค์ประกอบของแบ่งตามน้ำหนักโมเลกุลได้ 3 ส่วน คือ อะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลาง โดยองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะออกจากเครื่องโครมาโทกราฟีก่อน ปรากฏเป็นพีคบนโครมาโทแกรมที่เวลาน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.21 ปรากฏพีคของอะมิโลเพกทิน สารตัวกลาง และอะมิโลส สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลจากมากไปน้อยตามลำดับ อย่างไรก็ตาม มีบางรายงานกล่าวว่า สารตัวกลางที่พบในแบ่งอาจเป็นผลมาจากวิธีที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบของแบ่ง

ปริมาณหรือสัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลางในเม็ดแบ่งไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำฝนระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น จากการตรวจวัดปริมาณและขนาดของอะมิโลสของแบ่งที่สกัดมาจากมันสำปะหลัง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธุ์ ในพื้นที่เพาะปลูกและมีปัจจัยการปลูกเหมือนกัน พบว่าแป้งที่สกัดจากหัวมันสำปะหลังที่มีอายุต่างกันมีปริมาณและขนาดโมเลกุล (DP) ของอะมิโลสที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.21 โครมาโทแกรมของแป้งมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 [3]

ตารางที่ 2.6 ปริมาณอะมิโลสและขนาดโมเลกุลของแป้งที่สกัดจากมันสำปะหลัง 4 พันธุ์ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน [3]

พันธุ์	6 เดือน		10 เดือน		14 เดือน		16 เดือน	
	ปริมาณ อะมิโลส (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)	ปริมาณ อะมิโลส (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)	ปริมาณ อะมิโลส (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)	ปริมาณ อะมิโลส (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)
ระยอง	24.1	1175	23.5	1188	20.6	1148	20.6	1161
ระยอง 60	22.5	1122	20.5	1096	20.7	1035	20.8	1148
ระยอง 90	23.1	1202	21.3	1216	22.3	1122	22.5	1135
เกษตรศาสตร์ 50	21.4	1175	21.5	1161	19.5	1135	19.6	1121

2.5.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเมล็ดแป้ง [3]

ส่วนประกอบอื่นๆภายในเมล็ดแป้ง แป้งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเมล็ดแป้ง สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเมล็ดแป้ง เช่น ไขมันในเมล็ดแป้งจากรังไข่ หมูฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบในโตรเจนในแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้าและ ฟอสเฟต ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.7 ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่าง [3]

ชนิดแป้ง	ความชื้น 65 % RH, 20°C	% ไขมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
แป้งข้าวโพด	13	0.6	0.35	0.1	0.015
แป้งมันฝรั่ง	19	0.05	0.06	0.4	0.08
แป้งสาลี	14	0.8	0.4	0.15	0.06
แป้งมันสำปะหลัง	13	0.1	0.1	0.2	0.01
แป้งข้าวเหนียว	13	0.2	0.25	0.07	0.007
แป้งข้าวฟ่าง	13	0.7	0.3	0.08	ไม่มีรายงาน
แป้งข้าวเจ้า	ไม่มีรายงาน	0.8	0.45	0.5	0.1
แป้งสาคู	ไม่มีรายงาน	0.1	0.1	0.2	0.02
แป้งข้าวโพดอะมิโลเมต	13	0.4	ไม่มีรายงาน	0.2	0.07
แป้งมันเทศ	13	ไม่มีรายงาน	ไม่มีรายงาน	0.1	ไม่มีรายงาน

(1) ไขมัน

โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1 % ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความเหนียวของแป้ง ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งจึงต้องกำจัดไขมันออกจากแป้งโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายหรือย่อยสลายโดยใช้น้ำย่อย

ไขมันภายในแป้งมีทั้งที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) กลูโคลิพิด (glucolipids) ฟอสโฟลิพิด (phospholipid) และไขมันที่อยู่กระจายทั่วไปภายในเม็ดแป้ง โดยเชื่อมพันธะกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวมๆ แป้งจากพืชหัวและกากถั่วไม่มีไขมันภายในเม็ดแป้ง สำหรับแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มีไขมันภายในเม็ดแป้งซึ่งมีสมบัติและปริมาณไขมันที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดมีไขมัน 0.6 ถึง 0.8 % ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ 62 % และไลโซฟอสโฟลิพิด (lysophospholipid) 38 % สำหรับแป้งสาลีมีไขมัน 0.8 ถึง 1.2 % น้ำหนักแห้ง ประกอบด้วย โมโนเอซิลและไลโซฟอสโฟลิพิด (monoacyl/lysophospholipids) 86 ถึง 94 % กรดไขมันที่สำคัญของไลโซฟอสโฟลิพิด คือ กรดไขมันอิมตัวคาร์บอน 16 อะตอม (ลิโนลิอิก, linoleic acid) โมโนเอซิลลิพิดเหล่านี้สามารถจับตัวแข็งซ้อนกับอะมิโลสได้ ในขณะที่ไดเอซิลและไตรเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลลิพิด (diacyl และ triacyl lipid) ไม่สามารถจับตัวเช่นนี้ได้ ความสัมพันธ์ของปริมาณอะมิไลด์กับปริมาณไขมันในข้าวโพดชนิดต่างๆ พบว่า ข้าวโพดเข้าเหนียวซึ่งมีปริมาณอะมิไลด์ต่ำจะมีไขมันต่ำ สำหรับข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิไลด์สูงจะมีไขมันสูงกว่าปกติเช่นกัน ดังตารางที่ 2.8 ตารางที่ 2.8 ปริมาณอะมิไลด์และปริมาณไขมันในข้าวโพดพันธุ์ต่างๆ [3]

	พันธุ์		
	พันธุ์ข้าวเหนียว	พันธุ์ปกติ	พันธุ์อะมิไลด์
ปริมาณอะมิไลด์ (%)	0.2 – 1.5	27 – 31	40 – 47
ปริมาณไขมัน (มิลลิกรัม/กรัมแป้ง)			
-กรดไขมันอิสระ	3 – 13	380 – 546	581 – 681
-ไลโซฟอสโฟลิพิด (Lysophospholipids)	2 – 13	184 – 647	396 – 486

ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้ง โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง เมื่อเกิดฟิล์มและแป้งเปียกหรือเพสต์ (paste) ไขมันจะรวมตัวกับอะมิไลด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฉื่อย (inert complex) ทำให้ฟิล์มหรือแป้งเปียกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่สำหรับไขมันที่รวมตัวเชิงซ้อนกับอะมิไลด์จะไม่ก่อให้เกิดกลิ่น เนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี มีกลิ่นแรงกว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบของไขมันสูง

(2) ไนโตรเจน (โปรตีน)

ภายในแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1 % โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายตัวของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลิตีในซึ่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยามอลลาร์ด (maillard reaction) ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไป (โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเช่นนี้เกิดขึ้นกับแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง)

(3) เถ้า

แป้งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โฟสเฟต เข็มแมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ ปริมาณเก่าในแป้งมันฝรั่งจะสัมพันธ์กับหมู่ฟอสฟอรัสในแป้ง สำหรับในแป้งจากธัญพืช จะสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอลิพิด

(4) ฟอสฟอรัส

แป้งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า 0.1 % โดยแป้งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสอยู่ในรูปฟอสฟอลิพิด (phospholipid) ประมาณ 0.02 ถึง 0.06 % และสำหรับแป้งจากพืชหัวและราก เช่น แป้งจากมันฝรั่ง มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสประมาณ 0.3 ถึง 0.4 % ฟอสฟอรัสภายในแป้งอยู่ในรูปฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 (C_3 และ C_6) ของหน่วยกลูโคส แป้งมันสำปะหลังมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสจึงทำให้มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบ แรงผลักระหว่างประจุลบจะทำให้แป้งมันฝรั่งมีคุณสมบัติพองตัวง่าย และมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ

2.6 สมบัติของแป้ง

2.6.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย [3]

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% จากการทดลองพบว่าแป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณ 39.9, 42.9, 50.9 และ 51.4 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ

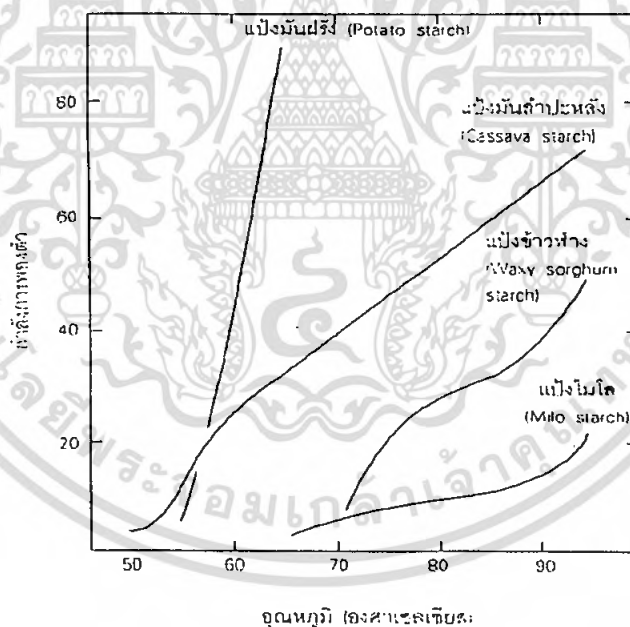
น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (bound water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้นสูงกว่นี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ซโมโนไฮเดรต [$n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)$]

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จะเกิดสีขึ้นในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) ลงไป พบว่าสีจะหายไปอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (molecular sieve) รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจจะมิได้อยู่แล้วในแป้งธรรมชาติแต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

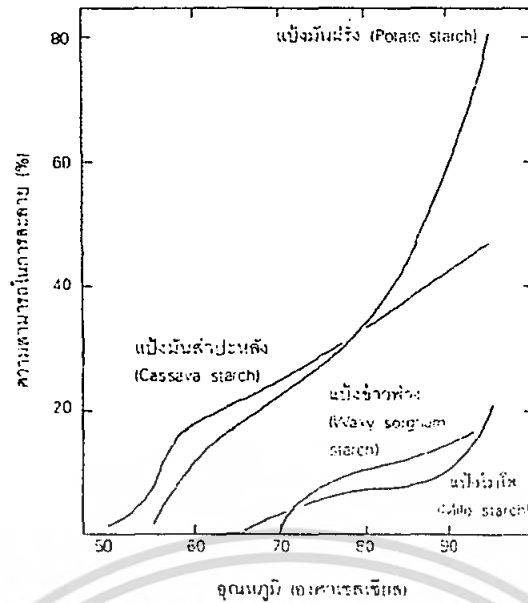
แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งที่อยู่ในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน รูปแบบการพองตัวของแป้งขึ้นกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.22



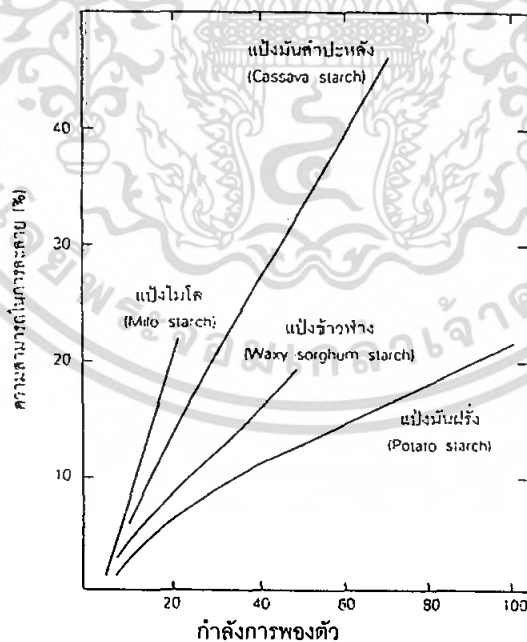
รูปที่ 2.22 รูปแบบการพองตัวของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวฟ่างและแป้งโมลโต และรูปแบบการละลายของแป้งกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.23 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 รูปแบบการละลายของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวฟ่างและแป้งโล [3]

รูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23 มีลักษณะคล้ายกันมาก และเห็นความสัมพันธ์ได้เมื่อเขียนกราฟระหว่างกำลังการพองตัวและการละลายที่อุณหภูมิเดียวกันจะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 2.24 คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95°C แสดงดังตารางที่ 2.9



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวฟ่างและแป้งโมโล [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95°C

[3]

แป้ง	กำลังการพองตัว	การละลาย (%)
มันฝรั่ง	> 1000	82
สาคุ	97	39
มันลำปะหลัง	71	48
พุทธรักษา (Cannal)	72	37
ท้าวยายม่อม (Arrowroot)	54	28
มันเทศ	46	18
ข้าวโพด	24	25
ข้าวฟ่าง	22	22
ข้าวสาลี	21	41
ข้าวเจ้า	19	18
ข้าวโพด	64	23
ข้าวเจ้า, ข้าวเหนียว	56	13
ข้าวฟ่าง	49	19
ถั่ว (Wrinkled pea)	6	19
ข้าวโพดชนิดอะมิโลสสูง (High-amylose corn)	6	12
ถั่วการ์บาโซ (Garbanzo)	13	15

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมีหลายประการ ได้แก่

ก. ชนิดของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบในการพองตัวและการละลายแตกต่างกันเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการพองตัวและการละลายของแป้งแล้ว สามารถแบ่งแป้งออกเป็น 3 ชนิด คือ แป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนราก และแป้งจากส่วนหัว

ก.1 แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึก และบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุดเนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสสูง ซึ่งอะมิโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ทำให้พองตัวได้ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 แป้งจากส่วนรากหรือส่วนกลางลำต้น (pith) เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีการพองตัวเพียงชั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า แป้งจากส่วนรากจะเกิดเจลลาติโนสที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช

ก.3 แป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง จะมีการพองตัวสูงเนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในแป้งมันฝรั่งยังทำให้เกิดการพองตัวสูงขึ้น เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าได้ การพองตัวในแป้งจากส่วนหัวจะเกิดเพียงชั้นเดียว และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ รูปแบบนี้จะเป็นลักษณะของแป้งที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte)

ข. ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง

ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง หรืออีกนัยหนึ่งคือ จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดแป้ง ในระดับโมเลกุลมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจำนวนของพันธะได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบและการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัวและความยาวของสาขาในอะมิโลเพกติน

ค. สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต

สิ่งเจือปนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง เช่น แป้งข้าวโพดที่ถูกสกัดไขมันออกจะมีการพองตัวอย่างอิสระและเป็นรูปแบบเดียวกันดีกว่าแป้งข้าวโพดปกติ เนื่องจากกรดไขมันในธรรมชาติของแป้งข้าวโพดปกติจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้ง โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลส (lipid-amylose complex) นอกจากนั้นการใส่สารลดแรงตึงผิวในแป้งจะมีผลต่อกำลังการพองตัวของเม็ดแป้ง การใส่โพแทสเซียม ปาล์มมิเตท (potassium palmitate) และสเตียเรต (stearate) จะลดกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่การใส่โซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate) และซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyl trimethyl ammonium bromide) จะเพิ่มกำลังการพองตัวของเม็ดแป้ง

ง. คุณสมบัติหลังการดัดแปลงทางเคมี

คุณสมบัติการพองตัวและการละลายของแป้งจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการดัดแปลงทางเคมี การดัดแปลงด้วยกรดหรือการเกิดออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรต์ (hypochlorite) จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดแป้งกระจายออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ การละลายและการพองตัวสูงขึ้น สำหรับการดัดแปลงด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หรืออีเทอร์ฟิเคชัน จะเกิดการแทนที่ของหมู่อื่นภายในโมเลกุลของแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนสต่ำลง การพองตัวเพิ่มขึ้น ขอบเขตในการลดลงของอุณหภูมิเจลลาติโนสและการพองตัวที่เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับการพองตัวและธรรมชาติของหมู่ที่มาแทนที่ การทำครอสลิง (cross linking) จะทำ

ให้ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งเพิ่มขึ้นความสามารถในการพองตัวและการละลายจึงลดลง

จ. ปริมาณที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว

มีผลต่อการพองตัวและการละลาย สารละลายที่มีปริมาณแป้งต่ำกว่า 20% ค่าการละลายสูงกว่าเมื่อมีแป้งสูงกว่า 20% การพองตัวอย่างอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งในสภาพที่สารละลายมีปริมาณน้ำน้อย สารประกอบอื่นๆ เช่น ซูโครส กลูโคส และสารอิเล็กโทรไลต์ (เช่น sodium chloride) มีผลกระทบต่อการทำงานของแป้ง พบว่าเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสและลดปริมาณแป้งลงทำให้สามารถละลายได้เพิ่มขึ้น

