

การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งสำหรับการผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก

นางสาวธิดารัตน์ กาญจนธนาเลิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PULPING OF STARCH-REMOVED CASSAVA RESIDUE FOR LINERBOARD
PRODUCTION

Miss Thidarat Kanjanathanalert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเชื้อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง สำหรับการผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก
โดย	นางสาววิภารัตน์ กาญจนธนาเลิศ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญญา หาญสืบสาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ณัฐญา ดียิ่ง)

ธิดารัตน์ กาญจนธนาเลิศ : การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง
สำหรับการผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก. (PULPING OF STARCH-REMOVED
CASSAVA RESIDUE FOR LINERBOARD PRODUCTION) อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. กุณทีนี สุวรรณกิจ, 148 หน้า.

กากมันสำปะหลังถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตแป้ง ซึ่งมีปริมาณ
เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่พอสมควร จึงอาจนำไปผสมกับเยื่อกระดาษเพื่อทดแทนการใช้
เยื่อกระดาษจากไม้และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากมันอีกทางหนึ่ง โดยงานวิจัยนี้จะทำการ
ผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการนำมาผลิตกระดาษแข็ง
ประเภทลูกฟูกจากกากมันสำปะหลังที่เอาแป้งออก เนื่องจากแป้งที่อยู่ภายในกากมันส่งผลต่อ
คุณภาพของเส้นใยในการขึ้นแผ่นกระดาษ เริ่มจากการคัดขนาดกากและสกัดแป้งออกด้วย
แอลฟา-อะไมเลส จากนั้นทำการผลิตเยื่อในภาวะกรด กลาง ต่าง พบว่ากากมันที่ผลิตจาก
ภาวะต่างจะให้คุณภาพที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงนำกากมันที่สกัดแป้งแล้วส่วนหนึ่งมาทำการต้มเยื่อ
แบบโซดาในภาวะที่ใช้อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน นำไป
ผสมกับเยื่อใยสั้นในสัดส่วนการร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ ขึ้นแผ่นและทดสอบสมบัติ
ต่างๆ พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเยื่อคือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน
120 นาที ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากจะให้กระดาษที่มีความ
แข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุดในทุกภาวะการผลิตเยื่อทั้งหมด จากนั้นนำกากมันที่สกัดแป้งแล้ว
ส่วนที่เหลือมาทำการบดเยื่อ 2 ระดับ ได้แก่ บดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้อยู่ในช่วง 350 ± 30
มิลลิลิตร และบดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้เท่ากับเยื่อจากภาวะการต้มที่ดีที่สุด คือ 244 ± 6
มิลลิลิตร นำกากมันจากการต้มที่ดีที่สุดและกากบด 2 ระดับไปผสมกับเยื่อกล่องกระดาษ
ลูกฟูกเก่าในสัดส่วนการร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ เพื่อขึ้นแผ่นและทดสอบสมบัติ
กระดาษ พบว่ากากมันที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะสามารถลดปริมาณกระดาษเส้นใย
ซึ่งเป็นปัญหาหลักในงานวิจัยนี้ไปได้มากกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล และยังให้สมบัติทาง
กายภาพของกระดาษที่เหนือกว่า ทั้งนี้สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิติต
ปีการศึกษา 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5272670923 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : CASSAVA RESIDUE / STARCH-REMOVED / ALPHA-AMYLASE /
CHEMICAL PULPING / MECHANICAL PULPING

THIDARAT KANJANATHANALERT : PULPING OF STARCH-REMOVED
CASSAVA RESIDUE FOR LINERBOARD PRODUCTION.

ADVISOR : KUNTINEE SUVARNAKICH, Ph.D., 148 pp.

Cassava residue is a waste from starch industry which contains considerable amount of cellulose and hemicellulose. It could be mixed with pulps as a substitution for wood-based fibers and turned into value-added products. This research aimed to find the suitable method for pulping starch-removed cassava residue, as starch interferes with the ability of fibers to form the sheet, for linerboard production. Cassava residue was screened and starch-extracted by alpha-amylase for acid, neutral and alkaline pulping. It was found that alkaline pulping produced pulp with highest quality. In order to find optimum pulping conditions, starch-removed cassava residue was again soda pulped using conditions which varied in cooking temperature, time and NaOH concentration. These pulps were then blended with hardwood pulp at the ratio of 10:90 w/w and made into handsheets. It was found that the optimum pulping condition is with 18% NaOH at 100°C for 120 minutes where it gave best tensile strength. The pulp from the optimum condition was then compared with cassava residue mechanically pulped by beating to the freeness of 350±30 milliliters and 244±6 milliliters, by blending with Old Corrugated Container (OCC) pulp at the ratio of 10:90. It was found that soda pulping of cassava residues could reduce shives which was the major problem of this research, better than mechanical pulping. In addition, it gave better physical properties. Print density of sheets from chemical pulp was found to be similar to that of mechanical pulp.

Field of Study : Pulp and Paper Technology Student's Signature

Academic Year : 2011..... Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างยิ่ง ที่กรุณาสละเวลาในการแนะนำ ให้ความรู้ คำปรึกษา ดูแลและมอบคำแนะนำดีๆ ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหาลดการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางเป็นที่ปรึกษา ให้กำลังใจ ดูแลเอาใจใส่รวมถึงเตือนสติยามพลาดเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบริษัทเอนเนิร์ลสตาร์ช จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์วัสดุดิบและเงินทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการวิจัยงานเบื้องต้นและให้การดูแลเอาใจใส่ ช่วยเหลือตลอดงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบริษัทเอ็คก้า เคมิคัลส์ จำกัด, ประเทศไทย สำหรับความอนุเคราะห์สารกันชื้น (Alkyl Ketene Dimer; AKD) สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีสำหรับการอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข และดร. ณัฐญา ดียิ่ง กรรมการสอบเป็นอย่างดี กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางพร้อมให้ความช่วยเหลือตลอดงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ มารดา คุณน้า และทุกคนในครอบครัวที่มอบความรัก ความเข้าใจ ดูแลเอาใจใส่ ให้กำลังใจพร้อมให้แรงใจดีๆ รวมถึงการสนับสนุนตลอดงานวิจัยเป็นอย่างดีเยี่ยมจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษรวมถึงภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือ ชี้แนะวิธีการวิจัย ดูแลเอาใจใส่และให้กำลังใจ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 มันสำปะหลัง.....	6
2.1.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมันสำปะหลัง.....	6
2.1.1.2 องค์ประกอบของหัวมันสำปะหลัง.....	7
2.1.1.3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม.....	11
2.1.2 กากมันสำปะหลัง.....	14
2.1.3 แป้งมันสำปะหลัง.....	15
2.1.3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง.....	15
2.1.3.2 กลไกของการย่อยแป้ง.....	17

2.1.3.3 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง.....	20
2.1.4 การใช้ประโยชน์และผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง.....	21
2.1.5 วัตถุประสงค์ในการผลิตเยื่อและกระดาษ.....	21
2.1.5.1 เส้นใย.....	21
2.1.5.2 ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย.....	24
2.1.6 โครงสร้างของเส้นใย.....	25
2.1.6.1 ชั้นมิดเดิลลามาเมลลา.....	25
2.1.6.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย.....	26
2.1.7 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย.....	26
2.1.7.1 เซลลูโลส.....	26
2.1.7.2 เฮมิเซลลูโลส.....	27
2.1.7.3 ลิกนิน.....	29
2.1.7.4 สารแทรก.....	30
2.1.8 การผลิตเยื่อกระดาษ.....	30
2.1.8.1 การผลิตเยื่อไม้บดหรือเยื่อเชิงกล.....	31
2.1.8.2 การผลิตเยื่อเคมี.....	31
2.1.8.3 การผลิตเยื่อกึ่งเคมี.....	32
2.1.9 ปฏิกริยาของลิกนินและคาร์โบไฮเดรตในการผลิตเยื่อแบบโซดา.....	33
2.1.10 การบดเยื่อ.....	33
2.1.11 กระดาษลูกฟูก.....	34
2.1.11.1 โครงสร้างของกระดาษลูกฟูก.....	34
2.1.12 การพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	36
2.1.12.1 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	38
2.1.12.2 กระดาษสำหรับระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	38
2.1.12.3 คุณภาพงานพิมพ์.....	39
2.1.12.4 การประเมินคุณภาพการพิมพ์.....	40
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44

3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	44
3.1.1	วัตถุดิบและสารเคมี.....	44
3.1.2	วัสดุและเครื่องมือ.....	45
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.2.1	การทดลองตอนที่ 1: หาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อด้วยวิธี เชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งออก.....	47
3.2.1.1	การคัดขนาดกากมันสำปะหลัง.....	47
3.2.1.2	การขจัดแป้ง.....	48
3.2.1.3	การผลิตเยื่อเชิงเคมี.....	49
3.2.1.4	ขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบ.....	50
3.2.2	การทดลองตอนที่ 2: หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธี เชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง.....	51
3.2.2.1	การคัดขนาดและขจัดแป้ง.....	51
3.2.2.2	การผลิตเยื่อ.....	51
3.2.2.3	ขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบ.....	53
3.2.2.4	วิเคราะห์ข้อมูล.....	56
3.2.3	การทดลองตอนที่ 3: เปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและ เชิงกลของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้ว.....	57
3.2.3.1	การผลิตเยื่อเชิงกล.....	57
3.2.3.2	การเตรียมเยื่อรีไซเคิล.....	58
3.2.3.3	ขึ้นแผ่นกระดาษแข็งประกบลูกฟูก.....	58
3.2.3.4	ทดสอบสมบัติกระดาษ.....	59
3.2.3.5	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	61
3.2.3.6	วิเคราะห์ผลเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	62
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	63
4.1	ผลการทดลองตอนที่ 1: หาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิง เคมีจากกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งออก.....	63
4.1.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้อง	

จุลทรรศน์.....	63
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกากมันสำปะหลัง.....	64
4.1.3 ผลของการผลิตเยื่อเชิงเคมีต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ผลิตได้	
.....	66
4.1.3.1 ความหนาแน่น.....	66
4.1.3.2 ความเรียบ.....	67
4.1.3.3 ความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	69
4.1.3.4 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ.....	70
4.1.3.5 ความต้านทานแรงฉีก.....	72
4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2: หากภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง.....	73
4.2.1 ปริมาณต่างตกค้างในเยื่อ.....	74
4.2.2 ผลผลิตเยื่อที่ได้.....	77
4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย.....	79
4.2.4 สมบัติทางกายภาพของกระดาษ.....	88
4.2.5 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาภาวะการผลิตเยื่อที่ดีที่สุด.....	97
4.3 ผลการทดลองตอนที่ 3: เปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลของกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วเพื่อนำไปผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก.....	102
4.3.1 ค่าสภาพระบายได้และผลผลิตเยื่อที่ได้.....	102
4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย.....	103
4.3.3 สมบัติกระดาษ.....	107
4.3.3.1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษ.....	107
4.3.3.2 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ.....	122
4.3.3.3 สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษ.....	125
4.3.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	127
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	131
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	131

5.1.1 ผลการหาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีจาก กากมันสำปะหลังที่จัดแบ่งออก.....	131
5.1.2 ผลการหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกาก มันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง.....	131
5.1.3 ผลการเปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลของกากมัน สำปะหลังที่จัดแบ่งแล้ว.....	132
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	133
รายการอ้างอิง.....	134
ภาคผนวก.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	148