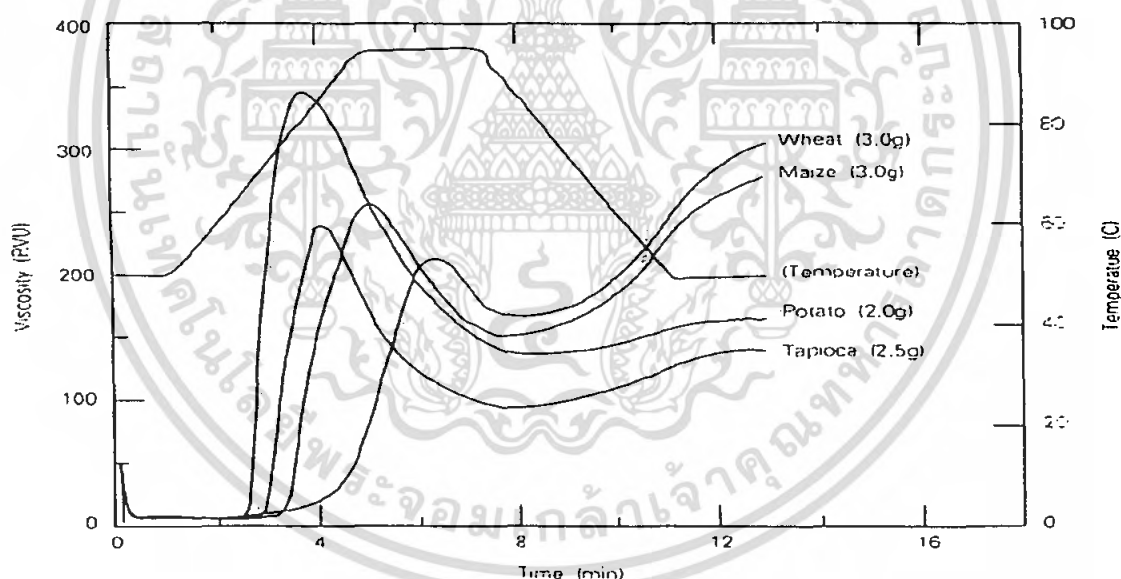
2.6.2 ความหนืด [3]

2.6.2.1 ปัจจัยการเกิดความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง และการดัดแปลงแป้งด้วยวิธีต่างๆ

ก. ชนิดของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติความหนืดแตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.25

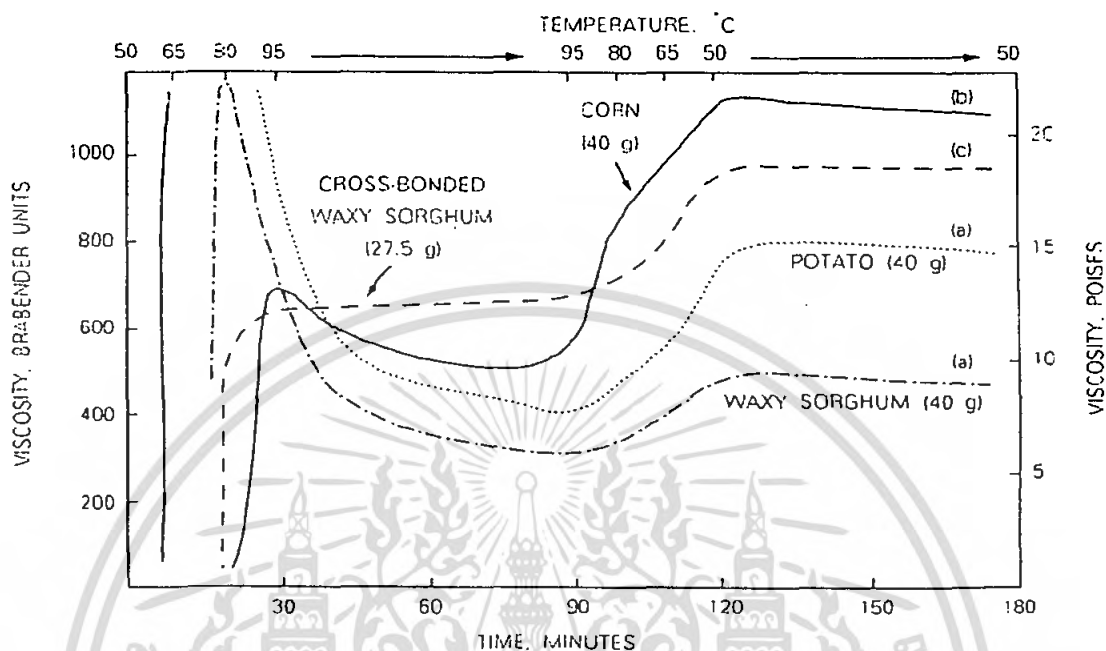


รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง [3]

ความหนืดที่เกิดขึ้นของน้ำแป้ง เมื่อให้ความร้อนและมีการกวนหรือคนอย่างสม่ำเสมอ จากอุณหภูมิ 50°C ไปถึง 95°C และคงที่ที่ 95°C เป็นเวลา 2.5 นาที จึงลดอุณหภูมิลงเป็น 50 °C อีกครั้ง จะเห็นว่าแป้งแต่ละชนิดจะให้ลักษณะ (profile) ของความหนืดแตกต่างกัน โดยวัดจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการแบ่งประเภทของแป้งตามกราฟแสดงความหนืด ตามวิธีของ Schoch และ Maynard สามารถแบ่งรูปแบบความหนืดของแป้งที่วัดด้วยเครื่อง Brabender Viscoamylograph ตามกำลังการพองตัวแป้ง แบบ ดังรูปที่ 2.26 ดังนี้



รูปที่ 2.26 รูปแบบความหนืดของแป้งสูกชนิดต่างๆ เมื่อแบ่งตามกำลังการพองตัว

แบบ a : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวสูง (high-swelling) เช่น แป้งมันฝรั่ง (potato starch) แป้งข้าวฟ่าง (waxy sorghum starch) แป้งจากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนแก่แป้ง เม็ดแป้งจะมีกำลังการพองตัวสูง ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลอ่อนตัวลง เม็ดแป้งกระจายตัวออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ลักษณะกราฟความหนืดจึงสูงขึ้นแล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

แบบ b : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวปานกลาง (moderate-swelling starches) ได้แก่ แป้งจากธัญพืชต่างๆ เม็ดแป้งไม่พองตัวมากถึงขั้นกระจายตัวออกจึงได้ลักษณะกราฟความหนืดที่สูงขึ้นน้อยกว่าและเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่า

แบบ c : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย (restricted-swelling starches) ได้แก่ แป้งจากถั่วต่างๆ และแป้งครอสลิงหรือพันธะข้าม (cross-linked หรือ cross-bond) วิธีครอสลิงทำให้การพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง ทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวมีเสถียรภาพมากขึ้น ลักษณะกราฟความหนืดจึงไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด มีค่าความหนืดสูงจึงอาจจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นระหว่างการต้มสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ d : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก (highly-restricted swelling starches) ได้แก่ แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เช่น แป้งข้าวโพดอะมิโลสซึ่งมีอะมิโลส 50 ถึง 80 % (ไม่มีแสดงในภาพ)

ข. การดัดแปลงแป้ง

- การดัดแปลงโดยวิธีทางกายภาพ เช่น แป้งพรีเจลาทีไนซ์ (pregelatinized starch) สามารถกระจายตัวในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง ให้ความหนืดได้ทันที เหมาะสมในการนำมาใช้ในการผลิตอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส และไส้กึ่งสำเร็จรูปสำหรับอาหารประเภทพายหรือครีมหน้าขนมต่างๆ

- การดัดแปลงด้วยกรดหรือดิวเท็กซ์ไทเซชัน ให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งดิบ เจลที่ได้จะมีลักษณะใสและแข็งกว่าแป้งดิบ ใช้สำหรับผลิตลูกกวาด ทอฟฟี่

- การดัดแปลงแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ได้แป้งเอสเทอร์ เช่น สตาร์ชแอซีเตต (starch acetate) และสตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate monoester) ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบและคงความหนืดไว้ได้ดี มีอุณหภูมิที่เกิดความหนืด (pasting temperature) ต่ำกว่าแป้งดิบ ลักษณะเจลใส คงตัวต่ออุณหภูมิต่ำในสภาวะการคั้นตัวจากการเยือกแข็ง เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง หรืออาหารที่ต้องการความข้นหนืดและต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา

- การดัดแปลงโดยวิธีครอสลิง (cross-linking) แป้งที่สามารถรักษาความหนืดไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง เหมาะสมสำหรับใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋อง ซึ่งต้องการความหนืดต่ำในช่วงแรก เพื่อให้เกิดการนำความร้อนในกระป๋องเป็นไปอย่างรวดเร็ว และใช้เวลาในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์น้อยลงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนืดตามต้องการเมื่อเย็นลง

นอกจากปัจจัยทั้งสองดังกล่าวมาแล้ว ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอันเนื่องมาจากชนิดของแป้ง เมื่อวิเคราะห์ลงในรายละเอียดคือ ขนาดของเม็ดแป้ง ปริมาณอะมิโลส ก็มีผลสำคัญต่อความหนืดกล่าวคือ ขนาดเม็ดแป้งที่ใหญ่ ย่อมมีกำลังการพองตัวสูงและให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ปริมาณอะมิโลสมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรดเดชัน (retrogradation) ถ้าแป้งชนิดใดมีปริมาณอะมิโลสสูงย่อมแสดงค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) สูงด้วยเช่นกัน สำหรับปัจจัยทางภายนอกคือ ถ้ามีการให้ความร้อนสูงหรือมีการใช้แรงกลมาก จะทำให้เม็ดแป้งแตกและค่าความหนืดลดลง

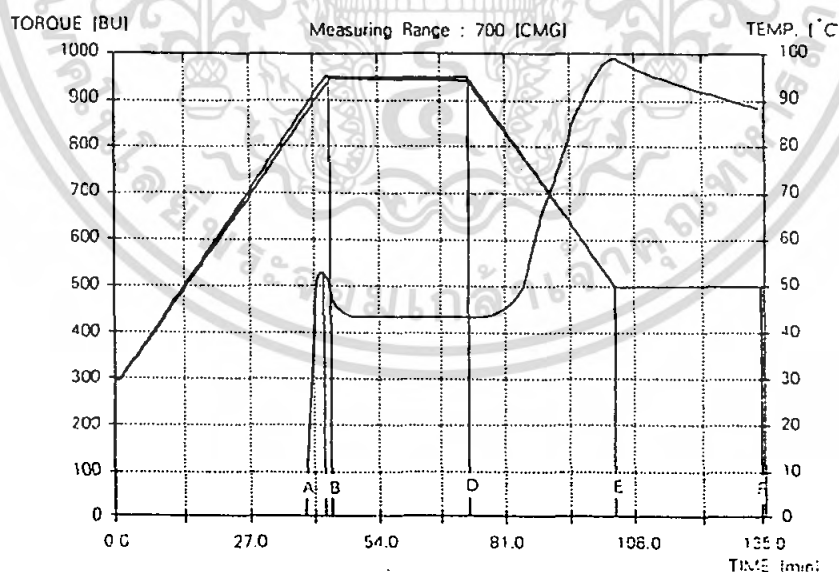
2.6.2.2 วิธีวัดความหนืด [3]

วิธีการตรวจวัดความหนืดสามารถกระทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดต่างๆ กัน ดังนี้

ก. การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟีลด์ (Brookfield viscometer) สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัวโดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่านี้อ่านด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาดและชนิดของเครื่อง ค่าที่วัดได้จากเครื่องนี้มีหน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (centipoises)

ข. การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer) สามารถใช้วัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น มีหน่วยของความหนืดเป็น mPa.s

ค. การใช้เครื่องบราเบนเดอร์ อะมิโลกราฟ (Brabender amylograph) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงานคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้หน่วยความหนืดเป็น Brabender Unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็น centipoise ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 centipoise ความหนืดค่าต่างๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2.27



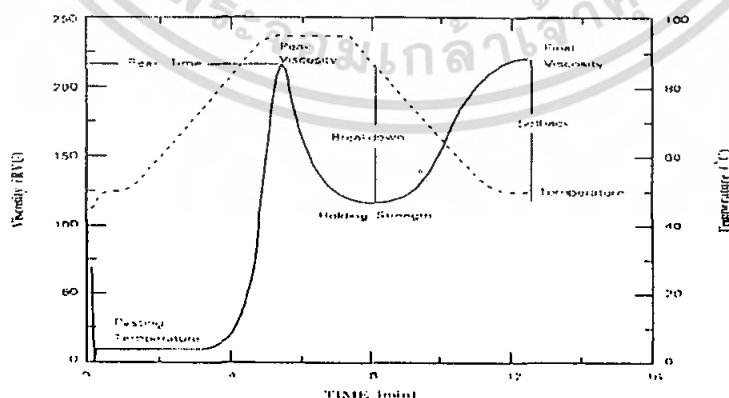
รูปที่ 2.27 จุดที่สำคัญในการวัดโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ อะมิโลกราฟ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุด A แสดงความหนืดเริ่มเกิดเจลลิตีไนซ์
- จุด B แสดงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นความหนืดสูงสุดในช่วงการให้ความร้อนเป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่
- จุด C แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งเห็นถึงความยากง่ายในการหุงต้ม
- จุด D แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งเห็นถึงความคงตัวของเม็ดแป้ง
- จุด E แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งเห็นถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากการทำให้เย็น
- จุด F แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งเห็นถึงความคงตัวของน้ำแป้งสุกที่การหุงต้ม และทิ้งไว้ให้เย็น

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (peak temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจะถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลงต่อมอลดอุณหภูมิลง ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง

ง. Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นเครื่องสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ จึงทำให้สามารถหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ได้ในเวลาสั้น (13 นาที) ได้ เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า สมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.28 และตารางที่ 2.10



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA [3]

แป้ง	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity	breakdown	Setback	Paste type	Paste clarity
ข้าวสาลี	52-65	ต่ำ	ต่ำ/ปานกลาง	ปานกลาง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด	62-72	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด	63-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
ข้าวเหนียว	68-78	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวฟ่าง	61-78	ปานกลาง	ต่ำ/สูง	ปานกลาง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวเจ้า				/สูง		
	50-68	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
มันสำปะหลัง	56-69	สูง	สูง	ปานกลาง	ยาว	โปร่งแสง
มันฝรั่ง	60-72	สูง	สูง	สูง	ยาว	โปร่งแสง
สาคุ						

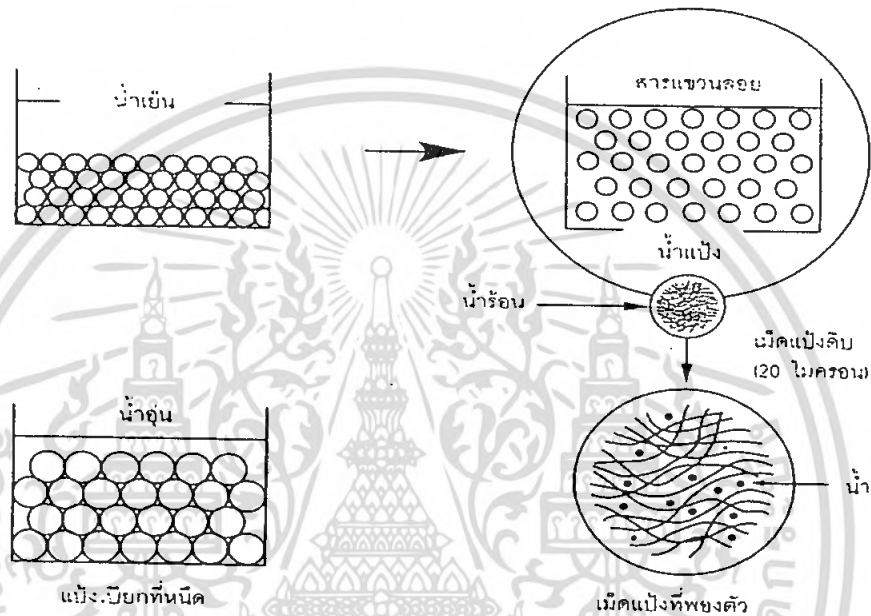
ค่าที่เครื่องแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์ ในหน่วย % หรือ RVU ดังนี้

- (1.) peak time : เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
- (2.) pasting temperature : อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 นาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- (3.) peak temperature : อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- (4.) peak viscosity : ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (5.) holding strength : ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำเย็นมีหน่วย
- (6.) breakdown : ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (7.) final viscosity : ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
- (8.) setback form peak : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น RVU
- (9.) setback from trough : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