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลังสด.....	9
2-2	ส่วนประกอบหลักของเนื้อมันสำปะหลังแห้ง.....	9
2-3	ส่วนประกอบในกากมันสำปะหลังแห้ง (กรัม/100กรัมของน้ำหนักกากมัน สำปะหลัง).....	14
2-4	ค่าความละเอียดและปริมาตรบ่อหมักบนลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์กับประเภทงาน พิมพ์ฉลากที่เหมาะสม.....	38
3-1	คุณลักษณะของกระดาษเหนียวสำหรับผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก.....	62
4-1	องค์ประกอบเคมีในกากมันสำปะหลัง (ร้อยละ).....	65
4-2	ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการผลิตเยื่อ ระดับต่างๆ ต่อสมบัติของเยื่อโดยใช้วิธี ANOVA แบบ factorial design.....	97
4-3	ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการผลิตเยื่อ ระดับต่างๆ ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยโดยใช้วิธี ANOVA แบบ factorial design.....	98
4-4	ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการผลิตเยื่อ ระดับต่างๆ ต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตขึ้นโดยใช้วิธี ANOVA แบบ factorial design.....	99
4-5	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของเส้นใย (ค่าเฉลี่ย±SD).....	103
4-6	ค่าความดำ (Print density) เฉลี่ยบริเวณพื้นตายของงานพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยความ ละเอียดของลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์ (Ink anilox resolution) 4 ระดับ บนกระดาษที่ ผลิตขึ้น.....	125
4-7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาษ และการเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาษต่อลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของเส้นใย โดยวิธี ANOVA แบบ single factor.....	128
4-8	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาษ และการเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาษต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตขึ้นโดยวิธี ANOVA แบบ single factor.....	129

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ลักษณะของลำต้น ใบ ราก และหัวมันสำปะหลัง.....	7
2-2	ภาพตัดขวางของหัวมันสำปะหลัง.....	8
2-3	กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสไลด์แห้งหรือแป้งมันสำปะหลังเกรด หนึ่ง.....	13
2-4	ลักษณะเม็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	15
2-5	โครงสร้างของอะไมโลส.....	16
2-6	โครงสร้างของอะไมโลเพคติน.....	17
2-7	กลไกการเกิดเจลของแป้ง.....	19
2-8	ชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง.....	23
2-9	โครงสร้างของเส้นใย.....	25
2-10	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	27
2-11	โครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบ (Crystalline region) และไม่เป็นระเบียบ (Amorphous region) ของเส้นใย.....	27
2-12	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส.....	28
2-13	โครงสร้างของโมเลกุลลิกนิน.....	30
2-14	โครงสร้างของกระดาษลูกฟูก.....	35
2-15	ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบจ่ายหมึก.....	37
2-16	เครื่องทดสอบสภาพพิมพ์ได้สำหรับระบบการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี IGT F1.....	41
2-17	เครื่องวัดความดำ IHARA R730 Color Reflection Densitometer.....	41
3-1	การคัดขนาดกากมันสำปะหลังด้วยตะแกรงขนาด 25 เมชและ 50 เมช ตามลำดับ.....	47
3-2	เครื่องตีกระจายเยื่อ.....	48
3-3	เครื่องต้มเยื่อ.....	50
3-4	เครื่องตีกระจายเยื่อ.....	50
3-5	เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Kothen.....	51
3-6	เครื่องวิเคราะห์เส้นใย.....	52

ภาพที่	หน้า
3-7	เครื่องวัดความหนา..... 53
3-8	เครื่องวัดความเร็ว..... 54
3-9	เครื่องวัดความต้านทานการซึมอากาศ..... 54
3-10	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง..... 55
3-11	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะเล..... 56
3-12	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก..... 56
3-13	เครื่องหาค่าสภาพระบายได้..... 57
3-14	เครื่องบดเยื่อ..... 58
3-15	เครื่องวัดค่าความแข็งดึงของกระดาษ..... 59
3-16	อุปกรณ์วัดค่าการดูดซึมน้ำ..... 60
3-17	เครื่องวัดแรงกด..... 60
3-18	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง..... 61
4-1	ภาพถ่ายเส้นใยจากก้านจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10x..... 63
4-2	ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากก้าน มันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากก้าน มันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO ₃) โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+ C ₂ H ₅ OH) ตามลำดับ ในสัดส่วน กากร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ..... 66
4-3	ความเร็วของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากก้าน มันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากก้าน มันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO ₃) โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+ C ₂ H ₅ OH) ตามลำดับ ในสัดส่วน กากร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ..... 68
4-4	ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสม จากก้านมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสม จากก้านมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO ₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+ C ₂ H ₅ OH) ตามลำดับ ในสัดส่วนกากร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ..... 69

ภาพที่	หน้า
4-5	71
4-6	72
4-7	75
4-8	77
4-9	80
4-10	82
4-11	83
4-12	84
4-13	86
4-14	87
4-15	88

ภาพที่		หน้า
4-16	ความเรียบของกระดาษที่ผลิตขึ้น.....	90
4-17	ความต้านทานการซีมอากาศของกระดาษที่ผลิตขึ้น.....	91
4-18	ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตขึ้น.....	93
4-19	ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตขึ้น.....	95
4-20	ความหนาแน่นของกระดาษชนิดต่างๆ.....	107
4-21	ความเรียบของกระดาษชนิดต่างๆ.....	109
4-22	ความต้านทานการซีมอากาศของกระดาษชนิดต่างๆ.....	110
4-23	ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษชนิดต่างๆ.....	112
4-24	ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษชนิดต่างๆ.....	114
4-25	ความแข็งตึง (Stiffness) ของกระดาษชนิดต่างๆ.....	115
4-26	การดูดซีมน้ำ (Cobb test) ของกระดาษชนิดต่างๆ.....	117
4-27	ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) ของกระดาษชนิดต่างๆ.....	119
4-28	ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring crush) ของกระดาษชนิดต่างๆ.....	121
4-29	ความขาวสว่าง (Brightness) ของกระดาษชนิดต่างๆ.....	122
4-30	ความทึบแสง (Opacity) ของกระดาษชนิดต่างๆ.....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอัตราการใช้กระดาษในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ส่งผลให้อัตราการผลิตกระดาษเพื่อสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักในการผลิตกระดาษจะใช้เยื่อกระดาษที่ทำมาจากเนื้อไม้ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณต้นไม้ที่สามารถนำมาใช้งานได้มีปริมาณลดน้อยลง เนื่องจากการปลูกทดแทนทำไม่ได้ไม่ทัน จึงได้มีความพยายามหาแหล่งวัตถุดิบใหม่มาทดแทน โดยเยื่อกระดาษที่ไม่ได้ทำจากเนื้อไม้ (Non-wood fibers) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของภาคอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น มาใช้งาน นอกจากนี้จะเป็นการลดปริมาณการใช้เยื่อจากต้นไม้แล้ว ยังมีคุณภาพดีพอสำหรับนำไปผลิตเป็นกระดาษได้อีกด้วย โดยเยื่อกระดาษที่ไม่ได้ทำจากเนื้อไม้เหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ หรือที่เรียกว่า เยื่อรีไซเคิล ส่วนใหญ่จะนำไปผลิตเป็นกระดาษลูกฟูก กระดาษแข็ง และกระดาษหนังสือพิมพ์เป็นหลัก

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการส่งออกเป็นรายใหญ่ของโลก เนื่องจากสามารถเพาะปลูกและขยายพันธุ์ได้ง่าย รวมถึงการทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ จึงสามารถปลูกได้ทั่วทุกภูมิภาค จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรรายงานว่า เนื้อที่การเก็บเกี่ยวและผลผลิตมันสำปะหลังของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2549-2553 มีอัตราที่เพิ่มสูงขึ้น โดยในปีการเพาะปลูก 2552/53 ประเทศไทยมีเนื้อที่การเก็บเกี่ยวมันสำปะหลัง 7,302,839 ไร่ ซึ่งให้ผลผลิตมันสำปะหลังถึง 22,005,740 ตัน ส่วนใหญ่จะนำไปผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลัง ทำให้เกิดกากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตแป้ง โดยข้อมูลที่ได้รับจากสื่อออนไลน์ของโครงการสำราญกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรายงานว่า หัวมันสำปะหลังสดที่รับมาจากเกษตรกรทุกๆ 1 กิโลกรัม จะผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ประมาณ 0.2 กิโลกรัม และกากมันสำปะหลังที่เป็นผลพลอยได้จะอยู่ที่ 0.04-0.09 กิโลกรัมโดยเฉลี่ย ซึ่งกากมันสำปะหลังที่ได้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ เพราะเห็ด ผลิตภัณฑ์และเชื้อเพลิงเอทานอล แต่จากที่ได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง พบว่ามีปริมาณเส้นใยเป็น

องค์ประกอบอยู่ประมาณ 15-50% รองจากปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการสกัดและสายพันธุ์ของมันสำปะหลัง ดังนั้นเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่มีปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่พอสมควร จึงอาจนำไปผสมกับเยื่อกระดาษเพื่อทดแทนการใช้เยื่อกระดาษจากไม้และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากมันสำปะหลังอีกทางหนึ่ง แต่เนื่องจากกากมันสำปะหลังยังคงมีแป้งหลงเหลืออยู่ในปริมาณมาก (ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งแป้งเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพของกากเมื่อนำไปผลิตเยื่อและขึ้นแผ่นกระดาษ อาทิเช่น การสุกของแป้ง เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถเลือกใช้ภาชนะในการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ เพราะเมื่อแป้งสุก กากจะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขึ้น ส่งผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ในแง่ของความเรียบและความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำกากมันสำปะหลังที่ผ่านขั้นตอนการขจัดแป้งออกแล้วมาทำการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการนำมาผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก ให้ได้สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงแสง และคุณภาพทางการพิมพ์ที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

หาภาวะที่เหมาะสมและเปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการคัดขนาดกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงาน (บ. เยนเนรัลสตาร์ช) ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช นำกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาทำการขจัดแป้งที่อยู่ภายในกากมันสำปะหลังออกไปด้วยแอลฟา-อะไมเลส (Activity = 21084.24 LU/ml) จากนั้นนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) จนอุณหภูมิสูง 90 องศาเซลเซียส จึงทำการจับเวลาต่ออีก 10 นาที บั่นให้แห้ง ชั่งน้ำหนักและวัดความชื้น ตามลำดับ

1.3.2 ทำการผลิตเยื่อโซดา โดยแบ่งกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วส่วนหนึ่งมาทำการต้มเยื่อแบบโซดาในภาวะต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นร้อยละ 18, 20, 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง อุณหภูมิ 100, 120, 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 และ 180 นาที จากนั้นนำกากมันสำปะหลังแต่ละภาวะไปผสมกับเยื่อไม้ (Hardwood) ในสัดส่วนกากมันสำปะหลังร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ เพื่อขึ้นแผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัม/ตารางเมตร ทำการ

ทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของกระดาษ วิเคราะห์ผลเพื่อหาภาวะที่ดีที่สุด จากนั้นนำเยื่อจากการต้มด้วยภาวะที่ดีที่สุดไปหาค่าสภาพระบายได้ (Freeness)

1.3.3 ทำการผลิตเยื่อเชิงกล โดยนำกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วส่วนที่เหลือมาทำการบดเยื่อ 2 ระดับ ได้แก่ บดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้อยู่ในช่วง 350 ± 30 มิลลิลิตร และบดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้เท่ากับเยื่อจากภาวะการต้มที่ดีที่สุดจากข้อ 1.3.2

1.3.4 นำกากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการต่างๆ มาผสมกับเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (Old Corrugated Container ; OCC) ในสัดส่วนกากมันสำปะหลังร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ จากนั้นนำเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกก้อน (ภาวะควบคุ่ม) ไปเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ แป้งประจุบวกซึ่งเป็นสารให้ความแข็งแรง และสารกันซึม (AKD : Alkyl ketene Dimer) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.2 และ 0.5 ของน้ำหนักกระดาษ ตามลำดับ จากนั้นขึ้นแผ่นกระดาษแข็งประกบลูกฟูกให้ได้น้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัม/ตารางเมตร ทำการพิมพ์พื้นตาย (Solid) บนกระดาษแข็งประกบลูกฟูกด้วยระบบเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ (Water-based flexography) และทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้วด้วยวิธีโซดา และทำการเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกล

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

- กากมันสำปะหลังที่นำมาวิจัยในแต่ละครั้งมีความแปรปรวนค่อนข้างมากจากปัจจัยที่หลากหลาย ได้แก่ ช่วงการเพาะปลูก สายพันธุ์ เป็นต้น ทำให้ปริมาณแป้งภายในกากมันสำปะหลังมีค่าไม่คงที่ในแต่ละการทดลอง ส่งผลต่อขั้นตอนการขจัดแป้งในงานวิจัย อีกทั้งวิธีการตรวจสอบแป้งที่เหลืออยู่ในกากมันสำปะหลังด้วยไอโอดีนเป็นเพียงการยืนยันเบื้องต้นว่าแป้งได้ถูกกำจัดไปหมดแล้ว แต่ยังไม่ใช่วิธีการที่เชื่อถือได้แน่นอน เนื่องจากเป็นการสุ่มตัวอย่างมาตรวจสอบเพียงบางจุด จึงอาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้

- บอมบ์ (Bomb) ที่ใช้สำหรับต้มเยื่อ ภายในจะมีลักษณะเป็นช่องรูอยู่ตรงบริเวณส่วนฐาน ทำให้กากมันสำปะหลังที่บรรจุเข้าไปมีโอกาสค้างติดอยู่ภายในช่องรูนั้นได้ ส่งผลต่อ

ปริมาณผลผลิตเยื่อที่วัดได้ (Pulp yield) ภายหลังจากการต้มค่อนข้างแปรปรวนเนื่องจากปริมาณกากมันที่สูญหายไปภายในบอมบี้

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การขจัดแป้ง เป็นกระบวนการย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลด้วยการใช้กรด (Acid hydrolysis) หรือเอนไซม์ (Enzymatic hydrolysis) ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายมากกว่า เนื่องจากไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องมือและเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง โดยเอนไซม์ที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-อะไมเลส (α - amylase) เบต้า-อะไมเลส (β - amylase) และกลูโค-อะไมเลส หรือแกมมาอะไมเลส (Glucosyl amylase หรือ γ -amylase)

การผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping) หมายถึง กระบวนการใดๆ ที่สามารถทำให้เส้นใยในเนื้อไม้หรือวัสดุอื่นๆ เกิดการแยกตัวออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (Individual fiber) เพื่อให้เหมาะสมต่อการผลิตกระดาษ แบ่งได้เป็น 2 กระบวนการใหญ่ๆ คือ กระบวนการผลิตเยื่อไม้บดหรือเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่อาศัยพลังงานเชิงกลในการทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการให้ความร้อนร่วมด้วยเพื่อทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง จึงสามารถแยกเส้นใยออกจากกันได้โดยง่าย และกระบวนการการผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ใช้ทั้งพลังงานความร้อนและสารเคมีเพื่อนำเอาลิกนินออกมาให้ได้มากที่สุด ทำให้เส้นใยสามารถแยกตัวออกจากกันได้ง่าย

การผลิตเยื่อแบบโซดา (Soda pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบเคมีที่เป็นต่าง ซึ่งนิยมใช้กับการผลิตเยื่อจากพืชไม่มีเนื้อไม้ (Non-wood) โดยสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียว

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะและวิธีการที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งสำหรับการผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 ดำเนินการทดลองขั้นต้นเพื่อดูแนวโน้มงานวิจัย

- 1.8.3 วางแผนงานและทำการทดลองตามขั้นตอน
- 1.8.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.8.5 เรียบเรียงเนื้อหา ส่งผลงานเพื่อเผยแพร่และเขียนวิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

- 1.9.1 หาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่
ขจัดแป้งออก
- 1.9.2 หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่
ผ่านการขจัดแป้ง
- 1.9.3 เปรียบเทียบการผลิตเชื้อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลของกากมันสำปะหลังที่ผ่าน
การขจัดแป้งแล้ว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชดั้งเดิมของชาวพื้นเมืองในแถบเขตร้อนของทวีปอเมริกา บริเวณตอนใต้ของประเทศเม็กซิโกลงไปจนถึงประเทศบราซิล ซึ่งชนแถบนั้นจะมีการปลูกมันสำปะหลังสำหรับการทำเป็นอาหาร ช่วงประมาณกลางศตวรรษที่ 16 ชาวโปรตุเกสได้นำมันสำปะหลังจากประเทศบราซิลซึ่งเป็นประเทศแถบทวีปอเมริกาได้เข้าไปสู่ทวีปแอฟริกา โดยใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารในเรือค้าทาส ปัจจุบันนี้มันสำปะหลังยังคงถูกใช้เป็นอาหารหลักที่สำคัญของชาวแอฟริกันอยู่ โดยในปี 2519 ศูนย์บริการประกันคุณภาพอาหาร (FQA) ได้รายงานว่าทวีปแอฟริกาเป็นทวีปที่มีการผลิตมันสำปะหลังมากที่สุด ระหว่างคริสต์ศตวรรษที่ 17-18 ชาวโปรตุเกส ดัตช์ และสเปนได้นำมันสำปะหลังเข้ามายังประเทศต่างๆ ในแถบทวีปเอเชีย โดยปัจจุบันประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมาก คือ อินโดนีเซีย ไทย และอินเดีย ซึ่งมีการผลิตมากเป็นอันดับที่ 2, 5 และ 6 ของโลก ตามลำดับ โดยประเทศอินโดนีเซียและประเทศอินเดียนั้นจะใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งอาหารหลักของพลเมืองในประเทศ เนื่องจากมีการผลิตข้าวไม่เพียงพอต่อความต้องการ ในส่วนของประเทศไทยนั้นผลิตได้ถึง 7.8 ล้านตัน ซึ่งมากเป็นอันดับ 5 ของโลก แต่เนื่องจากประเทศไทยมีการผลิตข้าวสำหรับใช้บริโภคและยังเหลือสำหรับการส่งออก ดังนั้นการใช้มันสำปะหลังภายในประเทศจึงมีเพียง 5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกนั้นจะเป็นการแปรรูปเพื่อส่งออกจำหน่ายยังต่างประเทศ ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงนับว่าเป็นประเทศที่มีการส่งออกมันสำปะหลังมากที่สุดในโลก [1]

2.1.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชเขตร้อน มีชื่อเรียกโดยทั่วไปในภาษาอังกฤษว่า แคสซาวา (Cassava) หรือทาพิโอคา (Tapioca) และมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า แมนนิฮอท เอสคูเลินตา แครนทซ์ (*Manihot esculenta* Crantz) ซึ่งอยู่ในวงศ์ (Family) Euphorbiaceae (ซึ่งรวมถึงยางพาราและละหุ่ง) สกุล (Genus) *Manihot* ชนิด (Species) *esculenta* สำหรับประเทศไทย มันสำปะหลังจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญประเภทหนึ่ง ปลูกมากในภาคตะวันออกและภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือ โดยประเทศไทยมีการส่งออกเป็นรายใหญ่ของโลก เนื่องจากสามารถเพาะปลูกและขยายพันธุ์ได้ง่าย รวมถึงการทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ จึงสามารถปลูกได้ทั่วประเทศ โดยทั่วไปมันสำปะหลังจะมีลำต้นขนาดเล็ก ลักษณะคล้ายข้อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-6 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 2-4 เมตร ลำต้นบริเวณใกล้ยอดจะมีสีเขียว ส่วนที่ต่ำลงมาจะมีสีที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของสายพันธุ์ เช่น สีเงิน สีเหลือง และสีน้ำตาล เป็นต้น ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนที่อยู่เหนือดิน คือ ลำต้นและกิ่งก้าน ใบมีก้านใบยาวติดกับลำต้น แผ่นใบเว้าเป็นแฉกมี 3-9 แฉก อีกส่วนคือ ส่วนที่อยู่ใต้ดิน เป็นรากของลำต้น มี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ใช้เป็นอาหารของพืช และแบบที่เป็นการกระจายเชิงรัศมี (Axial disposition) อยู่รอบๆ ลำต้น รวมเรียกว่า “หัว” โดยทั่วไปจะมีประมาณ 5-20 หัว แต่ละหัวยาวประมาณ 20-80 เซนติเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-10 เซนติเมตร สามารถบริโภคได้ ซึ่งรากของมันสำปะหลังจัดได้ว่าเป็นรากฝอย (Fibrous root system) ประเภทหนึ่ง ถือเป็นแหล่งสะสมอาหาร โดยมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ และมีปริมาณโปรตีนและไขมันอยู่เพียงเล็กน้อย [1] ดังแสดงในภาพที่ 2-1

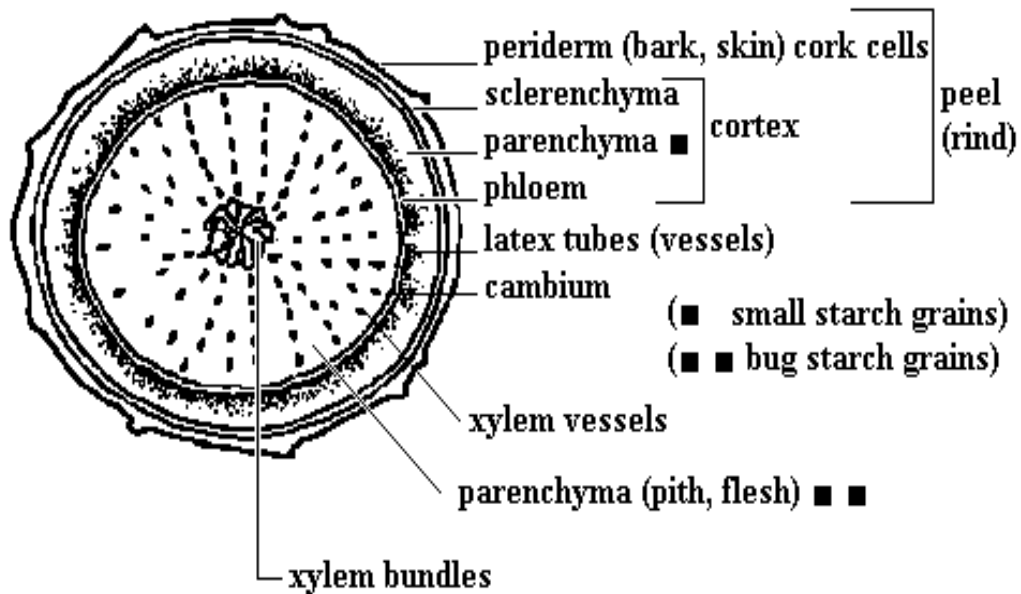


ภาพที่ 2-1 ลักษณะของลำต้น ใบ ราก และหัวมันสำปะหลัง [2]

2.1.1.2 องค์ประกอบของหัวมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีการเก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชเกิดการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่มีสีเขียวแล้ว จะมีการเก็บสะสมอาหารในรูปของคาร์โบไฮเดรตซึ่งก็คือ แป้งไว้ในราก โดยที่ความสามารถในการสร้างและเก็บสะสมแป้งในรากนั้น จะมีความแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยที่หลากหลาย อันได้แก่ สายพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุการเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว เป็นต้น ทำให้ส่วนประกอบภายในหัวมันมีความแตกต่างกัน

ตามไปด้วย โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังจะประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อในชั้นเพอริเดิร์ม (Periderm), สเกลอแรงคิมา (Sclerenchyma), คอร์ติคัลพาเรงคิมา (Cortical parenchyma), และโฟลเอ็ม (Phloem) ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ซึ่งลักษณะสรีระของหัวมันนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามสายพันธุ์ของมันสำปะหลัง [3, 4]



ภาพที่ 2-2 ภาพตัดขวางของหัวมันสำปะหลัง [5]