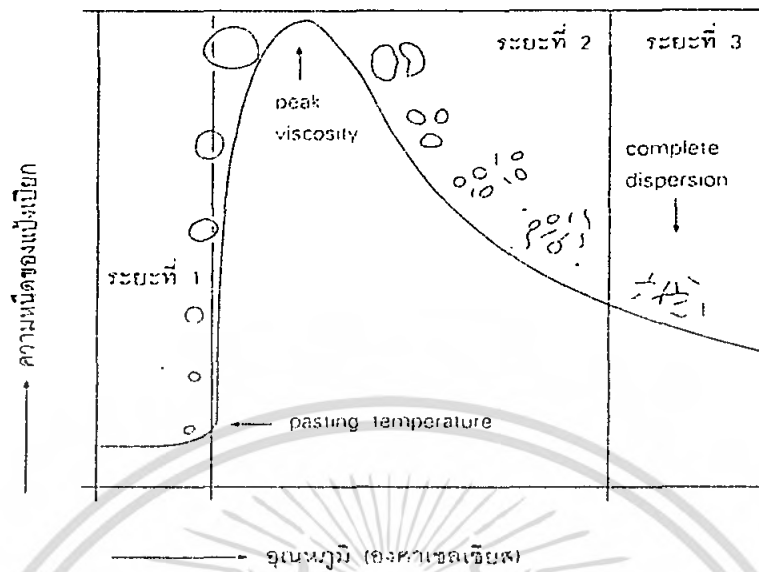
2.6.2.3 การเกิดเจลลาทีโนเซชัน [3]

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [3]

ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลาทีโนเซชัน เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด มักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากพืชหัว เช่นแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลลาทีโนเซชันต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืชการเกิดเจลลาทีโนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะดังรูปที่ 2.30



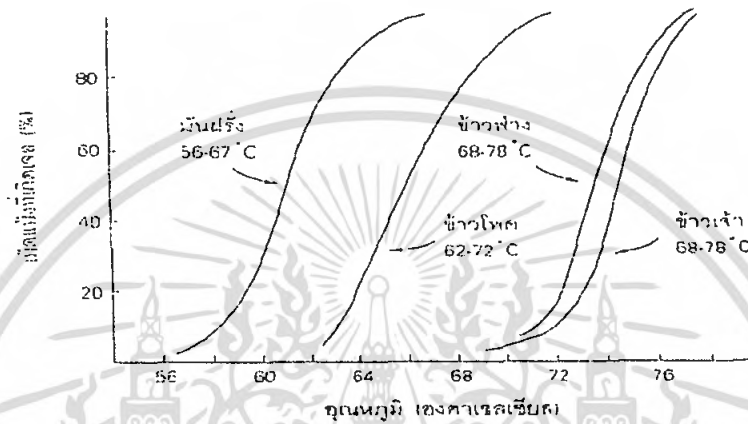
รูปที่ 2.30 ระยะในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของเม็ดแป้ง [3]

คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลลาทีโนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

ความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งในระหว่างเจลลาทีโนเซชันจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูงที่สุด และมีความสามารถในการทำให้ข้นหนืด (thickening power) สูงด้วย ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำ เนื่องจากเม็ดแป้งมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิโลสและไขมันนอกจากนี้ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดแป้งเนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่างๆ มีลักษณะการเกิดที่ต่างกันไป ดังรูปที่ 2.31 และตารางที่ 2.11



รูปที่ 2.31 %การเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 ลักษณะการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งแต่ละชนิด [3]

แป้ง	Kofler gelatinization temperature (°C) ^a	Brabender pasting temperature (8%;°C) ^b	Brabender peak viscosity (8%;BU) ^{b,c}	Swelling power ที่ 95°C	Critical conc. ที่ 95°C
แป้งข้าวโพด	62-67-72	75-80	700	24	44
แป้งมันฝรั่ง	58-63-68	60-65	3000	1153	0.1
แป้งสาลี	58-61-64	80-85	200	21	5.0
แป้งมันสำปะหลัง	59-64-69	65-70	1200	71	1.4
แป้งข้าวเหนียว	63-68-72	65-70	1100	64	1.6
แป้งข้าวฟ่าง	68-74-78	75-80	700	22	4.8
แป้งข้าวเจ้า	68-74-78	70-75	500	19	5.6
แป้งสาคุ	60-66-72	65-70	1100	97	1.0
แป้งท้าวยายม่อม	62-66-70	-	-	54	1.9
แป้งข้าวโพดอะมิโลเมส	67-80-92	90-95	-	6	20.2
แป้งมันเทศ	58-65-72	65-70	-	46	2.2

หมายเหตุ a : Kofler hot-stage microscope เป็นวิธีหนึ่งในการวัดอุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันของเม็ดแป้ง

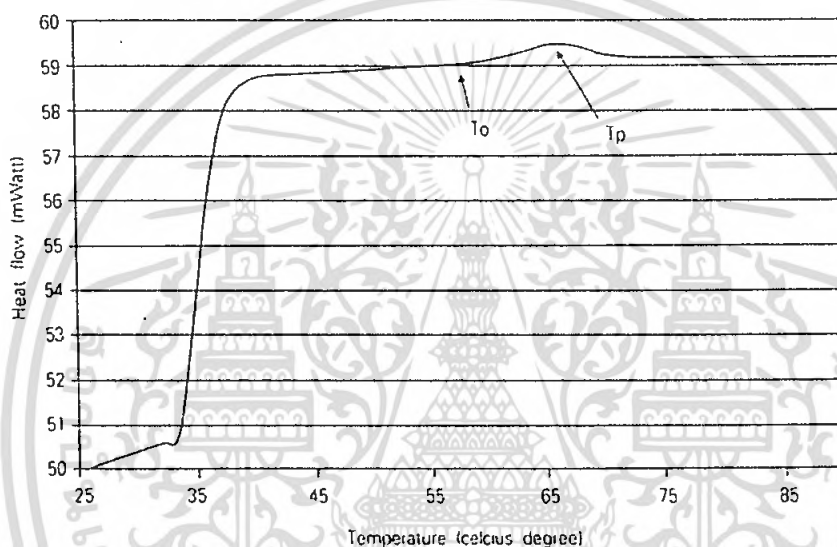
b : ความเข้มข้นของน้ำแป้งเท่ากับ 8%

c : BU = Brabender Units

การเกิดเจลลาทีโนเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิประมาณ 8 ถึง 12°C การตรวจสอบกระบวนการเจลลาทีโนเซชันนอกจากการใช้การสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เช่น Kofler gelatinization temperature range แล้วสามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการซึ่งเครื่องมือที่นิยมในปัจจุบันนี้คือเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ปกติพอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึก และอสัณฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160 ถึง 200°C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 ส่วนหรือมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหลอมละลายก็คือการเกิดเจลาทีโนเซชัน ช่วงของอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature) ของความร้อน คือ ช่วงอุณหภูมิของเจลาทีโนเซชัน สำหรับการวัดลักษณะของการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้งโดยใช้ เครื่อง DSC จึงทำได้โดยการพล็อตความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมแป้งกับน้ำในอัตรา 30/70 จนถึง อุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลาทีโนเซชันจะได้ thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชัน (enthalpy, cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ หากด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่อง DSC แสดงได้ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำ [3]

ตารางที่ 2.12 ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้งชนิดต่างๆที่มีน้ำอยู่มากพอโดยใช้ DSC ซึ่งจะเป็นค่าระหว่างเริ่มต้น (T_o) ถึงสูงสุด (T_p) [3]

แป้ง	อุณหภูมิ (°C)
แป้งข้าวโพด	70 – 89
แป้งมันฝรั่ง	57 – 87
แป้งสาลี	50 – 86
แป้งมันสำปะหลัง	68 – 92
แป้งข้าวเหนียว	68 - 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [3]

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตีในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคุดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือ การคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นมีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังแสดงในกลไกการคืนตัวของแป้ง รูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 กลไกการคืนตัวของแป้ง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคินตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคินตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคินตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคินตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคินตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก (monovalent anion และ cation), แคลเซียมไนเตรท (calcium nitrate) และยูเรีย (urea)

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคินตัวของแป้งแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคินตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อัตราในการคินตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคินตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คินตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 - 160°C อะมิโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคินตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคินตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดเหนียวจะมีอัตราการคินตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะมิโลสในแป้งข้าวโพดเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคินตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในแป้งธัญพืชที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะมิโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (amylase-lipid complex) อัตราการคินตัวของแป้งแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 อัตราการคินตัวของแป้งละชนิด [3]

ชนิดของแป้ง	% การตกตะกอนของส่วนที่ไม่ละลาย		
	5วัน	10 วัน	30วัน
แป้งมันฝรั่ง	10	15	20
แป้งข้าวโพด	37	48	62
แป้งสาลี	45	48	52
แป้งมันสำปะหลัง	11	12	13
แป้งข้าวเหนียว	0.2	0.5	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้งแต่ละชนิดอาจประมาณได้จากค่าการคืนตัว (setback) ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) โดยเครื่อง Brabender หรือ Rapid visco analyzer นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสามารถวัดได้โดยการใช้เครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้เพื่อรีเซ็ตรีโทรเกรเดชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทาลปีของแป้งรีโทรเกรเดชันต่อเอนทาลปีของแป้งเจลลาคีโนเซชัน

$$\% \text{ retrogradation} = \frac{\Delta H_{\text{retrogradation}}}{\Delta H_{\text{gelatinization}}} \times 100$$

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจล (syneresis) ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของแป้ง โดยแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีจะมีค่าความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งต่ำ ในขณะที่แป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันต่ำจะมีค่าความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งสูง ดังนั้นการวัดความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งจึงสามารถใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้

แต่เนื่องจากแป้งส่วนใหญ่จะมีเอนโทรปีสูง และการเกิดการคืนตัวนี้เกิดได้ช้าๆ จึงมักสร้างปัญหาให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น staling ในขนมปัง ในระหว่างการเก็บ

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัด [6]

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัดมีอยู่หลายอย่าง โดยปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของวัตถุดิบเริ่มต้น ชนิดและปริมาณของสารยึดติด การกระจายตัวของชั้นผิว สารเติมแต่งพิเศษอื่นๆ ปริมาณและการกระจายความชื้น การเกิดชั้นโดยขนาดของอนุภาค การเกิดชั้นโดยความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะ ระดับความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัด และทิศทางการจัดเรียงตัวของอนุภาค เป็นต้น ปัจจัยทั้งหมดนี้จะมีผลต่อกันและกันไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง

2.7.1 ชนิดของวัตถุดิบ [6]

จากหลายปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัด ชนิดของวัตถุดิบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยในกระบวนการผลิต ปัจจัยนี้จะเป็นตัวกำหนดว่าแผ่นขึ้นไม้อัดที่ได้จะมีความถ่วงจำเพาะเท่าใด วัตถุดิบบางชนิดต้องการการควบคุมปริมาณความชื้นที่ค่อนข้างแน่นอนเนื่องจากถ้าวัตถุดิบนั้นมีความชื้นสูงอาจทำให้แผ่นขึ้นไม้อัดที่ได้หลุดออกหรือแยกออกเป็นชั้นๆได้ วัตถุดิบบางชนิดจะทำให้ได้แผ่นขึ้นไม้อัดที่มีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ชนิดของวัตถุดิบยังมีผลอย่างมากต่อการเลือกสารยึดติดที่จะใช้ในกระบวนการผลิตด้วย นอกจากนี้จำนวนชนิดของวัตถุดิบที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นองค์ประกอบในแผ่นขึ้นไม้อัดก็มีผล โดยถ้ามีเพียงชนิดเดียวหรือสองชนิด วัตถุประสงค์ที่มีปริมาณมากกว่าหรือเป็นวัตถุประสงค์หลักจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัด แต่ในปัจจุบันมักจะมีการใช้วัตถุประสงค์ในลักษณะของการผสมระหว่างไม้เนื้อแข็งกับไม้เนื้ออ่อน ซึ่งจะทำให้สามารถปรับความหนาแน่นได้ในช่วงกว้าง

2.7.2 ชนิดของสารยึดติด [6]

ก. Melamine Resins

Melamine เป็น resins ที่มีราคาแพง มีลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่า urea แต่ไม่เท่า phenolics การจัดหมวดหมู่ของ urea และ melamine resins จะใช้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความชื้นไม่มาก เป็นเกณฑ์ urea resins ที่แข็งแรงกับ melamine

ผลิตภัณฑ์ของ melamine-formaldehyde resins จะมีลักษณะทางเคมีใกล้เคียงกันกับ urea-formaldehyde resin หลายปีที่ผ่านมา resin ใช้แทนแป้งเพราะปัญหาความสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานมานี้มีการปรับปรุงในการผลิตสารละลาย resin การใช้ประโยชน์ส่วนมากของ resin สำหรับการจัดหมวดหมู่ของ urea และ melamine resin โดยเฉพาะการจัดหมวดหมู่ที่สำคัญสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัด ความหนาแน่นปานกลาง แผ่นขึ้นไม้อัดช่วงความหนา 1.5 นิ้ว (38.1 มม.)

ความเข้มข้นของ urea-formaldehyde หรือ melamine-urea-formaldehyde ในสูตรแรกเริ่มได้มีการพัฒนาเป็นระบบสารยึดติด สารยึดติดควรจะต้องมีความเหมาะสมในการเปลี่ยนรูปแบบเพื่อป้องกันเส้นใยจากการบิดและปัญหาจากการเคลื่อนย้าย มากไปกว่านั้นการบิดจะทำให้ resin ที่มากเกินไปหลุดออกมาด้านนอกและยังทำให้เกิดรอยดำหนึ่ที่พื้นผิวอีกด้วย ความหนืดต่ำมาก ๆ ก็มีความสำคัญอีกด้วยในการช่วยกระจายตัวของ resin ไปทั่วบริเวณเส้นใยที่ซึ่งมีขนาดพื้นที่ผิวและน้ำหนักมาก ๆ

การพัฒนาการใช้สารยึดติดของแผ่นขึ้นไม้อัดเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการ un-polymerized water solution ของ methylolureas, methylol-melamine, formaldehyde และ acid-forming salt ซึ่งใช้เป็นสารยึดติดในยุคแรก ๆ ก็เพราะว่าปฏิกิริยาที่เสร็จสมบูรณ์เกิดขึ้นในแม่แบบที่ร้อน อย่างไรก็ตามมี resin ธรรมดาบางส่วนจากการ polymerized เกิดขึ้น อัตราส่วนของ urea และ melamine ในส่วนของการผสมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ขึ้นไม้อัดที่มีการใช้งานภายในเช่นเฟอร์นิเจอร์หรือที่ๆต้องการความทนทานต่อน้ำ

บริษัท Pope & Talbot จำกัด ที่เมืองโอ๊กคริช มลรัฐโอเรกอน ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการพัฒนาระบบของตัวเองในเรื่องการเติม urea resin ในยุคแรกลงไปทีเส้นใยซึ่งในส่วนที่เติมเข้าไป ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นที่แม่แบบร้อนด้วยระบบ melamine-urea-formaldehyde

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. Isocyanates

isocyanates ว่าเป็นสารยึดติดที่มีราคาแพงแต่เป็นที่น่าสนใจมาก โดยสภาวะปกติผลของสายโซ่urethaneในส่วน hydroxyl ของเส้นใยจะเกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงภายใต้ระบบของสารยึดติดซึ่งจะมีพันธะที่แข็งแรงมาก ๆ ดังเช่นความต้านทานต่อน้ำ, กรดเจือจางและสารละลาย มีตัวอย่างยืนยันก็คือแผ่นไม้ที่ใช้ในการก่อสร้างในประเทศเยอรมัน

ข้อดีของ isocyanates ก็คือไม่มีปริมาณน้ำในระบบ โดยส่วนใหญ่แล้วสารยึดติดจะนำไปใช้ประโยชน์โดยใช้เป็นกาว มีการให้ปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นแล้วนำมาใช้งาน ด้วยเหตุนี้ราคาของdryingลดลงและเกิดหมอกสีฟ้าขึ้นขณะที่dryingที่มีความชื้นต่ำถูกขจัดออก กาวจำนวนน้อย ตามรายงานพบว่าความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดไม้ต้องสูงเท่ากับ phenolic resins เพราะว่ามีพันธะที่แข็งแรงกว่าและยังช่วยประหยัดเส้นใยด้วย พันธะของ isocyanates มีความต้านทานต่อน้ำและทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเฉพาะภายนอกที่ดี isocyanate จะทำงานได้ดีในวัสดุที่ยึดติดยาก เช่น ฟางข้าว (Straw) ซึ่งพันธะของฟางข้าวจะยึดสร้างพันธะกับ phenolic Urethane ไม่ชอบน้ำทำให้บางส่วนของwaxถูกกำจัดออกจากแผ่นไม้อัด

ในส่วนของข้อเสียดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามีราคาแพงซึ่งจะแก้โดยประหยัดในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ isocyanates มีการยึดติดที่ดีกับอลูมิเนียมและเหล็กบางชนิดแต่ก่อให้เกิดปัญหาในการยึดติดระหว่างชั้นและส่วนของแม่พิมพ์ release agents บางชนิดเช่น glycerine ที่มักจะเกิดผลกระทบเป็นสารละลายอีกชนิดหนึ่งที่มีปัญหา ดังนั้นจึงกำจัดการติดกันกับเหล็กโดยใช้ isocyanate การเคลื่อนย้าย Isocyanate ในระหว่างผลิตต้องทำด้วยความระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น