ทั้งนี้ลักษณะและส่วนประกอบในหัวมันสำปะหลังที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ปริมาณแป้ง ไซยาไนด์ เบลีอก (เยื่อใย) และสารประกอบที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแป้ง เป็นต้น [3, 4] ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และ 2-2

ตารางที่ 2-1 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลังสด [3]

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (กรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21 - 75.32
เปลือก	4.08 - 14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87 - 41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85 - 39.27

ตารางที่ 2-2 ส่วนประกอบหลักของเนื้อมันสำปะหลังแห้ง [3]

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (กรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9 - 85.0
โปรตีน	1.57 - 5.78
เยื่อใย	1.77 - 3.95
เถ้า	1.20 - 2.80
ไขมัน	0.06 - 0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59 - 8.66

- **ปริมาณแป้ง** มันสำปะหลังถือเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานแก่คนและสัตว์ได้ดีที่สุด ซึ่งในประเทศไทยนั้นจะมีการใช้มันสำปะหลังมากที่สุดในอุตสาหกรรมแป้งและแป้งแปรรูป แสดงให้เห็นว่าปริมาณแป้งที่อยู่ในหัวมันสำปะหลังจะมีความสำคัญมากที่สุดในบรรดาค่าประกอบทั้งหมด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งอยู่สูง จะมีน้ำน้อยและความหนาแน่นของหัวมันสูง ในปัจจุบันจึงมีการปรับปรุงสายพันธุ์ของมันสำปะหลังให้มีแป้งและผลผลิตในปริมาณที่สูง เมื่อหัวมันมีอายุมากขึ้น ปริมาณแป้งก็จะมีมากขึ้น

ตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า อายุ สายพันธุ์ และสิ่งแวดล้อมต่างก็มีผลต่อคุณภาพของแป้งทั้งสิ้น [3, 4]

- **ปริมาณไซยาไนด์** ไซยาไนด์เป็นสารพิษที่พบอยู่ในพืชมากถึง 3,000 ชนิดด้วยกัน หนึ่งในนั้นก็รวมถึงมันสำปะหลังด้วย จนถึงปัจจุบันยังไม่มีรายงานว่ามีมันสำปะหลังสายพันธุ์ใดที่ปราศจากกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) เลย นอกจากนี้สายพันธุ์ที่ต่างกัน ยังส่งผลต่อปริมาณสารพิษที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งสารพิษชนิดนี้จะพบอยู่ในส่วนต่างๆ ของมันสำปะหลัง โดยเฉพาะในใบและเปลือกจะมีสารพิษชนิดนี้อยู่มากกว่าในเนื้อสด[3] อย่างไรก็ตามเราสามารถพบกรดไฮโดรไซยานิกอยู่ในหัวมันสำปะหลังได้ตั้งแต่ 14 - 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากงานวิจัยพบว่าอายุการเก็บเกี่ยวจะมีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลัง โดยมันสำปะหลังในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 8-10 เดือน จะมีปริมาณไซยาไนด์อยู่ประมาณ 210 ไมโครกรัมต่อกกรัม ส่วนมันสำปะหลังที่ช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 12 เดือนนั้น จะมีปริมาณไซยาไนด์ต่ำประมาณ 16 ไมโครกรัมต่อกกรัม และด้วยเหตุที่มันสำปะหลังนั้นมีองค์ประกอบของกรดไฮโดรไซยานิกซึ่งเป็นสารพิษอยู่ ดังนั้นก่อนการนำมันสำปะหลังมาบริโภคควรมีการผ่านกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนและแสงแดดตลอดจนการหมัก เพื่อให้กรดตัวนี้สามารถแปรสภาพไปอยู่ในรูปที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้เสียก่อน [4, 6]

- **ปริมาณเปลือก (เยื่อใย)** ความหนาและปริมาณของเปลือกถือได้ว่าเป็นประโยชน์สำหรับการขนส่ง ในทางกลับกันการที่ยังมีเปลือกและเยื่อใยในเนื้อในติดอยู่ภายหลังจากการนำมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตตั้งแต่การชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณแป้ง จนกระทั่งนำไปผ่านกระบวนการล้างแล้ว จะเป็นการเพิ่มปริมาณเยื่อใยหรือกากมัน (Pulp) ส่งผลให้เกิดภาวะในการสกัดเพิ่มมากขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดลดน้อยลง โดยเปลือก (เยื่อใย) ของหัวมันสำปะหลังจะนับตั้งแต่ส่วนที่เรียกว่า แคมเบียม (Cambium) ออกไปจนถึงชั้นเพอริเดิร์ม ดังแสดงในภาพที่ 2-2 หน้า 8 [4]

- **สารประกอบที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแป้ง** สีในเนื้อแป้งจะมีความแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ของหัวมัน ซึ่งจะพบเห็นได้ตั้งแต่สีขาวนวลจนถึงสีเหลือง โดยที่ลักษณะของสีที่เป็นผลมาจากสายพันธุ์หรือการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวขึ้น จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อกระบวนการผลิต ดังนั้นมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมแป้งควรจะมีเนื้อมันสีขาวและสามารถคงสีขาวไว้ได้นานพอสมควร เพื่อให้ได้เนื้อแป้งที่มีคุณภาพดี [4]

จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้น นอกจากน้ำแล้วก็คือ แป้ง ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 70-80 ขององค์ประกอบภายในหัวมันสำปะหลังทั้งหมด โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังจะมีปริมาณแป้งอยู่สูง ปริมาณน้ำน้อย และมีความหนาแน่นของหัวมันสูง ด้วยเหตุนี้ในการตรวจสอบหรือทำการวัดปริมาณแป้งที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและเป็นที่ยอมรับ คือการตรวจสอบความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำน้อยแสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำมากและมีแป้งอยู่น้อย ในทางกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมากจะแสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำน้อยและมีแป้งมาก [3]

2.1.1.3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม

กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสไลด์แห้งหรือแป้งมันสำปะหลังเกรดหนึ่ง (First grade tapioca starch) แสดงดังภาพที่ 2-3 มีขั้นตอนดังนี้ [4, 6]

- การเตรียมวัตถุดิบ หัวมันสำปะหลังจะถูกส่งเข้าสู่ตะแกรงร่อนดินทราย (Sand removal drum) เพื่อทำการกำจัดเศษดินและทรายที่ติดมากับหัวมันออกก่อน นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้ผิวภายนอกของหัวมันหลุดลอกออกไปด้วย ซึ่งเศษดิน ทรายและผิวของหัวมันเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ทำปุ๋ยอินทรีย์ต่อไป จากนั้นหัวมันที่ถูกปอกเปลือกแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องล้างหัวมัน (Root washer) เพื่อล้างทำความสะอาดหัวมันโดยอาศัยน้ำฉีดพาเอาเศษดินที่ยังคงหลงเหลืออยู่ที่หัวมันให้หลุดออกไปกับน้ำ โดยน้ำที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นน้ำหมุนเวียนจากกระบวนการผลิต

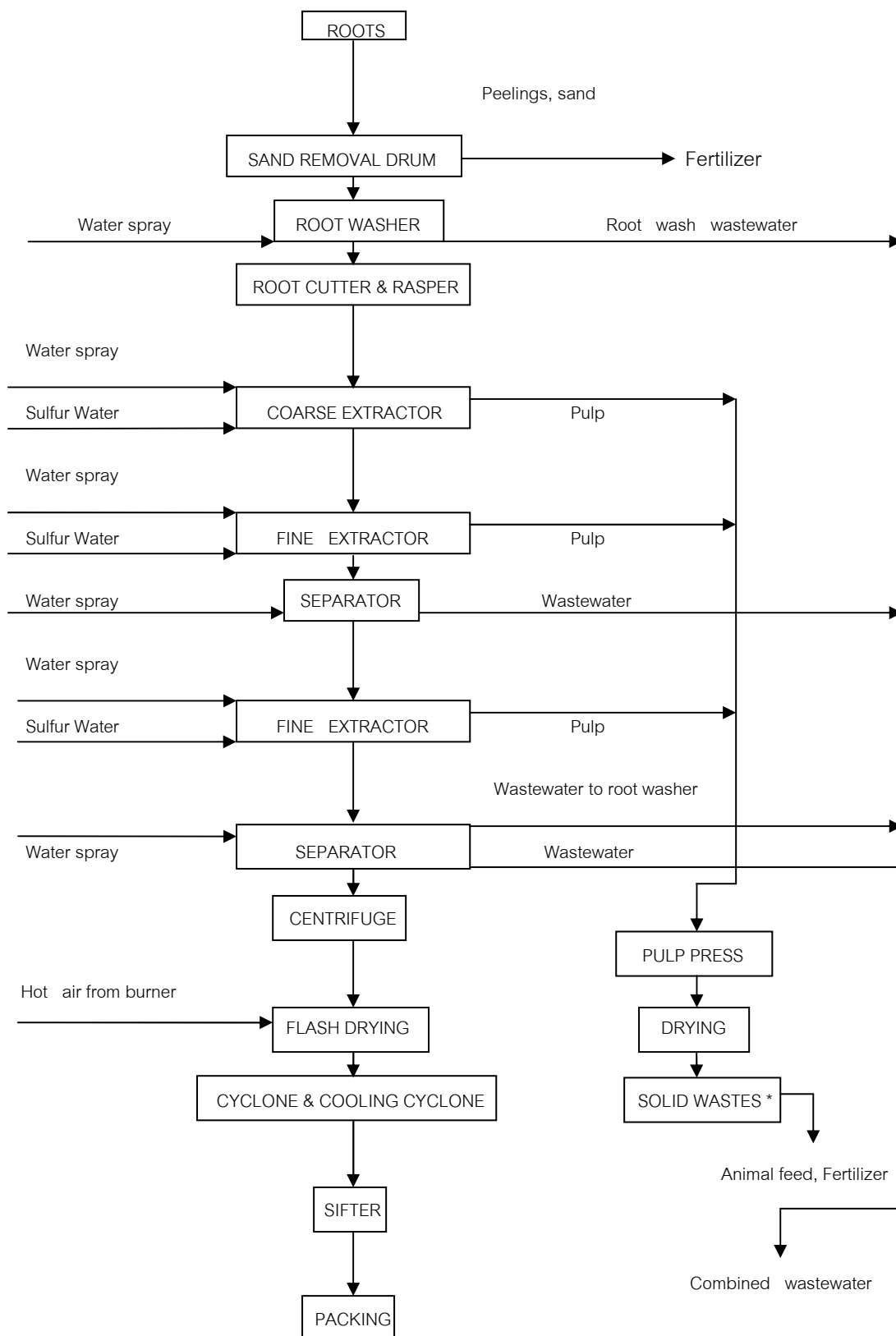
- การม่หัวมันสำปะหลัง หัวมันสำปะหลังที่ถูกล้างทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องสับหัวมัน (Root chopper) ซึ่งจะสับหัวมันให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 1-2 นิ้ว จากนั้นหัวมันชิ้นเล็กๆ เหล่านี้ จะตกเข้าสู่เครื่องขูดหัวมัน (Root rasper) ทำให้ได้มันสำปะหลังชิ้นเล็กละเอียด โดยในระหว่างการม่อนั้นจะมีการเติมน้ำเข้าไปเพื่อช่วยให้การม่หัวมันทำได้ง่ายขึ้น โดยมากน้ำที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นน้ำหมุนเวียน ในขั้นตอนนี้จะได้ของเหลวข้น (Middle fresh pulp) ที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมันและสิ่งเจือปนอื่นๆ

- การขจัดแป้ง ของเหลวข้นที่ได้จากขั้นตอนการม่หัวมันสำปะหลังจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องแยกน้ำทิ้ง (Decanter) เพื่อนำเอาโปรตีนและไขมันออกจากเนื้อแป้ง จากนั้นน้ำแป้งที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่หน่วยขจัดแป้ง ซึ่งเป็นเครื่องแยกน้ำแป้งออกจากเส้นใยและกาก โดยเริ่มจากการนำน้ำแป้งเข้าสู่เครื่องแยกหยาบ (Coarse extractor) เพื่อทำการแยกกากมันสำปะหลังออกจากน้ำแป้ง ซึ่งการทำงานของเครื่องแยกชนิดนี้จะอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ในขณะที่เครื่อง

หมูน้อยจะมีน้ำแป้งส่งเข้ามาตลอดเวลาและในขณะเดียวกันก็จะมีกรรน้ำและน้ำกำมะถันเข้าเครื่องอย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้กากมันสำปะหลัง (Pulp) ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำเข้าสู่เครื่องอัดกาก (Pulp press) และนำไปตากแห้ง ได้ออกมาเป็นกากมันสำปะหลังชนิดแห้ง ซึ่งจะถูกนำไปขายเป็นอาหารสัตว์ต่อไป ส่วนน้ำแป้งที่ถูกแยกออกมาจากกากมันจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องแยกละเอียด (Fine extractor) และเครื่องแยก (Separators) เพื่อแยกกากมันออกให้หมดและทำให้น้ำแป้งเข้มข้นโดยผ่านผ้ากรองที่มีขนาดเล็กลงของเครื่องแยกละเอียด จากนั้นน้ำแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงที่ได้จากเครื่องแยกหน่วยสุดท้ายจะถูกสูบจากถังพักมายังเครื่องสกัดแห้ง โดยเครื่องสกัดนี้จะทำการเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากน้ำแป้งจนกระทั่งได้แป้งหมาดๆ ที่มีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 35-40 ส่วนน้ำที่ถูกแยกออกมาจะยังมีแป้งหลงเหลืออยู่จึงถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องแยกละเอียดหน่วยแรกใหม่

- การอบแห้ง แป้งที่แยกเอาน้ำออกจากขั้นตอนที่แล้วจะถูกพ่นเข้าสู่ท่ออบแห้งซึ่งมีลมร้อนจากเตาเผา (Burner) อุณหภูมิสูงประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส เป่าเข้ามาด้วยอัตรามวลลมและความดันสูง ความแรงของลมจะพัดเอาแป้งขึ้นไปตามปล่องอบแห้งแล้วตกลงมาสู่ไซโคลน (Cyclone) ความร้อนจะทำให้ความชื้นบางส่วนหายไป ได้ออกมาเป็นแป้งมันที่แห้งและละเอียดแต่ยังคงมีความร้อนอยู่ จึงต้องนำไปผ่านขั้นตอนทำให้เย็นลงโดยใช้ไซโคลนเย็น (Cooling cyclone) แป้งที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องร่อนแป้ง (Sifter) ก่อนที่จะทำการบรรจุต่อไป

- การบรรจุและการเก็บรักษา ทำได้โดยการนำแป้งไปบรรจุลงในกระสอบ จากนั้นทำการเรียงกระสอบบนที่รองรับในลักษณะเป็นชั้นๆ โดยพยายามหลีกเลี่ยงการทับซ้อนกันถึง 4-5 เมตร



ภาพที่ 2-3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสไลด์แห้งหรือแป้งมันสำปะหลังเกรดหนึ่ง [7]

2.1.2 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม โดยข้อมูลที่ได้รับจากสื่อออนไลน์ของโครงการสาธิตนวัตกรรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรายงานว่า หัวมันสำปะหลังสดที่รับมาจากเกษตรกรทุกๆ 1 กิโลกรัม จะผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ประมาณ 0.2 กิโลกรัม และกากมันสำปะหลังที่เป็นผลพลอยได้จะอยู่ที่ 0.04-0.09 กิโลกรัมโดยเฉลี่ย ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ภายในกากมันสำปะหลังจะเป็นแป้งประมาณ 50 % และมีเส้นใยอยู่มากพอสมควร ส่วนโปรตีนและไขมันจะมีในปริมาณเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2-3 โดยทั่วไปกากมันสำปะหลังนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่ การผลิตเป็นอาหารสัตว์ การเพาะเห็ด การผลิตก๊าซชีวภาพ และการผลิตเอทานอล เป็นต้น [1, 8]

ตารางที่ 2-3 ส่วนประกอบในกากมันสำปะหลังแห้ง (กรัม/100กรัมของน้ำหนักกากมัน

สำปะหลัง) [9]

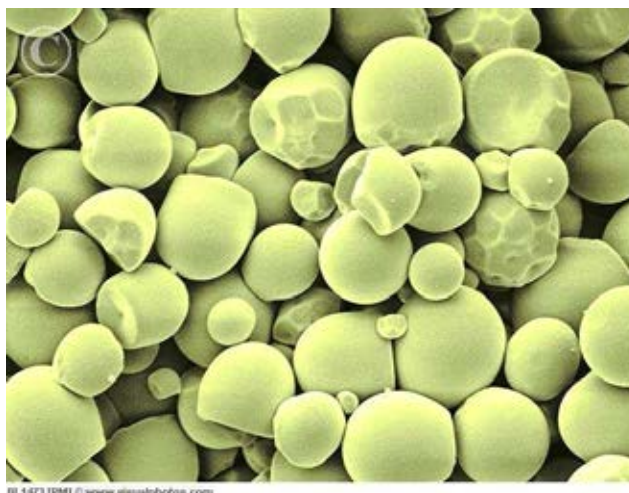
Composition	Soccal (1994)	Cereda (1994)	Sterz (1997)	Vandenberghe (1998)
ความชื้น	5.02	9.52	10.70	11.20
โปรตีน	1.57	0.32	1.60	1.61
ไขมัน	1.06	0.83	0.53	0.54
เส้นใย	50.55	14.88	22.20	21.10
เถ้า	1.10	0.66	1.50	1.44
คาร์โบไฮเดรต	40.50	63.85	63.40	63.00

จากตารางที่ 2-3 แสดงส่วนประกอบในกากมันสำปะหลังแห้ง จากการวิเคราะห์ของนักวิจัยหลายคนพบว่ามีความแตกต่างกัน อาจเกิดจากกระบวนการผลิตที่มีการควบคุมไม่ดี ความแตกต่างจากแหล่งที่มาของพืชและสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน จากตารางจะเห็นว่า คาร์โบไฮเดรตหรือแป้งมีปริมาณมากที่สุดประมาณ 40-60% ถือเป็นส่วนประกอบหลักในกากมันสำปะหลัง รองลงมาคือ ปริมาณเส้นใยที่มีอยู่ประมาณ 15-50% ส่วนความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าจะมีอยู่ในปริมาณเล็กน้อย และด้วยเหตุที่องค์ประกอบหลักในกากมันสำปะหลังคือแป้ง ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆได้มากมาย จึงทำให้กาก

มันสำปะหลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในเชิงวิชาการ เพื่อใช้ในการศึกษาหาวิธีการใช้ประโยชน์จากกากมันที่มีอยู่ในปริมาณมาก หาได้ง่ายและมีราคาถูก [6] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาเส้นใยที่หลงเหลืออยู่ภายในกากมันสำปะหลัง ซึ่งถือเป็นเส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้ (Non-wood fiber) เหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษได้

2.1.3 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับเป็นอาหารให้พลังงาน ซึ่งได้จากธรรมชาติโดยการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช แป้งประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 โดยมีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ [10] ลักษณะทั่วไปของแป้งคือเป็นของแข็งสีขาว ไร้กลิ่น ไร้อรส และไม่ละลายในน้ำเย็น [4] ตามปกติแล้วแป้งที่ได้จากพืชต่างชนิดกันจะมีลักษณะของเม็ดแป้งที่ต่างกัน สามารถตรวจสอบได้จากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะเฉพาะของเม็ดแป้งเหล่านี้จะใช้เป็นตัวระบุชนิดของแป้งได้ โดยทั่วไปมักพบเม็ดแป้งอยู่ตามส่วนต่างๆ ของพืชแทบทุกชนิด ทั้งในบริเวณราก ลำต้นและเมล็ดพืช โดยที่เม็ดแป้งจะมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 กรัม/ลบ.ซม. ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างกลมคล้ายไข่ที่มีรอยตัดหรือเป็นแท่ง มีขนาดประมาณ 5-35 ไมครอน และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-1,000 ไมครอนเมตร [11, 12] ดังแสดงในภาพที่ 2-4



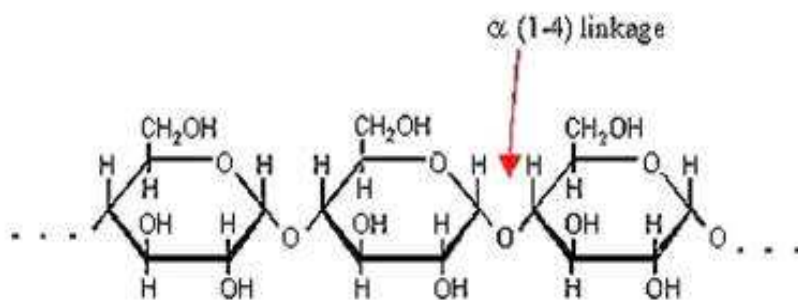
ภาพที่ 2-4 ลักษณะเม็ดแป้งมันสำปะหลัง [13]

2.1.3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยกลูโคสต่อกันเป็นสายโซ่ยาวๆ โดยปฏิกิริยาควบแน่นเซชัน (Condensation polymerization) ซึ่งเป็นปฏิกิริยารวมตัวกัน

ระหว่างกลูโคส 2 โมเลกุล และมีการสูญเสียน้ำออกไป 1 โมเลกุล [11] โดยทั่วไปแป้งจะประกอบไปด้วยพอลิเมอร์พื้นฐาน 2 ชนิด ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติที่แตกต่างกัน คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) โดย

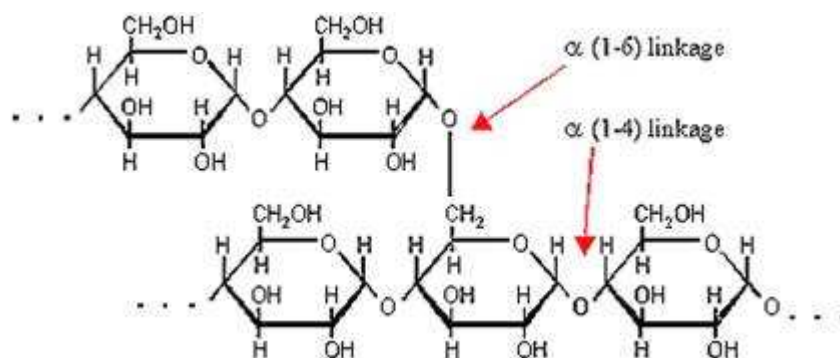
- **อะไมโลส (Amylose)** จะประกอบไปด้วย D-glucose unit ซึ่งอยู่ในรูป pyranose (6-membered ring) เรียงต่อกันเป็นแนวเส้นตรงของหน่วยกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย โดยคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสตัวที่ 1 จะจับกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสตัวที่ 2 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha(1,4)$ glycosidic linkage [14] เป็นสายโซ่ยาว (linear chain) ไม่มีกิ่งก้าน ดังแสดงในภาพที่ 2-5 อะไมโลสมีสมบัติละลายน้ำได้ดี เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ จะทำให้โมเลกุลของอะไมโลสละลายออกมาจากเม็ดแป้ง โดยขณะต้มจะมีลักษณะขุ่น ความหนืดต่ำ แต่ถ้าทำการลดอุณหภูมิลงจะส่งผลให้โมเลกุลของอะไมโลสเกิดการคืนตัวมากขึ้นและมีโอกาสกลับมารวมตัวกันอีกครั้ง หากทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินเข้ม (Intense blue) การจัดเรียงโมเลกุลของอะไมโลสจะค่อนข้างเป็นระเบียบและไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น ในกรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งต่ำ อะไมโลสจะตกตะกอน (Precipitation) แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูงโมเลกุลของอะไมโลสจะรวมตัวกันทำให้เกิดเจล (Gelation) โดยทั่วไปแป้งมันสำปะหลังจะประกอบไปด้วยอะไมโลส ประมาณ 18% [11, 16, 17]