ค. Natural Binders

กาวธรรมชาติบางชนิดเช่น casein, แป้งนมถั่วเหลือง, spray-dried beef และ pork blood ถูกใช้มาเป็นเวลาหลายปีเพื่อใช้ยึดไม้อัด ในอดีตโรงงานผลิตไม้อัดที่สหรัฐอเมริกาใช้กาวธรรมชาติเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม 80% ของผลิตภัณฑ์ใช้ phenolic resin เป็นสารยึดติด Tannins เป็นสารยึดติดที่ประสบความสำเร็จที่สุดในด้านการค้าซึ่งใช้กับไม้อัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศออสเตรเลียที่ซึ่งtanninsถูกใช้เป็นเวลาหลายปี Quebracho คือผลิตภัณฑ์ของ tannin ก็ถูกใช้อย่างกว้างขวางที่ประเทศอาร์เจนตินาและฟินแลนด์ ได้มีการวิจัยของประเทศอินเดียซึ่งมีการพัฒนาการ tannin ให้ใช้ในปริมาณน้อยของ formalin กาวชนิดนี้ได้มีการปรับปรุงโดยการเติมโปรตีน การใช้งานยังคงดำเนินไปด้วยการใช้ lignosulfonates จาก spent sulphide liquor ในยุโรปและแคนาดา เพราะว่าligninเป็นสารธรรมชาติA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแผ่นขึ้นไม้อัดและกระบวนการผลิตไม้อัดแบบแห้งจะใช้ tannins และ liginosulfonates เช่นเดียวกัน ส่วนในแคนนาดามีการใช้ liginosulfonate ในการผลิต waterboard แต่จะหาซื้อได้ยาก Tannin บางชนิดต้องการ formaldehyde ในปริมาณน้อย

2.7.3 ระดับและการแพร่ของความชื้น [6]

ปริมาณความชื้นและการแพร่กระจายตัวผ่านความหนาของแผ่นขึ้นไม้อัดเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัดที่ขึ้นรูปได้ ตัวอย่าง เช่น ถ้าบริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดมีปริมาณความชื้นสูงและบริเวณตรงกลางมีความชื้นต่ำ ผิวหน้าของแผ่นอัดจะมีความหนาแน่นสูงกว่าตรงกลางแผ่น ดังนั้นความแข็งแรงการโค้งงอและความแข็งจะดีกว่าแผ่นไม้อัดที่ขึ้นรูปโดยวิธีเดียวกันที่มีความชื้นเท่ากันทุกแผ่นและมีความหนาแน่นเท่ากันตลอดแผ่นขึ้นไม้อัด อย่างไรก็ตามการที่แผ่นไม้อัดมีลักษณะตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมีสมบัติในด้านการทนต่อการโค้งงอและความแข็งที่ดีแต่ก็มีแรงยึดภายในของบริเวณตรงกลางแผ่นไม้ต่ำ トラบโดที่ปริมาณความชื้นโดยรวมยังอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้แผ่นไม้อัดก็จะไม่แยกออกจากกันหลังจากที่ทำการอัดขึ้นรูปเสร็จแล้ว การจัดการกับปริมาณความชื้นสามารถทำได้ก่อนขึ้นรูปเพื่อกำหนดสมบัติของแผ่นไม้อัด

2.7.4 ความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัด [6]

ปัจจัยที่จะถูกกล่าวถึงต่อไป คือ ระดับของความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน ความถ่วงจำเพาะของแผ่นขึ้นไม้อัดเป็นปัจจัยที่ทรงพลังที่ส่งผลต่อสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัดที่เตรียมได้ โดยส่วนมากการเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเป็นการปรับปรุงให้แผ่นขึ้นไม้อัดมีสมบัติทางกายภาพให้ดีขึ้นด้วย นี่เป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายในการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน ในหลายครั้งไม่จำเป็นต้องเติมเรซินลงไปเพิ่ม เพราะว่ายิ่งใช้เรซินได้มีประสิทธิภาพเท่าไรผลที่ได้ คือ แผ่นขึ้นงานจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

มีการค้นพบว่าหากต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้นไม้ที่เอามาใช้ ต้องมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 0.15-0.20 นอกจากว่าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำ เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งว่าการเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะในแผ่นไม้อัดจะเพิ่มสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อยกเว้นในเรื่องของความเสถียรทางรูปร่างเมื่อแช่ในน้ำและการสัมผัสกับความชื้นสูง ๆ เพราะยังมีปริมาณไม้ในแผ่นอัดมากขึ้นเท่าไร การบวมตัวและการขยายตัวเชิงเส้นตรงก็จะยิ่งมากขึ้นหลังจากดูดซับ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- สิรินันท์ วิริยะสุนทร และคณะ [7] ศึกษาการเตรียมแผ่นกระดานอัดดูดซับเสียง โดยใช้ขานอ้อยมาผสมกับพอลิสไตรีนโฟมขนาด 2-4 มิลลิเมตร และขนาด 4-6.48 มิลลิเมตร โดยใช้กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ พอลิไวนิลอะซิเตต และกาวเดกซ์ตริน เป็นสารยึดติด อัตราส่วนผสมของพอลิสไตรีนโฟม ขานอ้อย และสารยึดติด คือ 8:30:40 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแผ่นกระดานอัดที่เตรียมได้จากขานอ้อยผสมกับพอลิสไตรีนโฟมขนาด 4-6.48 มิลลิเมตร ดูดซับเสียงดีกว่าฝ้าเสริมเส้นใยแก้ว แต่สมบัติเชิงกลของฝ้าเสริมใยแก้วดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกาวทั้ง 3 ชนิด พบว่า ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์มีสมบัติเชิงกลและการดูดซับเสียงดีที่สุด รองลงมาคือ พอลิไวนิลอะซิเตต และกาวเดกซ์ตริน ตามลำดับ โดยที่พอลิสไตรีนโฟมที่มีขนาด 4-6.48 มิลลิเมตร จะดูดซับเสียงดีกว่า ขนาด 2-4 มิลลิเมตร แต่มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าขนาด 2-4 มิลลิเมตร

- ธนวรรณ อภิชาติโสภิต [8] ศึกษาการเตรียมแผ่นขึ้นไม้อัดที่ทำจากขานอ้อยและวัสดุเหลือทิ้งโฟมพอลิสไตรีน โดยใช้กาวสองชนิดเป็นตัวประสาน คือ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และ ฟีนอล ฟอร์มัลดีไฮด์ แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (มอดุลัสแตกร้าว และ มอดุลัสยืดหยุ่น) และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สมบัติการดูดซับเสียง ฉนวนทางความร้อน การดูดซับ และการพองตัวเมื่อแช่น้ำ ผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกาวทั้ง 2 ชนิด พบว่า กาวฟีนอล ฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ทำแผ่นขึ้นไม้อัด จะมีความต้านทานการดูดซับน้ำ ด้านทานการพองตัวเมื่อแช่น้ำ ความแข็งแรงหักงอ และสมบัติการดูดซับเสียงดีกว่ากาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ แต่กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจะเป็นฉนวนทางความร้อนดีกว่าการใช้กาวฟีนอล ฟอร์มัลดีไฮด์

- วรางคนา วงศ์สิโรจน์กุล อภิสรา เรืองกุล อรณลิน ศิริวรรณ [9] ศึกษาการเตรียมแผ่นไม้อัดที่ความหนาแน่น 300 กก./ม³ จากเส้นใยมะพร้าวผสมโฟมพอลิสไตรีน โดยใช้กาว 2 ชนิด ได้แก่ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เป็นตัวประสาน ซึ่งใช้ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 5 7 9 และ 15% ในปริมาณเนื้อกาวแห้งเทียบกับน้ำหนักอบแห้งของเส้นใยมะพร้าวและโฟมพอลิสไตรีน โดยการเตรียมแผ่นไม้อัดที่มีความหนาแน่น 300 กก./ม³ แล้วนำไปทดสอบ สมบัติการดูดซับน้ำ การพองตัว มอดุลัสยืดหยุ่น การโค้งงอสวมจุด และสมบัติการดูดซับเสียง จากการทดลองพบว่า แผ่นใยไม้อัดที่ใช้กาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ 15% ในอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวต่อโฟมพอลิสไตรีนเท่ากับ 80/20 จะมีค่าการดูดซับน้ำและการพองตัวต่ำที่สุด แต่จะให้ค่าการโค้งงอสวมจุด และมอดุลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด ส่วนแผ่นใยไม้อัดที่ใช้กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ 15% ในอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวต่อโฟมพอลิสไตรีนเท่ากับ 80/20 จะให้ค่าการดูดซับเสียงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประวิทย์ อรุณวัฒน์โชค [10] ศึกษาการเตรียมแผ่นขึ้นไม้อัดชานอ้อยที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยมะพร้าว ตัวแปรที่ทำการศึกษ ได้แก่ ขนาดเส้นใยมะพร้าว อัตราส่วนของชานอ้อย เส้นใยมะพร้าวและพอลิสไตรีนโฟม ศึกษาชนิดและปริมาณของสารต้านทานการลามไฟ โดยทำการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดที่ความหนาแน่น 0.3 กรัม/ลบ.ซม. ด้วยเครื่องกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์และกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารยึดติดที่ 10% และ 15% โดยเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด แล้วจึงนำแผ่นขึ้นไม้อัดไปทดสอบ สมบัติการดูดซึมน้ำ สมบัติการพองตัวทางความหนา สมบัติเชิงกล และสมบัติการดูดซับเสียง จากการทดลองพบว่า เส้นใยมะพร้าวขนาด 21-50 เมช เหมาะสมในการผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดดูดซับเสียง โดยแผ่นขึ้นไม้อัดดูดซับเสียงที่มีปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นและมีการผสมโฟมพอลิสไตรีน ให้ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการพองตัวทางความหนา ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและค่าการดูดซับเสียงลดลง แต่มีค่ามอดุลัสแตกร้าสูงขึ้น ขณะที่การหน่วงการติดไฟของแผ่นขึ้นไม้อัดขึ้นอยู่กับชนิดของสารต้านทานการลามไฟและกาวที่ใช้ ซึ่งภายใต้การทดลองนี้ H_3BO_3 มีประสิทธิภาพการหน่วงการติดไฟได้ดีกว่า $Mg(OH)_2$ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับกาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์กับกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ พบว่า กาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ ให้แผ่นขึ้นไม้อัดดูดซับเสียงที่มีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซับเสียงดีกว่ากาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์

- สุชภา เนตรประดิษฐ์ ธนธร ทองสัมฤทธิ์ นิตศน์ ทิพย์โสตนัยนา [11] พัฒนาระดาศไบสับปะรดให้เหมาะสมต่อการพิมพ์บรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ เยื่อกระดาษผลิตโดยต้มวัตถุดิบแบบระบบเปิดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นาน 4 ชั่วโมง และฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นาน 3.5 ชั่วโมง จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติกระดาษไบสับปะรดโดยผสมเยื่อต้นปอสาในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักแห้ง แล้วผสมสารเติมแต่ง สารเพิ่มความแข็งแรง และสารต้านการซึมน้ำร้อยละ 2, 1.2 และ 2 ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ จากนั้นตรวจสอบสมบัติกระดาษ คุณภาพงานพิมพ์ สมบัติการบรรจุหีบห่อ และสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มผู้ผลิตสินค้า พบว่ากระดาษไบสับปะรดมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และทัศนศาสตร์ดีขึ้นเมื่อผสมเยื่อปอสาในปริมาณมากขึ้น แต่ความเรียบและคุณภาพงานพิมพ์ด้อยลง อัตราส่วนของเยื่อไบสับปะรดต่อเยื่อปอสาที่เหมาะสม คือ 70:30 ซึ่งทำให้กระดาษเรียบและมีคุณภาพงานพิมพ์ดี นอกจากนี้ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่แสดงความพอใจอย่างมากต่อบรรจุภัณฑ์กระดาษไบสับปะรดที่ผลิตขึ้น

- นันทยา เก่งเขตรกิจและจันทราวรรณ พุ่มชูศักดิ์ [12] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีนโดยใช้เส้นใยสับปะรดเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งทำการจัดเรียงเส้นใยเป็นแบบทิศทางเดียวและยาวต่อเนื่อง ปัจจัยที่ทำการศึกษ คือผลของสัดส่วนของเส้นใยสับปะรดที่ใช้ในการเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ 2.5, 5, 7.5 และ 10% โดยน้ำหนัก และผลของการดัดแปรเส้นใยสับปะรดด้วยวิธีเบนซอลเลชัน ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์คอมโพสิตนี้ เช่น สมบัติความทนแรงดึงสูงสุด สมบัติความทนแรงโค้งงอ และสมบัติความทนแรงกระแทก จากการทดลองพบว่า พอลิไทรีนคอมโพสิตที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น เมื่อสัดส่วนของเส้นใยสับปะรดที่ใช้เพิ่มขึ้น และพอลิไทรีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีเบนซอลเลชันจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิไทรีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

- R.M.N. Arib , S.M. Sapuan , M.M.H.M. Ahmad , M.T. Paridah , H.M.D. Khairul Zaman. [13] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบเสริมแรงเส้นใยใบสับปะรดผสมพอลิพรอพิลีน เส้นใยใบสับปะรดซึ่งมีปริมาณเซลลูโลสอยู่เป็นจำนวนมากและราคาไม่แพง มีความสามารถที่จะนำมาทำเป็นวัสดุประกอบร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อทำเป็นวัสดุประกอบเสริมแรงได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่มีต่อพฤติกรรมในการดึงยึดและความยืดหยุ่นของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ จากการทดลองจะพบว่า tensile strength และ tensile modulus ของวัสดุประกอบเสริมแรงที่เตรียมได้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยในใบสับปะรดในวัสดุประกอบมากขึ้นตามกฎของการผสม นอกจากนี้ผลลึกลับจลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสองกราดยังช่วยให้เข้าใจถึงการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยและลักษณะการแตกหักของเส้นใยในวัสดุประกอบ

- Narenda Reddy และ Yiqi Yang. [14] ศึกษาเส้นใยธรรมชาติที่เป็นผลผลิตพลอยได้จากการเกษตรสำหรับการใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรม ผลผลิตพลอยได้จากการเกษตรจำพวกลิกนินและเซลลูโลสเป็นแหล่งของเส้นใยที่มีจำนวนมากและราคาถูก เส้นใยธรรมชาติที่ได้จากการเกษตรมีส่วนประกอบ สมบัติ และโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ทำวัสดุประกอบ เส้นใย เยื่อไม้และอุตสาหกรรมกระดาษ นอกจากนั้นเส้นใยธรรมชาติยังสามารถที่จะใช้ผลิตเชื้อเพลิง สารเคมี เอนไซม์ และอาหาร โดยแหล่งเส้นใยธรรมชาติหลักนั้นได้มาจากการเพาะปลูกของ ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าว ข้าวฟ่าง สับปะรด กัญชง และมะพร้าว ในงานนี้ได้มีการจำแนกถึงกระบวนการผลิต โครงสร้าง สมบัติ และความเหมาะสมของเส้นใยเหล่านี้ ในการใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ (Raw Materials)

1. ใบสับประรด จากไร่สวนจันทร์ จังหวัดพัทลุง

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ค่าเฉลี่ยความหนา	1.36
ค่าเฉลี่ยความยาว	580.00
L/D	426.47

2. เส้นใยจากใบสับประรด (Pineapple leaf fiber; PALF) เตรียมโดยตัดบดด้วยเครื่อง และคัดขนาด 20-35 เมช

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ค่าเฉลี่ยความหนา	0.33
ค่าเฉลี่ยความยาว	0.72
L/D	2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กาวแป้งข้าวเหนียวตราช้างทะเลที่เตรียมจากสูตรต่างดังนี้

ตารางที่ 3.1 สูตรกาวแป้งข้าวเหนียว

สูตร	แป้ง(กรัม)	โซเดียมไฮดรอกไซด์(กรัม)	น้ำ(ml)
1	10	3	100
2	10	5	100
3	10	10	100
4	20	3	100
5	20	5	100
6	20	10	100
7	30	3	100
8	30	5	100
9	30	10	100

ขั้นตอนการเตรียมกาว

1. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามน้ำหนักในแต่ละสูตรในตารางที่ 3.1 มาละลายในน้ำ 50 ml
2. นำแป้งข้าวเหนียวตามน้ำหนักในแต่ละสูตรในตารางที่ 3.1 มาละลายในน้ำ 50 ml
3. เทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาผสมกับแป้งข้าวเหนียวที่ละลายน้ำพร้อมปั่นจน
4. นำไปให้ความร้อนจนแป้งสุกตัวจะมีลักษณะเป็นเจลใสไม่มีเม็ดแป้งปนอยู่
5. พักกาวจนเย็นเพื่อใช้ขึ้นรูปแผ่นไม้อัดต่อไป