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของอะไมโลส [15]

- **อะไมโลเพคติน (Amylopectin)** เป็นพอลิแซคคาไรด์แบบโซ่กิ่ง ประกอบด้วย D-glucose ซึ่งอยู่ในรูป pyranose เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะแบบ $\alpha(1,4)$ glycosidic linkage [11] และมีกิ่งก้านแตกแขนงออกไปทุกๆ 20-30 หน่วย โดยสายโซ่หลักกับกิ่งก้านจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha(1,6)$ glycosidic linkage ดังแสดงในภาพที่ 2-6 อะไมโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะไมโลสประมาณ 1,000 เท่า โดยจะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบและมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนแก่

สารละลายแป้งที่มีอะไมโลเพคตินสูง แป้งสุกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะใส เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีลักษณะใหญ่และมีกิ่งก้านมาก ทำให้โอกาสที่จะเกิดการจับตัวกันของโมเลกุลอะไมโลเพคตินนั้นเกิดได้น้อย โดยทั่วไปอะไมโลเพคตินจะไม่ละลายน้ำ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอย่างน้อยที่สุดประมาณ 1,000,000 และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนจะให้สีม่วงแดง (Violet red) โดยทั่วไปแป้งมันสำปะหลังจะประกอบไปด้วยอะไมโลเพคตินประมาณ 75-80% [12, 14]



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [18]

2.1.3.2 กลไกของการย่อยแป้ง

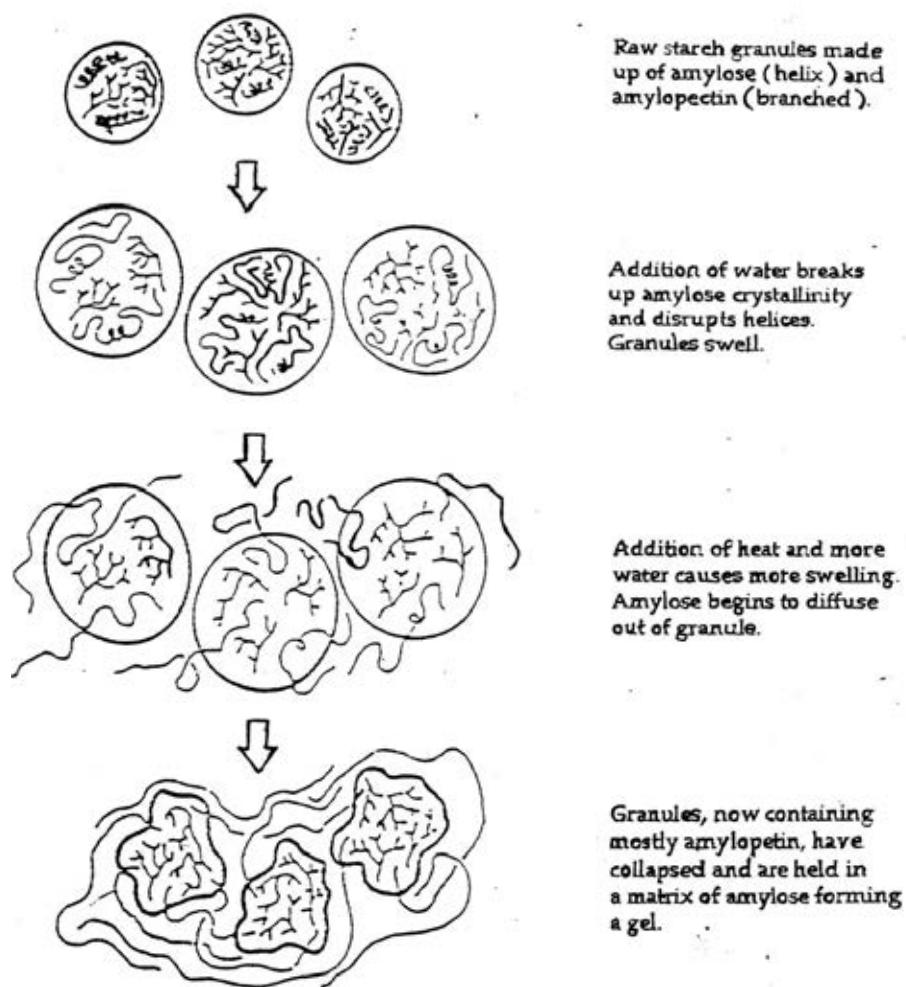
การแปรสภาพเม็ดแป้งตั้งแต่ลักษณะที่เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสจนกระทั่งถูกย่อยสลายไปเป็นโมเลกุลของน้ำตาลที่มีขนาดสั้นลงโดยกระบวนการย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลนี้สามารถทำได้ด้วยกันถึง 2 วิธี คือ การย่อยสลายด้วยการใช้กรด (Acid hydrolysis) หรือเอนไซม์ (Enzymatic hydrolysis) ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เอนไซม์มากกว่า เนื่องจากไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องมือและเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง โดยขั้นตอนการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์จะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

- การเกิดเจลลาตินในเซชัน (Gelatinization)

เจลลาตินในเซชันเป็นกระบวนการที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวอันเนื่องมาจากกลไกการดูดซึมน้ำ (Hydration) ของเม็ดแป้งขณะที่ได้รับความร้อน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่โมเลกุลภายในเม็ดแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) อยู่จำนวนมากและมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) สูง นอกจากนี้อะไมโลเพคตินยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในหรือระหว่างโมเลกุลได้จำนวนมาก ส่งผลให้แรงยึดภายในเม็ดแป้งมีค่าสูงมาก แป้งจึงไม่ละลายตัวในน้ำเย็น หากแต่จะดูดซึมน้ำและทำให้เกิดการพองตัวขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อทำการนำน้ำออกไปจาก

แป้งแล้ว แป้งที่อยู่ในสภาพแห้งจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นผนวกกับการได้รับพลังงานที่สูงเพียงพอจะสามารถทำให้พันธะไฮโดรเจนแยกตัวออกจากกันได้ ส่งผลให้เกิดการทำลายการเรียงตัวแบบผลึก (Crystalline) ของอะไมโลส ทำให้แป้งละลายตัวในน้ำได้ดี และเกิดการพองตัวของเม็ดแป้งขึ้น ทั้งนี้เม็ดแป้งจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 25-30 เท่า ในช่วงอุณหภูมิที่แป้งเกิดการดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็วและเกิดการพองตัวขึ้นนี้ เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดเจล (Gelatinization temperature) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง หากมีการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลนี้และมีน้ำอยู่มากเพียงพอ จะสามารถทำให้อะไมโลสแพร่ออกจากเม็ดแป้งได้ ส่งผลให้เม็ดแป้งยุบตัวลง โมเลกุลของน้ำจึงสามารถเข้าไปสัมผัสกับหมู่ไฮดรอกซิลของหน่วยกลูโคสได้ ส่วนน้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งที่ยุบตัวลงและมีอะไมโลเพคตินอยู่นั้นจะทำให้เกิดเป็นเจล ซึ่งกระบวนการเกิดเจลนี้จะเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับได้และทำให้ความหนืดของแป้งเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2-7

แป้งมันสำปะหลังจะมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลอยู่ที่ประมาณ 52-64 องศาเซลเซียส ซึ่งจะต่ำกว่าธัญพืชชนิดอื่นๆ ทำให้อัตราการเพิ่มความหนืดสูงและเกิดการสลายตัวได้มากกว่าธัญพืชชนิดอื่น นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังยังเกิดการคืนตัวได้ค่อนข้างช้าและเกิดได้น้อย เนื่องจากองค์ประกอบภายในแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะเป็นอะไมโลเพคติน [16]



ภาพที่ 2-7 กลไกการเกิดเจลของแป้ง [16]

- การเกิดลิเคอแฟคชัน (Liquefaction)

เป็นขั้นตอนการลดความหนืดของแป้งที่เจลาติไนซ์ (Gelatinize) แล้วโดยทำการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งแบบสุ่ม (Random hydrolysis) ของลูกโซ่กลูโคส โดยน้ำแป้ง (Slurry) จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α - amylase) เรียกน้ำแป้งในขั้นนี้ว่า "mash" จากนั้นทำการต้มให้สุกโดยหม้อต้ม (Cooker) ที่มีความร้อนสูงถึง 120-140 องศาเซลเซียส และลดความร้อนลงมาที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำแป้งย่อยสลายได้เร็วขึ้นและเป็นการลดปริมาณแบคทีเรียใน mash ส่งผลให้โมเลกุลของแป้งเกิดการแยกเป็นสายสั้นๆ และมีขนาดของโมเลกุลเล็กลง อีกทั้งความหนืดของแป้งจะลดลงด้วย [6, 19]

- การเกิดแซคคาไรฟิเคชัน (Saccharification)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายแป้งให้เป็นโมเลกุลของน้ำตาล โดย mash จากหม้อต้มจะถูกทำให้เย็นลงและเติมด้วยกลูโคสอะไมเลส (Glucosylase หรือ β -amylase) ซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยแป้งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharide) หรือน้ำตาลที่มีโมเลกุลสูงกว่าเล็กน้อย ได้แก่ กลูโคส มอลโตส หรือมอลโทโทรโอส และพร้อมเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป [6, 19]

2.1.3.3 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง

เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล ได้แก่ พวกเอนไซม์อะไมเลส ซึ่งเป็น Extracellular enzyme โดยจะพบทั้งในเซลล์สัตว์ เซลล์พืช และจากการสร้างขึ้นของจุลินทรีย์ สามารถทำการแบ่งชนิดของเอนไซม์อะไมเลสได้ตามตำแหน่งที่เกิดการย่อยสลายแป้งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

- **Endoamylase** จะทำการย่อยสลายแป้งแบบสุ่ม (Random) ที่ตำแหน่ง α (1-4) glycosidic linkage ทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing group) และเดกซ์ทริน (Dextrin) ซึ่งจะมีลูกโซ่กลูโคสขนาดต่างๆ กัน เอนไซม์ประเภทนี้คือ แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) หรือ amylo (1,4) dextrinase ซึ่งมีชื่อเรียกทางเคมีว่า 1,4- α -D-glucan glucanohydrolase [20] โดยทั่วไปการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ชนิดนี้ จะใช้กับแป้งที่ถูกทำให้สุกก่อน เนื่องจากแป้งดิบมีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ (Nondispersible) และมีความต้านทานต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ดังนั้นแป้งที่อยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) หรือแป้งดิบนั้นจะไม่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์นั่นเอง จึงต้องมีการให้ความร้อนแก่แป้ง เพื่อให้แป้งเปลี่ยนสภาพไปอยู่ในรูปสารละลาย ทำให้เกิดการเกิดเป็นเจลขึ้น ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเม็ดแป้งจะขยายตัวจากการดูดซึมน้ำเข้าไป ทำให้แป้งสูญเสียสมบัติที่ทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Polarize) หรือที่เรียกว่า birefringence ไป ส่งผลให้การย่อยสลายด้วยเอนไซม์เกิดได้เร็วขึ้น [21]

- **Exoamylase** จะทำการย่อยสลายแป้งจากปลายนอนรีดิวซ์ (Non-reducing end) เข้าไป เอนไซม์ประเภทนี้ได้แก่ เบต้าอะไมเลส (Beta-amylase) โดยเบต้าอะไมเลส หรือ amylo (1-4) maltosidase หรือ 1, 4- α -D-glucan maltohydrolase จะทำการย่อยสลายแป้งที่ตำแหน่ง α (1-4) glycosidic linkage เข้าไปที่ละ 2 หน่วยของกลูโคส แต่ยังไม่สามารถทำการย่อยสลายที่ตำแหน่งพันธะแบบ α -D-(1-6) linkage ต่อได้ ดังนั้นนอกจากจะได้