3.2 ชุดเครื่องมือในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด

1. เครื่องบดชิ้นไม้ (Grinding machine) : Hammer mill type
2. ตะแกรงร่อน (Sieve machine) : Vibration type of RETSCH
3. เครื่องผสมวัสดุตีบ (Paddle-type blender) : Heavy duty drill press,model SE-330 of REXON
4. เครื่องอัดร้อน (Compression machine) : Pressure 1200 psi
(pressure unadjustable)
5. ถังผสม (Blending container)
6. เครื่องฟอร์มแผ่นขึ้นไม้ (Forming frame) [30cm x30cm x0.9cm]

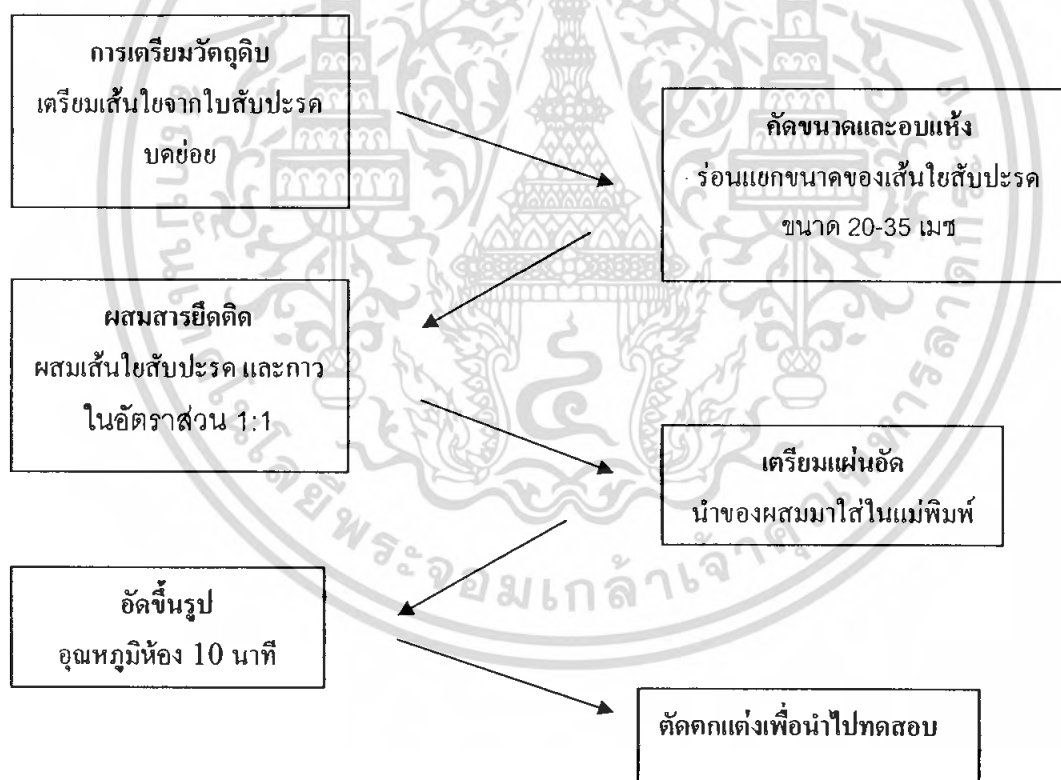
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน

1. ตู้อบ (Oven)
2. เครื่องชั่ง (Balance)
3. เครื่องเลื่อยมือ
4. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)
5. เวอร์เนีย (Vernier)
6. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) : LR 5K of LLOYD INSTRUMENTS

3.4 กรรมวิธีการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด

กรรมวิธีการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัดสามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆได้ในแผนภูมิรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.4.1.1 เส้นใยจากใบสับปะรด (Pineapple leaf fiber)

- นำใบสับปะรดสด มาหั่นให้มีขนาดประมาณ 1×1 นิ้ว
- นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำมาบดด้วยเครื่องบด แล้วทำการแยกขนาดเส้นใยที่ได้ด้วยตะแกรงขนาด 20 - 35 เมชจะ
ได้เส้นใยที่มีลักษณะ หยาบ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เส้นใยสับปะรดจากการเตรียมแบบแห้ง

3.4.2 สภาวะที่ใช้ในการผลิตแผ่นใยไม้อัด

การผลิตแผ่นใยไม้อัดประกอบด้วยขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานต่างๆ ดังนี้

สภาวะต่างๆที่กำหนดในการผลิต

ความหนาแน่น	0.6 ก./ลบ.ซม.
ความหนาของแผ่น	0.9 ซม.
ขนาดของแผ่น	30×30 ซม. ²
อุณหภูมิในการอัด	อุณหภูมิห้อง
ระยะเวลาในการอัด	10 นาที
อัตราส่วนเส้นใยสับปะรด: กาว	1:1 กรัม:กรัม

3.4.3 การผสมกาว

นำอัตราส่วนต่างๆ ของเส้นใยสับปะรดและกาวแป้งข้าวเหนียวที่คำนวณได้ มาผสมให้เข้ากันในถังผสมแล้วปั่นจนสารเพื่อให้กาวกระจายตัวไปบนเส้นใยสับปะรดได้อย่างสม่ำเสมอ ทำการปั่นจนอย่างต่อเนื่องจนกว่าส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันด้วยดีจึงจะหยุดเครื่องผสม แล้วนำไปทำการเตรียมอัดแผ่นในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องผสม

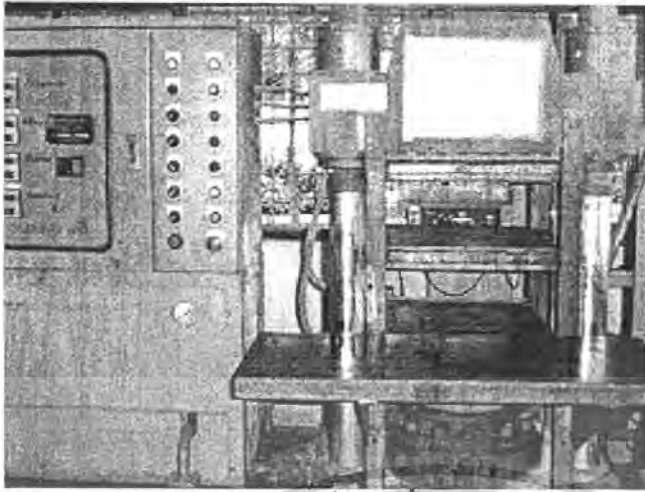
3.4.4 การเตรียมอัดแผ่น

การเตรียมอัดแผ่นเป็นกรรมวิธีการโรยวัตถุดิบดังกล่าวข้างต้นที่ผสมกับสารยึดติด(กาว) แล้วมาโรยใส่ในบล็อก โดยนำแผ่นเหล็กขนาดตามที่จะทำการขึ้นรูปของแผ่นขึ้นไม้ขัดวางที่ด้านล่างสุดแล้ววางแผ่นพลาสติกกรองไว้เพื่อที่จะป้องกันกาวที่ผสมกับวัตถุดิบมาติดที่แผ่นเหล็กด้านล่างตามด้วยเหล็กบล็อกขนาด 30cm x 30cm x 0.9cm ต่อมาทำการโรยวัตถุดิบ การโรยวัตถุดิบนั้นควรโรยปริมาณที่ละน้อยๆและกระจายกันทั่วบล็อก ทำการโรยวัตถุดิบจนหมดแล้ววางแผ่นพลาสติกอีก 1 แผ่นปิดบนวัตถุดิบอีกชั้นและวางแผ่นเหล็กตามอีกชั้นเป็นชั้นบนสุดแล้วทำการอัดแผ่นเหล็กลงมาเพื่อให้วัตถุดิบทั้งหมดอัดตัวกันที่ระดับหนึ่งและเป็นการไล่อากาศออกไปจากชิ้นงานด้วย แล้วจึงนำไปอัดในขั้นตอนต่อไป

3.4.5 การอัดขึ้นรูป

กระบวนการอัดขึ้นรูปนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตจะเป็นการอัดบนแท่นอัดร้อนในแนวราบที่อุณหภูมิห้อง โดยที่เครื่องอัดร้อนนี้จะมีชุดเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้เป็นเครื่องอัดเพื่อทำการขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัด เพื่อให้ได้ขนาดความหนาของแผ่นตามต้องการและในการอัดความร้อนนี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอัดร้อน โดยที่การอัดร้อนนี้จะใช้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเอาออกจากเครื่องอัด นำแผ่นใยไม้อัดที่ได้ออกจากบล็อกฝั่งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดขึ้นรูป

3.4.6 การพักขึ้นไม้และการตกแต่ง

แผ่นใยไม้อัดที่นำออกจากเครื่องอัดร้อนควรนำมาพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 7 วัน ก่อนจึงค่อยนำไปทำการทดสอบและแผ่นขึ้นไม้อัดที่ได้ อาจจะไม่มีความไม่สม่ำเสมอของขอบและที่ขอบอาจจะมีการผลมกันไม่ดีระหว่างกวางและวัตถุติด จึงควรทำการตัดทิ้งและตกแต่งเพื่อให้ดูสวยงาม จากนั้นจึงนำไปทดสอบ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล

3.4.7 การเตรียมชิ้นทดสอบในการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

นำแผ่นใยไม้อัดจากเส้นใยลึประดผลมกวางแบ่งข้าวเหนียวที่ผลิตได้รวมทั้งหมด 20 แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาด 300×300×9 มิลลิเมตร ไปตัดเป็นชิ้นทดสอบ โดยตัดชิ้นทดสอบด้วยเครื่องเลื่อยวงเดือนชนิดความเร็วรอบสูง ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้แต่ละคุณสมบัติ

3.4.7.1 ชิ้นทดสอบความหนาแน่น ขนาดแผ่นทดสอบ 90×90 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น

3.4.7.2 ชิ้นทดสอบหาค่าการโค้งงอสามจุดและมอดูลัสยืดหยุ่น จำนวน 4 ชิ้น ขนาดแผ่นทดสอบ 50×150 มิลลิเมตร

*** การปรับสภาวะชิ้นทดสอบเมื่อทำการขึ้นรูปแล้วนำแผ่นขึ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับพบว่าที่เวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้ได้ชิ้นงานที่ดีที่สุด แล้วนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.5.1 วิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties tester)

ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Density) (JIS A 5908-1994)

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดถึง 0.1 กรัม
2. ไมโครมิเตอร์ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร
3. เวอร์เนีย

วิธีการทดสอบ

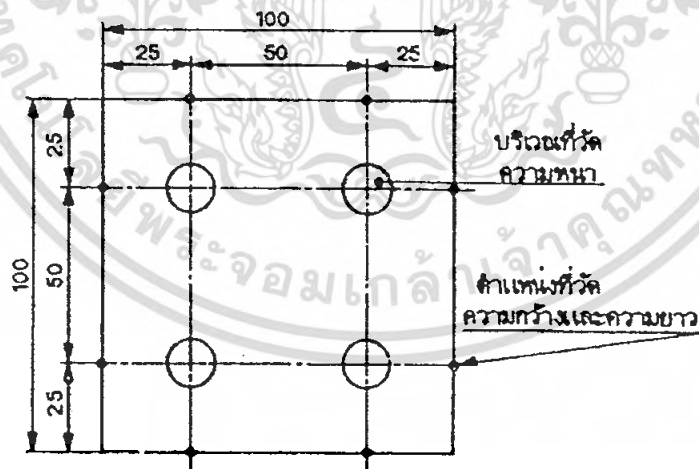
ทดสอบความหนาแน่น โดยตัดแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน JIS A 5908-1994 ดังรูปที่ 3.5 วัดความหนาแน่นโดยนำชิ้นทดสอบไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอล วัดความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบขนาดก๊อบแล้วหาค่าเฉลี่ย วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 4 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยโดยใช้ไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดซึ่งมีส่วนของแป้นวัดเรียบและขนานกัน

วิธีคำนวณหาค่าความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = m_1/V$$

$$\text{เมื่อ } m_1 = \text{มวล (g)}$$

$$V = \text{ปริมาตร (cm}^3\text{)}$$



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties tester)

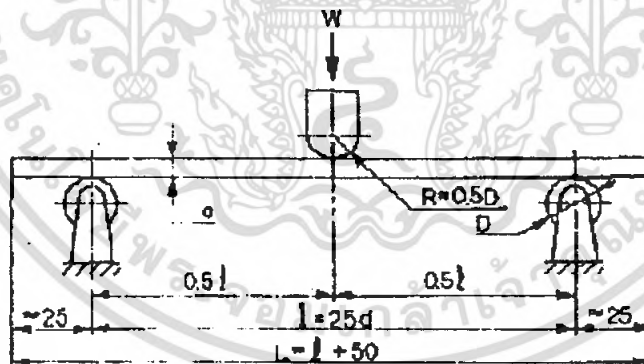
การหาค่ามอดุลัสแตกร้าวและมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Rupture, MOR and Modulus of Elastic, MOE) (JIS A 5908-1994)

เครื่องมือ

1. เครื่องกดซึ่งวัดแรงกดได้ละเอียดถึง 5 นิวตัน หรือ ร้อยละ 5 ของแรงกดสูงสุดที่ขึ้นทดสอบรับได้ หัวกดต้องมีปลายส่วนที่ใช้กดเป็นครึ่งวงกลม มีความยาวไม่น้อยกว่าความกว้างของชิ้นทดสอบ
2. แท่นรองรับต้องมีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมหรือครึ่งวงกลม มีรัศมี 10 ถึง 13 มิลลิเมตร ความยาวไม่น้อยกว่าความกว้างของชิ้นทดสอบ
3. มาตรวัดการแอ่นตัว ซึ่งอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ

ทดสอบหามอดุลัสแตกร้าวและมอดุลัสยืดหยุ่นดังรูปที่ 3.6 ตัดแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน JIS A 5908-1994 วางชิ้นทดสอบลงบนแท่นรองรับ ซึ่งมีระยะห่าง 15 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบ ให้ปลายชิ้นทดสอบยื่นออกไปจากแท่นรองรับประมาณข้างละ 25 มิลลิเมตร เท่าๆ กัน ให้แรงกดลงบนจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยให้กดแรงลงบนจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยอัตราแรงกดอย่างสม่ำเสมอประมาณ 10 mm/min แรงที่ใช้กดสูงสุด = P



รูปที่ 3.6 การทดสอบหามอดุลัสแตกร้าวและมอดุลัสยืดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีคำนวณหาค่ามอดุลัสแตกร้าว

MOR (N/mm ²)	=	$3PL/2bt^2$
เมื่อ MOR	=	มอดุลัสแตกร้าว หน่วยเป็นเมกะพาสคัล
P	=	แรงกดสูงสุดที่ขึ้นทดสอบรับได้ หน่วยเป็นนิวตัน
L	=	ระยะห่างของแท่นรองรับ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
b	=	ความกว้างของชิ้นทดสอบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
t	=	ความหนาเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

วิธีคำนวณหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่น

MOE	=	$L^3 \Delta w / 4bt^3 \Delta S$
เมื่อ MOE	=	มอดุลัสยืดหยุ่น หน่วยเป็นเมกะพาสคัล
L	=	ระยะห่างของแท่นรองรับ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
Δw	=	แรงกดที่กระทำเพิ่มขึ้นในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรง หน่วยเป็นนิวตัน
ΔS	=	ระยะแอนตัวของชิ้นไม้ที่เพิ่มขึ้นในช่วงเส้นกราฟเป็นเส้นตรง หน่วยเป็นมิลลิเมตร
b	=	ความกว้างของชิ้นทดสอบ เป็นมิลลิเมตร
t	=	ความหนาเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ เป็นมิลลิเมตร

การหาค่าความแข็งกด(hardness)

เครื่องมือทดสอบ หัวกดชอร์ D

วิธีการทดสอบ ทำการกดอัดบนชิ้นงาน 10 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ยโดยหัวกด D

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้เตรียมแผ่นใยไม้อัดจากใบสับปะรด โดยผลิตจากจากแป้งข้าวเหนียวได้ทำการทดลองเปลี่ยนปริมาณแป้งจาก 10 กรัม ถึง 60 กรัม ในน้ำ 100 ml พบว่า แป้งยิ่งมาก ก็จะทำให้เตรียมแผ่นใยไม้อัดจากใบสับปะรดโดยกับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เนื่องจากการลดปริมาณแป้งลงจึงทำการศึกษาเพิ่มต่างในสูตรผสม และลดปริมาณแป้งข้าวเหนียวลง ศึกษาปริมาณต่างที่ใช้โดยเริ่มจาก 3 กรัม ถึง 10 กรัม พบว่าการเพิ่มต่างลงไปแป้งข้าวเหนียวช่วยให้สามารถขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดได้ จึงทำการศึกษาสูตรกาวแป้งข้าวเหนียวที่ใช้แป้งข้าวเหนียว 10 กรัม ถึง 30 กรัม และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 3 กรัม ถึง 10 กรัม