น้ำตาลมอลโตส (Maltose) แล้วจะมีพวกลิมิตเดริกตริน (Limit dextrin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงปนออกมาด้วย เนื่องจากการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์นั่นเอง โดยเอนไซม์ชนิดนี้จะพบมากในพืชชั้นสูง อาทิเช่น ธัญพืช และมันเทศ ส่วนกลูโคอะไมเลส (Gluco-amylase) หรือแกมมาอะไมเลส (γ -amylase) หรือ amylo (1-4, 1-6) glucosidase หรือ 1,4- α -D-glucan glucohydrolase จะสามารถย่อยสลายแป้งได้อย่างสมบูรณ์จากปลายอนรีดิวิซที่ตำแหน่ง $\alpha(1-4)$, $\alpha(1-3)$ และ $\alpha(1-6)$ เข้าไปที่ละหน่วย หากเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ขึ้นจะได้กลูโคสเพียงอย่างเดียว [20]

2.1.4 การใช้ประโยชน์และผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ตั้งแต่ยอดจนถึงราก (หัวมัน) เช่น การนำมาใช้ประโยชน์ในด้านครัวเรือนเพื่อการบริโภคเป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ และใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่พวกมันเส้น มันอัดเม็ด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น เพื่อให้ประโยชน์กับมนุษย์และสัตว์ในหลาย ๆ รูปแบบ ตลอดจนการใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป (Modified Starch) และใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้มากมายหลายชนิด อาทิเช่น อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมแอลกอฮอล์ อุตสาหกรรมเอทานอล อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มต่างๆ อุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ รวมไปถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในวงการแพทย์ ด้วย แต่กระนั้นมันสำปะหลังก็ยังคงมีเหลืออยู่ในประเทศปีละมากๆ [22, 23]

2.1.5 วัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษ

2.1.5.1 เส้นใย (Fiber)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อ (Pulp) และกระดาษ (Paper) คือ เส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ทั้งชนิดที่เป็นไม้ยืนต้นและไม้ล้มลุก รวมไปถึงเส้นใยจากผ้าฝ้าย (Cotton) ป่าน ปอ และพืชชนิดอื่นๆ อาทิเช่น ผักตบชวา และกล้วย เป็นต้น ซึ่งพืชเหล่านี้จะมีปริมาณมาก จึงสามารถหาได้ง่ายตามธรรมชาติและยังเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ โดยส่วนใหญ่แล้วแหล่งที่มาของเส้นใยจะได้อาจมาจากเนื้อไม้เป็นหลัก นอกเหนือจากนี้ยังสามารถนำมาจากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ลำต้น (Stem) ใบ (Leaf) และผลของพืชได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำการแบ่งประเภทของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน ดังนี้

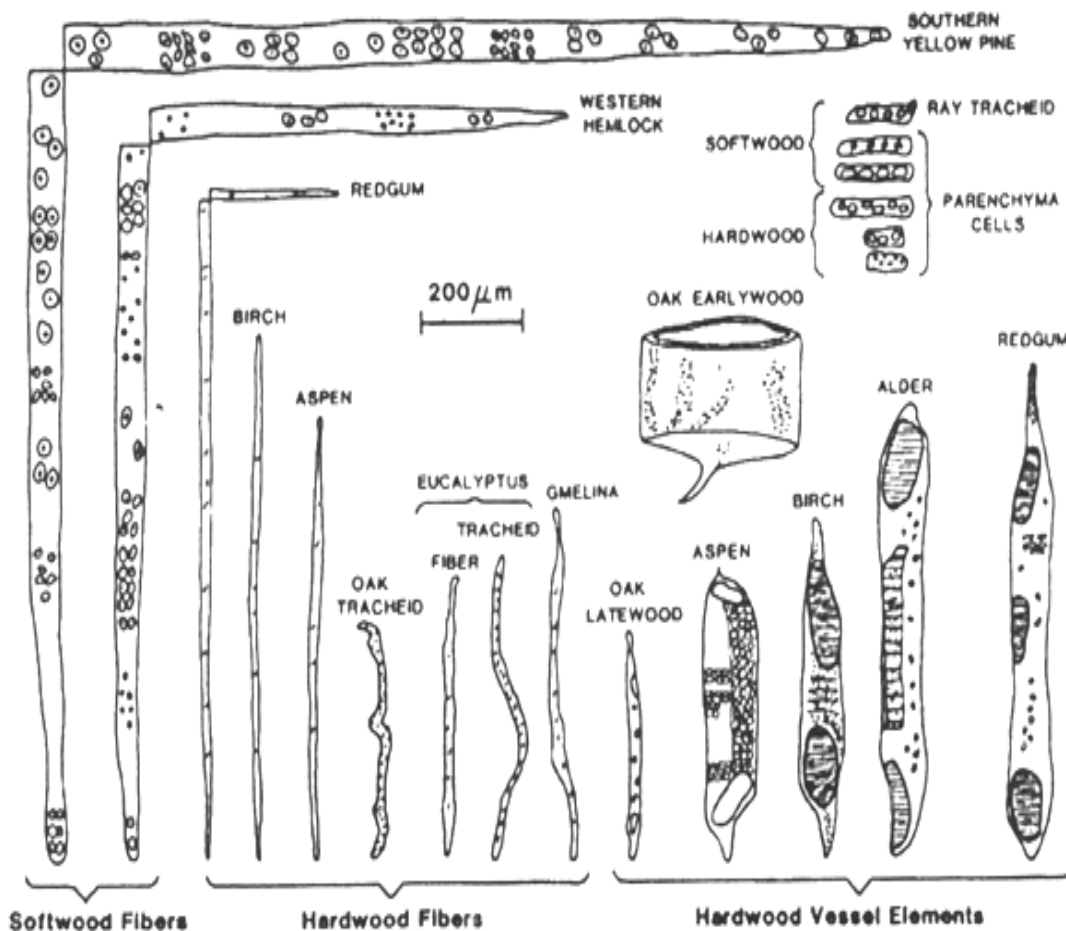
1) **เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ (Wood fiber)** เป็นเส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (Wood) ของพืชเมล็ดเปลือย (Gymnosperm) ในกลุ่มพวกพืชตระกูลสน (Conifers) และ

เนื้อไม้จากพืชดอก (Angiosperms) ในกลุ่มของพืชใบเลี้ยงคู่ (Dicotyledons) ในทางอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษจะสามารถทำการแบ่งประเภทของเนื้อไม้ ออกได้เป็น 2 ประเภท [24-26] ได้แก่

- **ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood)** เส้นใยมีขนาดสั้น ลักษณะใบกว้าง พบมากในประเทศไทย ได้มาจากพืชตระกูลไม้ผลัดใบ ซึ่งมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว เช่น ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) โอ๊ก (Oak) และต้นกระถินเทพา เป็นต้น ไม้เนื้อแข็งจะประกอบไปด้วยเซลล์หลากหลายชนิดมากกว่าในไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้จะขึ้นกับหน้าที่และการทำงานที่ต่างกันเป็นหลัก เช่น เซลล์เวสเซล (Vessel element) ไฟเบอร์เทรคีด (Fiber tracheid) ลิบริฟอร์มไฟเบอร์ (Libriform fiber) เรย์เซลล์ (Ray cell) และเซลล์พาราเอนไคมา (Parenchyma cell) เป็นต้น โดยในที่นี้เซลล์และเส้นใยจะทำหน้าที่ในการเสริมความแข็งแรงให้แก่ลำต้น ส่วนพวกเวสเซลจะช่วยในด้านการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ ความยาวของเส้นใยโดยรวมจะอยู่ที่ประมาณ 0.9-1.5 มิลลิเมตร ความกว้างของเส้นใยประมาณ 19-22 ไมโครเมตร และความหนาของผนังเส้นใยจะอยู่ที่ 3-5 ไมโครเมตร ดังนั้นกระดาษที่ผลิตขึ้นจากไม้เนื้อแข็งจะมีความแข็งแรงต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากไม้เนื้ออ่อน แต่จะให้ความเรียบเนียนของกระดาษที่มากกว่า

- **ไม้เนื้ออ่อน (Softwood)** ลักษณะเส้นใยจะยาว ได้มาจากพืชในกลุ่มพืชตระกูลสนที่มีลักษณะใบแคบ รูปเข็ม ไม้ผลัดใบ เจริญเติบโตช้า พบมากในแถบประเทศเขตร้อน เช่น สนสองใบ และสนสามใบ โดยเซลล์ที่พบมากในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ เทรคีด (Tracheid cell) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและให้ความแข็งแรงแก่พืช เซลล์พาราเอนไคมา (Parenchyma cell) และเรซินเซลล์ (Resin cell) เส้นใยที่พบในไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะค่อนข้างเหนียวและมีความแข็งแรงสูง โครงสร้างค่อนข้างสม่ำเสมอ ความยาวของเส้นใยประมาณ 3-5 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 36-43 ไมโครเมตร และมีความหนาของผนังเซลล์ในช่วง 5-11 ไมโครเมตร เซลล์ในเนื้อไม้จะมีลักษณะเป็นเซลล์รูปร่างยาวและตรง เยื่อที่ได้จากเนื้อไม้เป็นเยื่อใยยาว ซึ่งนิยมนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ

ความแตกต่างระหว่างไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งจะอยู่ที่ชนิดของเซลล์ที่พบในเนื้อไม้เป็นหลัก โดยเซลล์ที่พบในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ เทรคีด (Tracheid) และเซลล์พาราเอนไคมา (Parenchyma cell) ส่วนไม้เนื้อแข็งจะพบเซลล์จำพวก เซลล์เวสเซล เซลล์ไฟเบอร์ และเซลล์พาราเอนไคมาเป็นหลัก [24] ดังแสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [27]

2) เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non-wood fiber) โดยทั่วไปกระบวนการผลิตกระดาษจะนำเอาเส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้มาเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต แต่เนื่องจากในปัจจุบันความต้องการกระดาษมีเพิ่มมากขึ้น จนทำให้วัตถุดิบที่นำมาใช้งานไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงได้มองหาแหล่งวัตถุดิบใหม่มาทดแทน นั่นคือการนำเอาเส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ ซึ่งเป็นเส้นใยที่ค่อนข้างยาว จึงเหมาะสำหรับการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตกระดาษคราฟท์หรือกระดาษกล่อง โดยสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ [27] ดังนี้

- เศษเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมทางการเกษตร (Agricultural and agro-industrial waste) ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น

- พืชล้มลุกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ต้นไผ่ หญ้าต่างๆ ต้นกก ต้นอ้อ เป็นต้น

- พืชล้มลุกที่มีการเพาะปลูกรวมไปถึงเส้นใยที่ได้จากใบ ได้แก่ ป่าน ปอสา ปอกระเจา ลินินและฝ้าย เป็นต้น

เนื้อไม้ในที่นี้จะหมายถึงความถึงเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำแบบทุติยภูมิ (Secondary xylem) ดังนั้นจึงสามารถพบเนื้อไม้ได้เฉพาะในพืชที่มีการเจริญเติบโตแบบทุติยภูมิ (Secondary growth) ที่เกิดอย่างเนื่องกันเป็นระยะเวลาอันยาวนาน จนมีปริมาณมากพอที่จะเกิดลักษณะของการเป็นเนื้อไม้ได้เท่านั้น [24]

2.1.5.2 ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (Non-fibrous materials)

ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยจะเป็นสารเติมแต่ง (Additives) ที่เติมเข้าไปในระหว่างขั้นตอนการผลิตกระดาษเพื่อช่วยให้สมบัติกระดาษที่ผลิตได้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยสารเติมแต่งในที่นี้จะมีมากมายหลายชนิด ขึ้นกับกรรมวิธีการผลิตของแต่ละโรงงานเป็นหลัก แต่ที่นิยมใช้กันมาก [24, 28] มีดังนี้