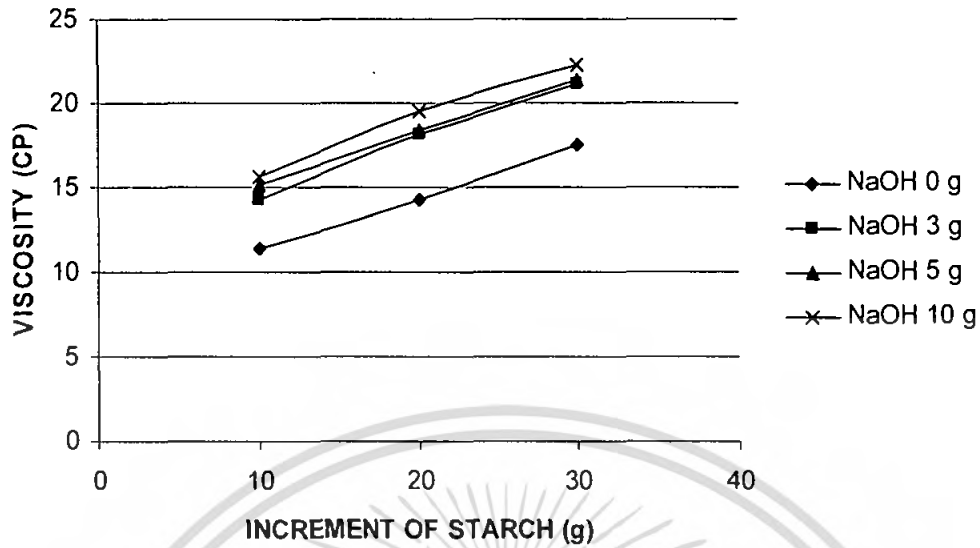
ผลการทดลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 ความหนืด

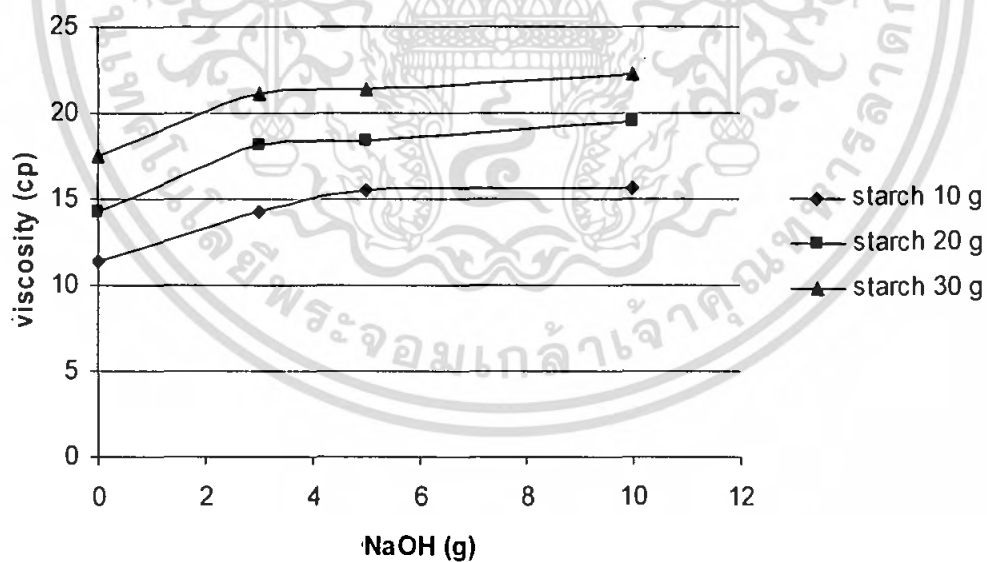
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนืด (cp) กาวจากแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

น้ำหนัก(g) แป้ง:NaOH:น้ำ	ความหนืด (cp) เซ็มเบอร์ 6 ความเร็วรอบ 10 รอบ/วินาที
10:0:100	$(11.40 \pm 0.37) \times 10^3$
10:3:100	$(14.30 \pm 0.74) \times 10^3$
10:5:100	$(15.10 \pm 0.73) \times 10^3$
10:10:100	$(15.60 \pm 0.37) \times 10^3$
20:0:100	$(14.30 \pm 0.40) \times 10^3$
20:3:100	$(18.10 \pm 0.58) \times 10^3$
20:5:100	$(18.40 \pm 0.48) \times 10^3$
20:10:100	$(19.50 \pm 0.31) \times 10^3$
30:0:100	$(17.50 \pm 0.31) \times 10^3$
30:3:100	$(21.10 \pm 0.86) \times 10^3$
30:5:100	$(21.40 \pm 0.73) \times 10^3$
30:10:100	$(22.30 \pm 0.70) \times 10^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



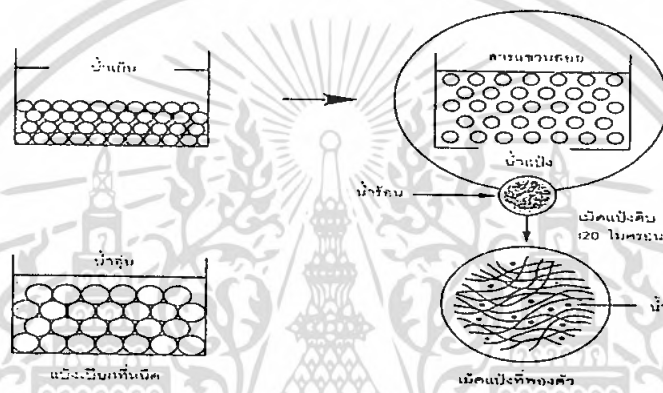
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของกาวจากแป้งข้าวเหนียวกับปริมาณแป้งผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของกาวจากแป้งข้าวเหนียวกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดของกาวแป้งเกิดจากการพองตัวของเม็ดแป้งที่ละลายในน้ำร้อน เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของแป้งแต่ละชนิด สำหรับแป้งข้าวเหนียวมีโครงสร้างที่เป็นอะมิโลเพกทินเกือบทั้งหมด[3] ซึ่งเป็นส่วนที่มีกึ่งดัดนั้นโมเลกุลของน้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อให้ความร้อน เพราะความร้อนช่วยให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งขยายตัวออกได้ดีขึ้น โมเลกุลของน้ำแทรกซึมได้เร็วขึ้นเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มจาก 10 กรัมเป็น 30 กรัม ในน้ำ 100 ml เท่ากัน ความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวยิ่งสูงขึ้นเพราะแป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ของกลูโคส มีหมู่ $-OH$ ที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ยังมีปริมาณแป้งมากยิ่งดูดซึมน้ำได้มาก ความหนืดของแป้งจึงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.1 , 4.2 และ 4.3



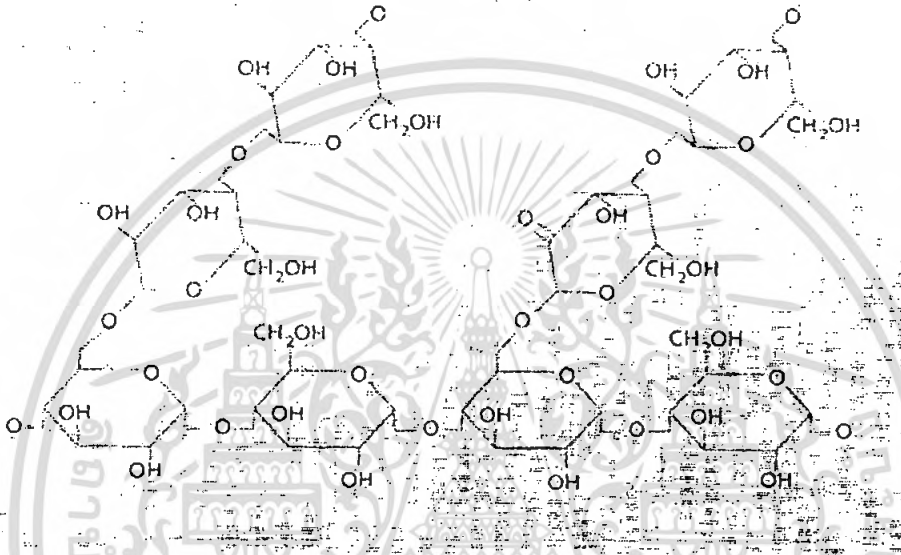
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้ง

การเติมด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในกาวแป้งข้าวเหนียวทำให้ความหนืดของแป้งสูงขึ้น เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถดึงโปรตอนออกจากหมู่ $-OH$ [15] ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในโมเลกุลของแป้ง ทำให้เกิดหมู่ $-O^-Na^+$ ยังมีหมู่ $-O^-Na^+$ เกิดขึ้นมากโมเลกุลของแป้งยิ่งดูดซึมน้ำได้มากเกิดการพองตัวได้มากขึ้น ความหนืดของแป้งจึงสูงขึ้นตามปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังรูป 4.1

เมื่อกาวแป้งเย็นตัวลงโมเลกุลของแป้งส่วนที่เป็นอะมิโลส (สายโซ่เชิงเส้น) เริ่มเคลื่อนสายโซ่เข้าหากัน และกักเก็บน้ำไว้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นได้[16]ปรากฏการณ์นี้คือการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) แต่ในการทดลองนี้เตรียมกาวแป้งจากแป้งข้าวเหนียวซึ่งมีส่วนประกอบส่วนมากในโครงสร้างเป็นอะมิโลเพกทิน ดังนั้นความหนืดที่สูงขึ้นในการทดลองนี้จึงไม่ใช่เกิดจากการคืนตัวของแป้ง

จากตารางที่ 4.1 เมื่อปริมาณแป้งคงที่แต่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 3 กรัมเป็น 10 กรัม ความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวสูงขึ้นเล็กน้อย หากเทียบกับเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากันความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวสูงขึ้นมาก เนื่องจากอาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโซลิดเมอร์ของแป้งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังรูป 4.4 ทำให้ความยาวของโซลิดเมอร์แป้งลดลง ความสามารถในการดูดซึมน้ำจึงลดลง ปฏิกิริยาเกิดคู่ไปกับการที่หมู่ $-O^-Na^+$ ดูดซึมน้ำ ทำให้ผลรวมความหนืดไม่สูงขึ้นมากนัก ประโยชน์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ การเกิดหมู่คาร์บอกซิล(carboxyl) และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl) ขึ้นภายในโมเลกุลของแป้ง ทำให้แป้งคงรูปในลักษณะกาวและลดการคืนตัวของแป้ง(reduce starch to retrograde) [17]



รูปที่ 4.4 แสดงหมู่คาร์บอกซิล(carboxyl) และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl) ในโมเลกุลของแป้ง[17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัด

เตรียมแผ่นใยไม้อัดที่ความหนาแน่น 0.6 g/cm^3 จากเส้นใยสับประดหยาบที่ร่อนคัดขนาด 20 เมช กับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกาว:เส้นใยสับประดเป็น 1:1 ความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัดในสูตรต่างๆ แสดงในตาราง 4.2 ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นของแผ่นใยไม้อัดเส้นใยสับประดในแต่ละสูตร

น้ำหนัก(g) แป้ง:NaOH:น้ำ	ผลการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด	ความหนาแน่น(g/cm^3)
10:0:100	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	-
10:3:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.61 ± 0.03
10:5:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.57 ± 0.02
10:10:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.58 ± 0.03
20:0:100	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	-
20:3:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.58 ± 0.02
20:5:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.56 ± 0.03
20:10:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.56 ± 0.02
30:0:100	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	-
30:3:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.62 ± 0.03
30:5:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.61 ± 0.02
30:10:100	สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	0.58 ± 0.04

เนื่องจากกาวแป้งข้าวเหนียวที่ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดได้ จึงไม่มีผลการทดลองที่เป็นเช่นนี้ เพราะเมื่อขึ้นรูปแผ่นแล้วนำแผ่นไปอบความร้อนที่ใช้ทำให้น้ำระเหยออกจากโมเลกุลของแป้งทำให้กาวที่เตรียมได้ไม่มีลักษณะกาวคือเมื่ออบจะแห้งกลายเป็นเม็ดแป้งเส้นใยจึงไม่ติดกัน

กรณีของการดัดแปลงแป้งข้าวเหนียวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดได้เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถดูดซึมน้ำได้ดี นอกจากนี้หมู่คาร์บอกซิลและหมู่คาร์บอนิลทำให้แป้งมีสมบัติเหนียว(stickiness) เหมาะกับการใช้เป็นสารเคลือบ (coating) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

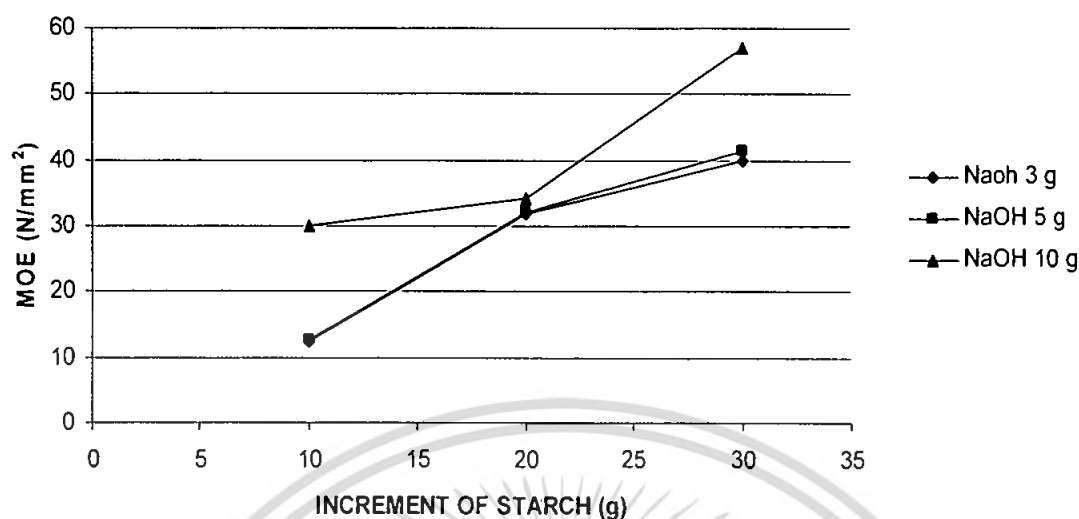
4.3 สมบัติเชิงกล

ตารางที่4.3 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่น(N/mm²) มอดุลัสแตกร้าว(N/mm²) และค่าความแข็งกด (hardness)

น้ำหนัก(กรัม) แป้ง:NaOH:น้ำ	MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)	ความแข็งกด
10:0:100	-	-	-
10:3:100	12.20±2.42	0.42±0.01	18.40±5.83
10:5:100	12.50±2.78	0.43± 0.11	19.10±4.78
10:10:100	29.90±3.59	0.53± 0.08	19.40±2.87
20:0:100	-	-	-
20:3:100	31.90±3.24	0.61± 0.10	19.70±1.03
20:5:100	32.10±7.32	0.64 ±0.21	26.20±3.40
20:10:100	34.33±4.69	0.66± 0.17	30.70±2.90
30:0:100	-	-	-
30:3:100	39.76±6.41	0.68 ±0.12	22.00±4.28
30:5:100	41.40±9.86	0.71 ±0.24	26.90±4.11
30:10:100	56.93±5.15	0.94 ±0.10	33.60±4.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 มอดุลัสยืดหยุ่น

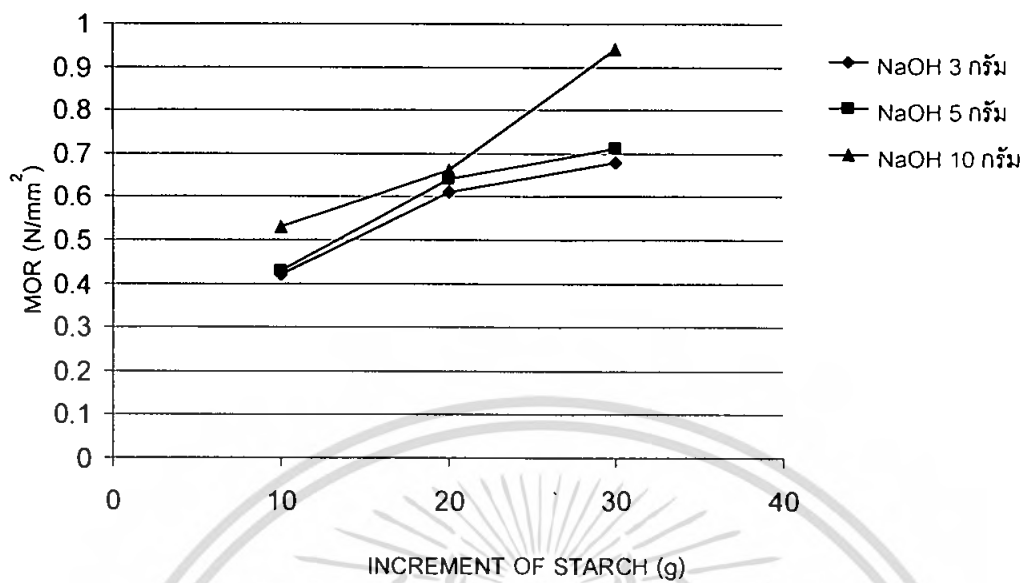


รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (N/mm²) ของแผ่นใยไม้อัดกับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณแป้งข้าวเหนียวเท่ากันแต่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน พบว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 3 กรัมเป็น 5 กรัม แต่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 5 กรัม เป็น 10 กรัม โดยเฉพาะเมื่อมีแป้งข้าวเหนียว 30 กรัมให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่สูงสุดเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดหมู่ $-O^-Na^+$ ซึ่งดูดซึมน้ำได้มากขึ้น

ดังนั้นเมื่อผสมกับเส้นใยสับปะรดกาวจะไม่ดูน้ำออกจากเส้นใย และน้ำที่มากพอนี้จะช่วยให้กาวแป้งเชื่อมบนผิวของแผ่นใยไม้อัดเส้นใยสับปะรดได้ทั่วถึง เกิดพันธะระหว่างกาวแป้งกับเส้นใยดีขึ้น การรับและการกระจายแรงจึงสูงขึ้น

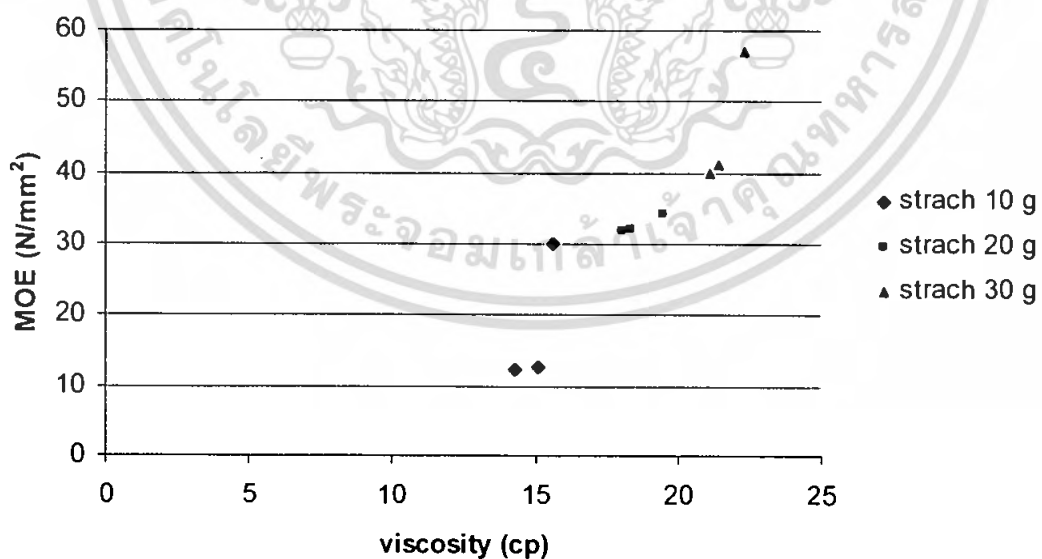
4.3.2 มอดุลัสแตกร้าว



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสแตกร้าว (N/mm²) ของแผ่นใยไม้อัดกับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.6 ปริมาณแป้งข้าวเหนียวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสแตกร้าวสูงขึ้น เหตุผลเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้แล้วในค่ามอดุลัสยืดหยุ่น

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นใยไม้อัดกับความหนืดของแป้ง

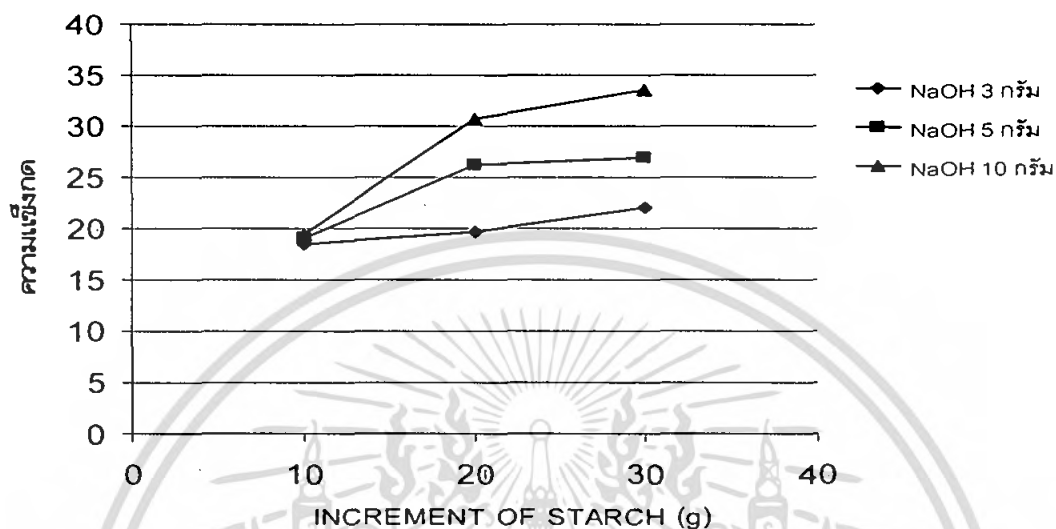


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น(N/mm²) กับความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 พบว่าความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวมากขึ้นค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นใยไม้อัดมากขึ้นด้วย

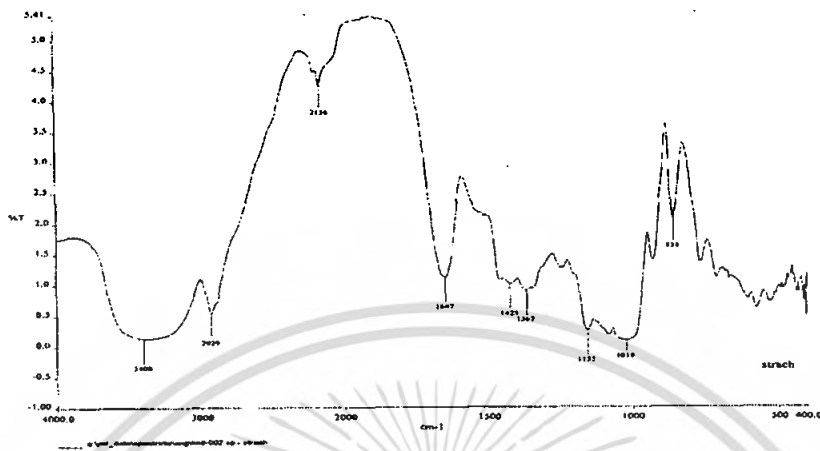
4.3.4 ความแข็งกด



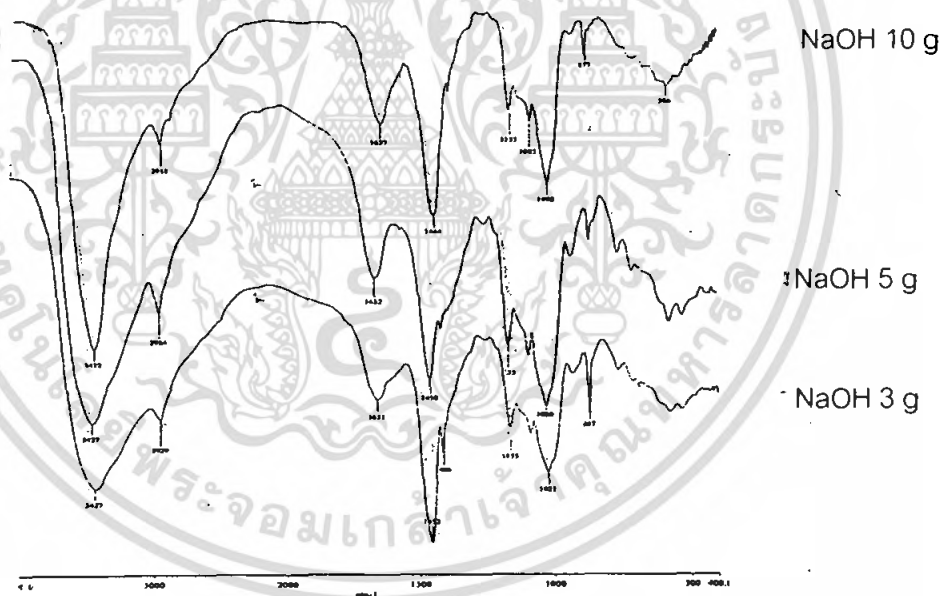
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของแผ่นใยไม้อัดกับกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

ความแข็งกดของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังแสดงในรูป 4.8 พบว่ากาวแป้งที่ความเข้มข้นต่ำเกิดแรงยึดกับเส้นใยสับปะรดได้น้อย จึงให้ค่าความแข็งกดต่ำ สำหรับกาวแป้งข้าวเหนียวที่มีความเข้มข้นสูง (20 กรัมและ30 กรัม) ความแข็งกดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณแป้ง แต่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากต่างที่มากทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มาก เกิดหมู่คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลซึ่งเกิดพันธะกับเส้นใยได้ดี ทำให้ความแข็งกดที่ผิวของแผ่นใยไม้อัดสูงขึ้น

4.4 ผลตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR Spectrum

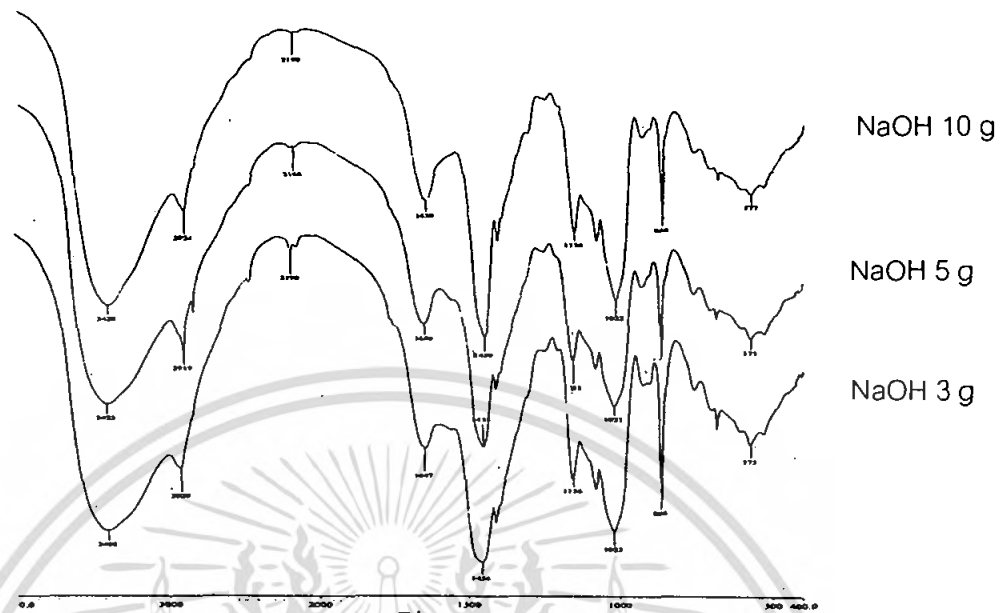


รูปที่ 4.9 แสดง FTIR Spectrum ของแป้งข้าวเหนียว

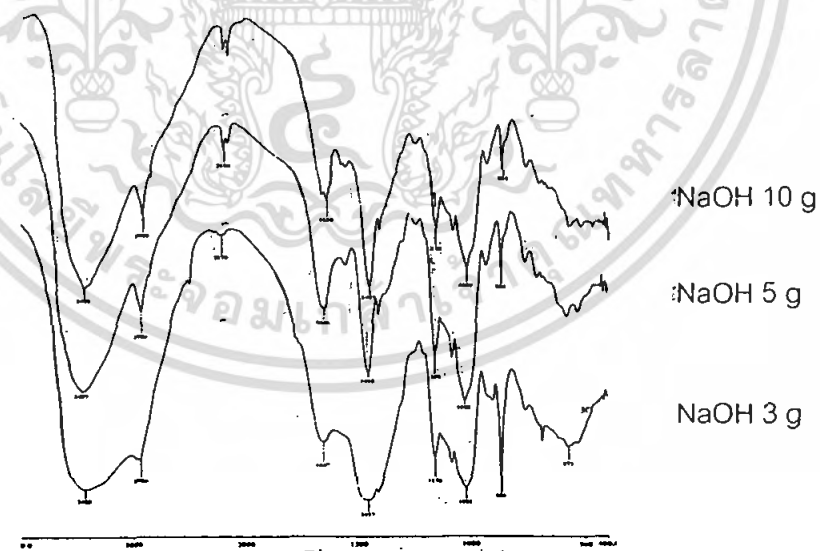


รูปที่ 4.10 FTIR Spectrum ของกาวแป้งข้าวเหนียว 10 กรัม ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3, 5, 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 FTIR Spectrum ของกาบแป้งข้าวเหนียว 20 กรัม ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 , 10 กรัม



รูปที่ 4.12 FTIR Spectrum ของกาบแป้งข้าวเหนียว 30 กรัม ผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 , 5 , 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

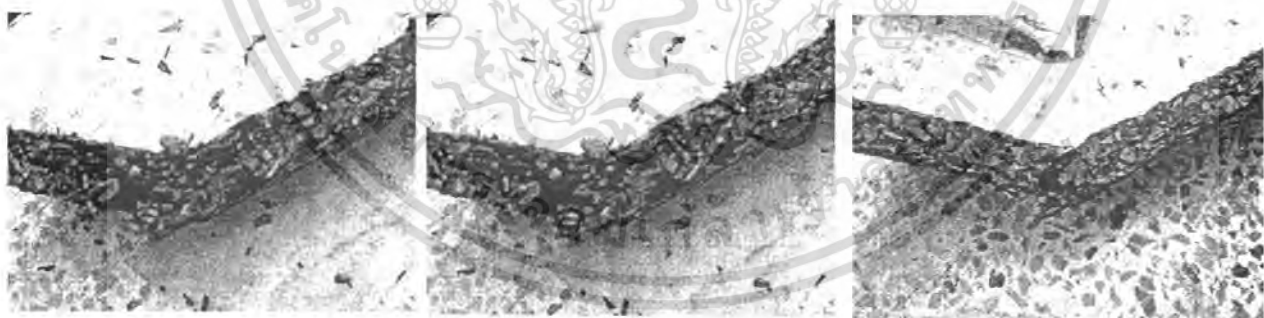
ตารางที่ 4.4 แสดงพีกสำคัญของหมู่ฟังก์ชันในรูป 4.9-4.12

เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3,400-3,200	Polymeric OH, intermolecular Hydrogen bond
2,890 \pm 10	C-H stretching of Aliphatic, Alkane
1,660-1,640	-CH=CH ₂ Vinyl terminal หรือ -co-
1,450	$\text{CH}_2\text{-CH}_2$ cycloalkane
1,150-1,060	-CH ₂ -O-CH ₂ - ether

จากรูป 4.9 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียว พบพีกของหมู่-OH ชัดเจนเป็นพีกกว้าง (broad) ที่เลขคลื่นประมาณ $3,400 \text{ cm}^{-1}$ และพีกอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

สำหรับรูป 4.10-4.12 เป็น FTIR สเปกตรัมของกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าให้ลักษณะพีกที่สำคัญที่เลขคลื่นเดียวกัน เช่น พีกของหมู่-OH ที่เลขคลื่นช่วง $3,400 \text{ cm}^{-1}$ แต่ลักษณะพีกแหลมตามปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดหมู่ $\text{-O}^-\text{Na}^+$ ซึ่งเป็นการลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่-OH ลง เพราะถ้าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่-OH แล้วพีกจะกว้าง

4.5 ภาพถ่ายชิ้นงานด้านข้าง



NaOH 3 g

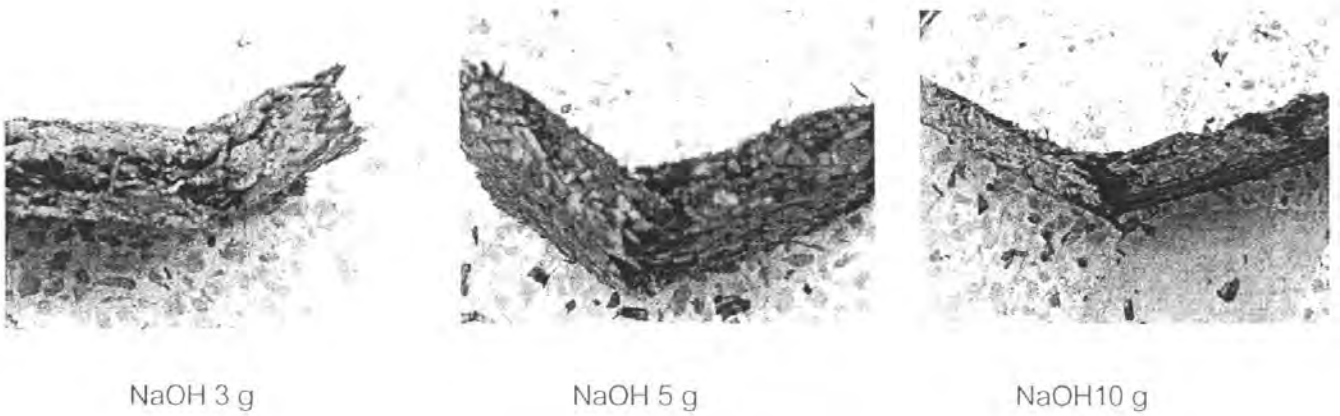
NaOH 5 g

NaOH 10 g

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยสับปะรดกับกาวแป้งข้าว

เหนียว 10 กรัม ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3, 5 และ 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NaOH 3 g

NaOH 5 g

NaOH 10 g

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยสับปะรดกับกาวแป้งข้าวเหนียว 20 กรัม ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3, 5 และ 10 กรัม



NaOH 3 g

NaOH 5 g

NaOH 10 g

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายภาพตัดขวางของแผ่นใยไม้อัดที่เตรียมจากเส้นใยสับปะรดกับกาวแป้งข้าวเหนียว 30 กรัม ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3, 5 และ 10 กรัม

จากรูปที่ 4.13 – 4.15 เมื่อพิจารณาที่ปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นจะทำให้แผ่นใยไม้อัดมีช่องว่างภายในชิ้นงานน้อยกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบแผ่นใยไม้อัดที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน พบว่า เมื่อมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยจะทำให้แผ่นใยไม้อัดมีช่องว่างภายในชิ้นงานมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานยึดเกาะกันไม่ดี มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการทดลอง

การวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงวิธีการผลิตแผ่นใยไม้อัดโดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร คือใบสับปะรดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด แผ่นใยไม้อัดที่ทำการเตรียมมีความหนาแน่น 0.6 g/cm^3 ใช้การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที และใช้กาวที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาปริมาณแป้งข้าวเหนียวและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมแผ่นใยไม้อัดโดยผสมเส้นใยสับปะรดกับกาวในสัดส่วน 1:1 โดยน้ำหนักเมื่อขึ้นเป็นแผ่นแล้ว จากนั้นนำไปทดสอบ สมบัติทางกายภาพโดยการหาความหนาแน่น ทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการหาค่ามอดุลัสแตกร้าว ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและค่าความแข็งแรง จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

ผลการศึกษาปริมาณแป้งข้าวเหนียว

ปริมาณแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความหนืดของกาวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำมาผสมกับเส้นใยสับปะรด เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีค่ามอดุลัสแตกร้าว ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไปจะไปดึงโปรตอนในอะมิโลเพกทิน ทำให้หมู่ $-OH$ เปลี่ยนเป็น $-ONa^+$ ซึ่งจะช่วยให้แป้งดูดน้ำมากขึ้น เม็ดแป้งพองตัวมากขึ้น ทำให้ความหนืดของกาวเพิ่มขึ้น หากเพิ่มปริมาณ $NaOH$ มากขึ้นก็จะทำให้เกิดการดึงโปรตอนจากอะมิโลเพกทินมากขึ้นทำให้ค่าความหนืดของกาวเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำมาผสมกับเส้นใยสับปะรดเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นใยไม้อัดจะทำให้ชิ้นงานที่เตรียมได้มีค่ามอดุลัสแตกร้าว ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้น

แป้งข้าวเหนียวมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำกาว เพราะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอะมิโลเพกทิน เกิดการคืนรูปยาก การปรับปรุงให้มีสมบัติกาวดีขึ้นทำได้โดยเติมต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวติดแน่น ทำให้ขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดได้

5.2 การนำไปใช้ประโยชน์

1. นำไปเป็นวัสดุบุผาผนังหรือเพดานห้อง เพราะไม่มีสารพิษจากฟอร์มาลดีไฮด์ เนื่องจากใช้กาวที่ทำจากธรรมชาติ จึงเป็นมิตรต่อผู้คนและสิ่งแวดล้อม
2. นำไปทำเป็นของตกแต่งภายในบ้าน เช่น กรอบรูป เฟอร์นิเจอร์ของใช้ต่างๆ หรือใช้ติดแผ่นป้ายโฆษณา เป็นต้น
3. สามารถใช้เป็นวัสดุกึ่งกันกระแทกได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มสารป้องกันเชื้อรา
2. ควรมีการควบคุมระดับความชื้นของเส้นใยให้แน่นอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของกาว
3. ควรมีการทาแลกเกอร์เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน และความแข็งแรง
4. ในขั้นตอนการผสมควรทำในภาชนะที่มีฝาปิดเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของเส้นใย
5. ในขณะที่ทำการอบชิ้นงานควรกลับชิ้นงานเพื่อป้องกันการโค้งงอของชิ้นงาน และเมื่อนำชิ้นงานมาวางพักไว้ที่อุณหภูมิห้องควรวางทับด้วยก้อนอิฐเพื่อป้องกันการโค้งงอ
6. ควรศึกษาเพื่อหาวิธีการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นใยไม้อัดจากแป้งชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรธรรม อุ๋นจิตติชัย. 2541 . เทคโนโลยีทางไม้เกี่ยวกับอุตสาหกรรม การผลิตแผ่นปาร์ติเกิล (แผ่นขึ้นไม้อัด) และกรรมวิธีผลิต. กลุ่มพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้
- [2] กมลทิพย์ มุมิ และ รัชนีกุล บุญหนูกลับ. 2541. การปรับปรุงพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยมะพร้าวโดยวิธีการต่อกิ่งแบบรีดอกซ์. ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [3] กล้าณรงค์ ศรีรอด
- [4] จินดารัฐ วีระวุฒิ, สืบประวัติและสรีระวิทยาการเจริญเติบโตของสับปะรด, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.
- [5] C.P. Sideris, B.H. Krauss, and H.Y. Young, *DISTRIBUTION OF NITROGENOUS AND CARBOHYDRATE FRACTIONS AND OTHER SUBSTANCES IN EXPOSED AND COVERED PINEAPPLE SISTER SHOOTS*, Plant Physiol. 1940 April; 15(2): 225-255.
- [6] Modern Particalboard and Dry-process fiberboard manufactory
- [7] Sirinun W. and Supansa O. *Particleboards of Polystyrene/Bagasses for Sound Absorption*. Bachelor of Science Degree King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2002
- [8] Thanawan A. *Sound Absorption and Thermal Insulation of Particleboard nade from Bagasses and Polystyrene Foam*. Master of Science Degree King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2004
- [9] วรางคณา วงศ์สิโรจน์กุล อภิสรา เรืองกุล อรณลิน ศิริวรรณ *ศึกษาการเตรียมแผ่นใยไม้อัดที่ความหนาแน่น 300 กก.ม³ จากเส้นใยมะพร้าวผสมโฟมพอลิสไตรีน*, ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] Prawit Arunwattanachok , *Study of Sound Absorption and Flame Retardant Properties of Particleboard made from Bagasses Coconut Coir and Polystyrene Foam*, Master of Science Degree King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2005
- [11] สุขปา เนตรประดิษฐ์ ธนธร ทองสัมฤทธิ์ นัทศน์ ทิพยโสตนัยนา พัฒนาระดาชไบสับปะรด ให้เหมาะสมต่อการพิมพ์บรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] นันทยา เก่งเขตรกิจและจันทร์ารวรรณ พุ่มชูศักดิ์ ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิโอสไตรีนโดยใช้เส้นใยสับปะรดเป็นตัวเสริมแรง
- [13] R.M.N. Arib, S.M. Sapuan, M.M.H.M. Ahmad, M.T. Paridah, H.M.D. Khairul Zaman. *Mechanical properties of pineapple leaf fiber reinforced polypropylene composites*, Materials & Design, Volume 27, Issue 5, 2006, Pages 391-396
- [14] Narendra Reddy and Yiqi Yang. *Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications*, Trends in Biotechnology, Volume 23, Issue 1, January 2005, Page 22-27.
- [15] Roberts S.A. ; Cameron R.E., *The effect of concentration and sodium hydroxide on the rheological properties of potato starch gelatinisation*, Carbohydrate Polymers, Volume 50, Number 2, 1 November 2002, pages 133-143.
- [16] <http://peuford.com.au/main.php?ID=M>, *Cassava starch in paper, textile and adhesives industries*.
- [17] MTB80, MJB13N, Avonset, *ABOUT STARCH MODIFICATION*, Fieldsize 6360, 5350.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณสูตรการผลิตแผ่นไม้อัด

- ทำการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่น 0.6 กรัม/ลบ.ซม ขนาด 30x30x0.9 cm
- ใช้เส้นใยสับปะรด 486 กรัม
- เมื่อปริมาณการต่อเส้นใยสับปะรดเป็น 1:1 จะได้ว่าจะต้องใช้กาวที่เตรียมได้เป็น 486 กรัม ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความหนืดของกาวแป้งข้าวเหนียวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในแต่ละสูตร

แป้ง:NaOH:น้ำ (กรัม)	ความหนืด(CP) $\times 10^3$					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
10:0:100	11.5	11.0	12.0	11.0	11.5	11.4 \pm 0.37
10:3:100	13.0	15.0	14.5	14.0	15.0	14.3 \pm 0.74
10:5:100	15.5	14.5	16.0	15.5	14.0	15.1 \pm 0.73
10:10:100	16.0	16.0	15.5	15.0	15.5	15.6 \pm 0.37
20:0:100	14.0	14.5	15.0	14.0	14.0	14.3 \pm 0.40
20:3:100	17.5	18.5	18.0	17.5	19.0	18.1 \pm 0.58
20:5:100	18.5	18.5	19.0	18.5	17.5	18.4 \pm 0.48
20:10:100	19.0	19.5	19.5	20.0	19.5	19.5 \pm 0.31
30:0:100	17.5	17.0	18.0	17.5	17.5	17.5 \pm 0.31
30:3:100	22.0	21.5	21.5	19.5	21.0	21.1 \pm 0.86
30:5:100	22.0	22.0	20.0	21.5	21.5	21.4 \pm 0.73
30:10:100	23.5	23.0	22.5	22.5	21.0	22.3 \pm 0.70

ตารางแสดงค่าความกว้าง ความยาว มอดุลัสแตกร้าว และมอดุลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้ ของแผ่นใยไม้อัดจากใบสับประดผสมกาวแบ่งข้าวเหนียวและโซเดียมไฮดรอกไซด์

แป้ง:NaOH:น้ำ (กรัม)	ชั้น	ความกว้าง (mm)						ความหนา(mm)						MOR (N/mm ³)	MOE (N/mm ³)
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย		
10:3:100	1	51.3	50.2	49.7	48.9	51.9	50.4	10.9	10.7	9.9	10.8	10.7	10.6	0.30	10.1
	2	49.8	50.1	50.2	50.9	49.9	50.18	11.3	11.1	11.7	10.9	11.1	11.22	0.40	10.9
	3	50.7	50.3	51.0	50.6	50.1	50.54	11.1	11.6	12.1	11.3	12.0	11.62	0.56	15.6
														0.42±0.10	12.2±2.42
10:5:100	1	49.8	49.5	49.1	50.2	50.4	49.8	10.4	10.9	9.9	9.8	9.4	10.08	0.28	15.8
	2	48.1	50.3	48.4	49.1	48.2	48.82	11.5	12.0	11.7	12.1	11.8	11.82	0.46	12.7
	3	50.1	50.9	50.1	49.8	49.9	50.16	9.8	10.1	9.5	9.8	10.1	9.86	0.55	9.0
														0.43±0.10	12.5±2.78
10:10:100	1	50.2	49.8	50.2	50.3	50.3	50.16	10.5	9.9	10.3	10.4	10.8	10.38	0.47	34.4
	2	49.7	50.1	51.2	50.8	49.1	50.18	11.4	11.6	11.6	11.1	10.9	11.32	0.65	29.9
	3	50.3	50.5	51.4	51.7	51.4	51.06	9.8	9.5	10.1	9.5	9.6	9.7	0.46	25.6
														0.53±0.08	29.9±3.59
20:3:100	1	49.8	49.2	49.5	48.8	49.2	49.3	11.6	12.0	11.6	11.7	12.1	11.8	0.65	27.7
	2	53.2	53.1	53.0	53.1	55.5	53.18	12.1	12.7	12.2	12.3	12.5	12.36	0.46	35.6
	3	48.1	49.1	49.0	49.7	48.1	48.8	12.3	12.8	12.5	12.7	12.9	12.64	0.72	32.4
														0.61±0.10	31.9±3.24
20:5:100	1	51.6	50.8	50.2	49.7	49.8	50.42	12.3	12.3	12.1	11.6	11.3	11.92	0.34	28.6
	2	50.9	50.7	51.0	52.5	52.7	51.56	12.3	12.1	12.2	12.1	11.6	12.06	0.81	42.3
	3	48.2	49.9	50.3	50.4	50.0	49.76	11.4	11.3	11.1	10.7	11.4	11.18	0.77	25.4
														0.64±0.21	32.1±7.32
20:10:100	1	48.5	48.1	48.4	49.6	48.3	48.58	9.9	9.9	9.8	9.4	9.2	9.64	0.43	40.2
	2	51.3	52.4	52.5	52.0	52.0	52.44	9.2	9.8	10.4	10.7	9.8	9.98	0.85	28.7
	3	50.4	49.9	50.1	50.3	50.3	50.2	10.3	9.9	10.1	9.8	9.7	9.96	0.70	34.1
														0.66±0.17	34.33±4.69

ตารางแสดงค่าความกว้าง ความยาว มอดุลัสแตกร้าว และมอดุลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้ ของแผ่นใยไม้อัดจากใบสับประดผสมกาวแป้งข้าวเหนียวและโซเดียมไฮดรอกไซด์

แป้ง:NaOH:น้ำ (กรัม)	ชั้น	ความกว้าง (mm)						ความหนา (mm)						MOR (N/mm ³)	MOE (N/mm ³)
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย		
30:3:100	1	50.1	50.7	50.9	51.1	51.2	50.81	12.3	12.3	12.1	12.4	12.45	12.31	0.69	47.5
	2	52.1	52.1	51.4	50.9	49.4	51.18	11.9	12.4	12.3	12.0	12.02	12.02	0.54	31.8
	3	49.3	50.5	50.4	51.3	51.6	50.62	12.6	11.85	12.9	12.2	12.35	12.35	0.83	40.0
														0.68±0.12	39.76±6.41
30:5:100	1	50.3	50.7	51.5	52.0	50.7	51.04	11.1	11.1	10.85	10.11	10.6	10.91	1.02	39.3
	2	49.6	48.9	49.1	48.4	49.8	49.16	10.9	11.3	10.7	10.8	10.9	10.92	0.69	54.4
	3	52.7	52.8	51.85	52.4	51.8	52.39	10.65	11.9	11.6	10.6	11.1	11.7	0.42	30.5
														0.71±0.24	41.4±9.86
30:10:100	1	49.6	51.1	52.2	49.8	48.1	50.16	9.1	9.1	9.25	9.1	9.9	9.24	0.82	61.8
	2	50.8	49.5	49.3	48.4	49.3	49.46	9.4	9.1	9.8	9.8	9.9	9.6	1.08	49.8
	3	49.1	49.7	50.3	50.1	50.7	50.08	9.1	9.9	9.1	8.8	9.1	9.2	0.93	59.2
														0.94±0.10	56.93±5.15

ตารางแสดงค่าความแข็งกตของแผ่นใยไม้อัดจากใบสับปะรดผสมกาวจากแป้งข้าวเหนียวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในแต่ละสูตร

แป้ง:NaOH:น้ำ (กรัม)	ค่าที่วัดได้										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10:3:100	12	10	14	15	26	20	16	26	27	18	18.4±5.83
10:5:100	11	10	21	25	20	22	20	24	17	21	19.1±4.78
10:10:100	22	19	16	17	18	23	24	15	21	19	19.4±2.87
20:3:100	23	19	22	18	25	16	16	20	15	23	19.7±1.03
20:5:100	26	31	26	27	22	28	30	20	23	29	26.2±3.40
20:10:100	29	30	28	35	32	32	29	25	34	33	30.7±2.90
30:3:100	20	20	24	26	23	21	19	19	16	32	22.0±4.28
30:5:100	26	24	33	22	29	28	27	26	30	24	26.9±4.11
30:10:100	31	37	39	30	29	39	35	26	40	30	33.6±4.73