- **ตัวเติม (Filler)** คือ สารที่เติมเข้าไปในกระดาษเพื่อให้กระดาษมีสมบัติเชิงแสงในด้านความขาว ความทึบแสงดีขึ้น อีกทั้งความเรียบของกระดาษและความสามารถในการรับหมึกเพิ่มมากขึ้น ตลอดจนการลดการซึมผ่านของหมึกพิมพ์ได้ อาทิเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น โดยการเติมสารต่างๆ เหล่านี้ลงไปในกระดาษ จะเป็นการลดต้นทุนในการใช้เยื่อกระดาษได้อีกด้วย

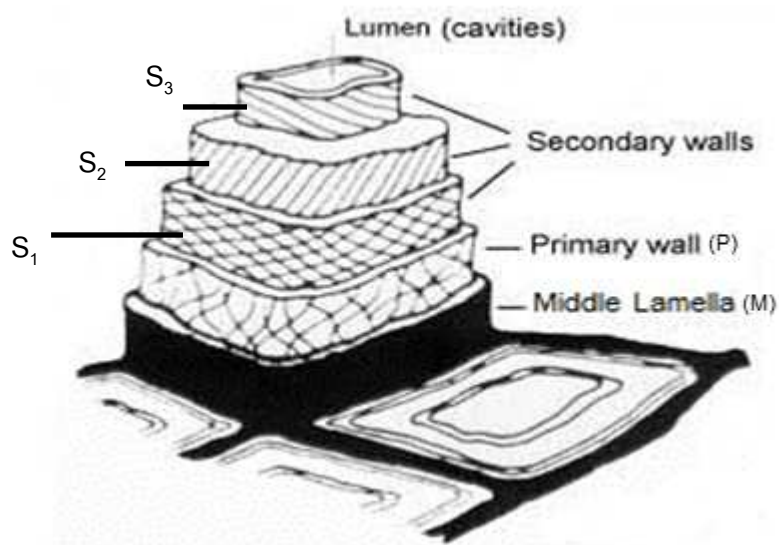
- **สารกันซึม (Sizing Agent)** เป็นสารที่เติมลงไปในน้ำเยื่อเพื่อช่วยลดการซึมของของเหลวที่เข้าไปในเนื้อกระดาษ มีทั้งสารที่ทำจากธรรมชาติและสารที่สังเคราะห์ขึ้นเอง เช่น alum-rosin, ASA, AKD เป็นต้น

- **สารเพิ่มความแข็งแรงต่างๆ** เช่น สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ (Dry strength agent) โดยทำการเติมลงไปในน้ำเยื่อก่อนการขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ (Wet end) เพื่อช่วยทำให้เส้นใยกระดาษเกิดการสร้างพันธะกันได้ดี ในขณะที่กระดาษเกิดการแห้งตัว มีสมบัติคือสามารถละลายน้ำได้ สารเพิ่มความแข็งแรงที่นิยมใช้ [29, 30] ได้แก่ แป้งประจุบวก (Cationic starch) ซึ่งเป็นแป้งที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง โดยตัวแป้งจะมีประจุบวก สามารถเกิดพันธะไฮออนิก

กับประจุลบของเซลลูโลสที่ใช้ในการผลิตกระดาษได้ ทำให้เส้นใยภายในกระดาษเชื่อมติดกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้น [31] โดยทั่วไปปริมาณแบ่งประจุบวกที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษประมาณร้อยละ 0.5-2.5 โดยน้ำหนักแห้งของเยื่อกระดาษ ถ้าใส่มากเกินไปเส้นใยจะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเส้นใย (Flocculation) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษลดลงได้ [32] นอกจากนี้ยังมีพวกกัมจากพืช (Natural vegetable gums) และพอลิเมอร์อะคริลาไมด์ (Acrylamide polymers) [29, 30] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารเพิ่มความแข็งแรงขณะเปียก สีย้อม และสารเพิ่มความขาวสว่าง [33] เป็นต้น

2.1.6 โครงสร้างของเส้นใย (Fiber structure)

โครงสร้างของเส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ คือ ชั้นมิดเดิลลามেলা (Middle lamella) ชั้นผนังเซลล์ (Cell wall) และลูเมน (Lumen) [24, 26, 34] ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของเส้นใย [35]

2.1.6.1 ชั้นมิดเดิลลามেলা (Middle lamella, M)

เป็นบริเวณชั้นนอกสุดที่อยู่ระหว่างเส้นใย (Fiber) ประกอบไปด้วยลิกนิน (Lignin) จำนวนมาก โดยลิกนินจะทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวเชื่อมเส้นใยแต่ละเส้นเข้าด้วยกัน

2.1.6.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย (Cell wall)

ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใยจะประกอบไปด้วยผนังเซลล์ 2 ชั้น คือ ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) และชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall)

- **ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall, P)** เป็นชั้นที่มีผนังบาง การจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย (Fibrils/macrofibrils/microfibrils) ภายในชั้นนี้จะมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน

- **ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall, S)** เป็นชั้นที่หนาที่สุด ประกอบไปด้วยเส้นใยขนาดย่อยอีก 3 ชั้น คือ ชั้น S_1 ชั้น S_2 และชั้น S_3 ซึ่งแบ่งตามการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยที่แตกต่างกัน โดย S_1 จะมีการเรียงตัวในแนวเดียว ส่วน S_2 และ S_3 จะมีการเรียงตัวแบบซิกแซกคล้ายรูปตัว S หรือ Z โดยชั้น S_2 เป็นชั้นที่หนาที่สุด ส่วน S_1 และ S_3 จะมีชั้นผนังเซลล์บาง นอกจากนี้ชั้น S_3 บางครั้งจะเรียกว่า Tertiary wall

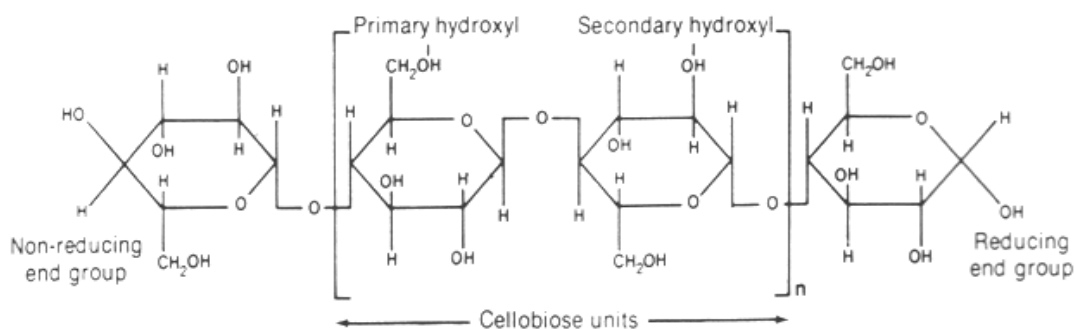
- **ลูเมน (Lumen)** เป็นบริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใย ซึ่งอยู่ถัดจากผนังเซลล์เส้นใยชั้นที่ 2 หรือ 3 เข้าไป โดยลูเมนจะเป็นบริเวณที่ให้สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต้มเยื่อซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใย

2.1.7 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย (Fiber chemistry)

เส้นใยประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

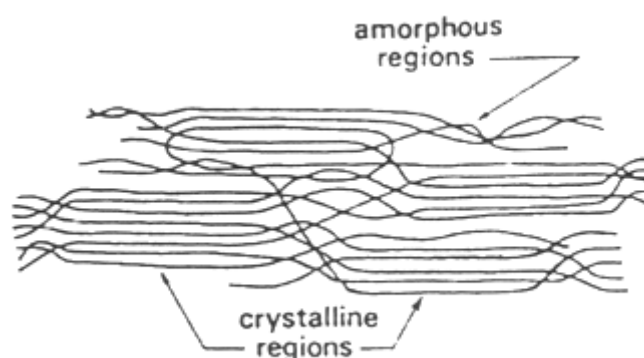
2.1.7.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน จัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ชนิดหนึ่ง เนื่องจากประกอบไปด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสเป็นจำนวนมาก ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1,4)-glycosidic linkage เป็นสายโซ่ตรง (Linear chain) มีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือจำนวนหน่วยซ้ำของน้ำตาลหรือระดับของพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ดังแสดงในภาพที่ 2-10 โดยทั่วไปเซลลูโลสจะมี DP อยู่ประมาณ 9,000-10,000 หน่วย และอาจสูงถึง 15,000 หน่วยได้ [24-26]



ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของเซลลูโลส [36]

เซลลูโลสจะประกอบอยู่ในไม้ทั่วไปประมาณร้อยละ 40-45 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง [25] โดยจะมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยทั้งแบบที่เป็นโครงสร้างผลึกอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline region) ซึ่งโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อตัวทำละลายหรือสารเคมี และโครงสร้างออสถฐานอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous region) คือมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ความหนาแน่นต่ำ สามารถรับน้ำและความชื้นได้ดี บริเวณนี้จึงไม่ค่อยแข็งแรง [36] ดังแสดงในภาพที่ 2-11

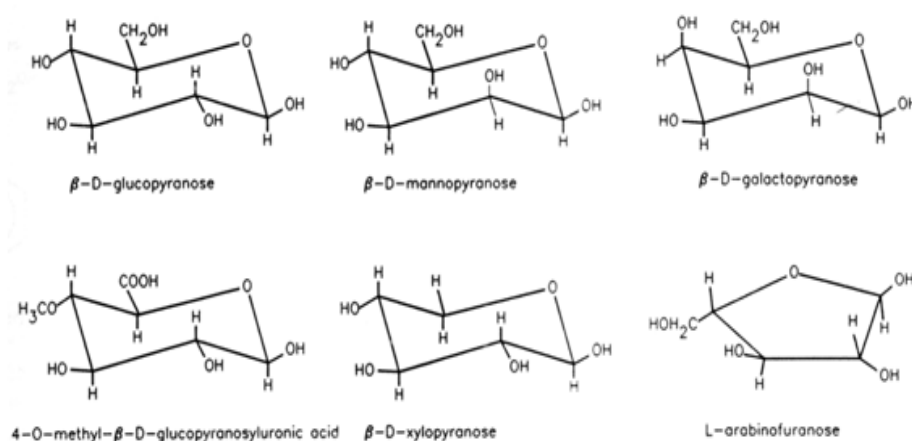


ภาพที่ 2-11 โครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบ (Crystalline region) และไม่เป็นระเบียบ (Amorphous region) ของเส้นใย [36]

2.1.7.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสถือเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าและสลายตัวได้ง่ายกว่าเซลลูโลส ในเนื้อไม้ทั่วไปจะพบเฮมิเซลลูโลสอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 ซึ่งจะพบมากเป็นอันดับ 2 รองจากเซลลูโลส [24] เฮมิเซลลูโลสมีความ

คล้ายกับเซลลูโลสตรงที่จะประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเหมือนกัน แต่จะต่างกันตรงที่ โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสเกิดจากการเกาะกลุ่มกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของน้ำตาลถึง 5 ชนิด อันได้แก่ ไซโลส (Xylose) อะราบินโนส (Arabinose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และแมนโนส (Mannose) กาแลคโตส (Galactose) และกลูโคส (Glucose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม [37, 38] ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส [25]

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกเรียกรวมกันว่า โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งจะแบ่งตามการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยออกได้เป็น 3 ชนิดด้วยกัน [24] ดังนี้

- **แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose)** เป็นเซลลูโลสที่แท้จริง ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ณ อุณหภูมิห้อง แต่สามารถร่อนจากสารละลายและทำการล้างก่อนการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมกระดาษและพอลิเมอร์ได้ โดยทั่วไปแอลฟาเซลลูโลสจะมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป ถือได้ว่าแอลฟาเซลลูโลสนี้มีความยาวของสายเซลลูโลสมากที่สุด จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

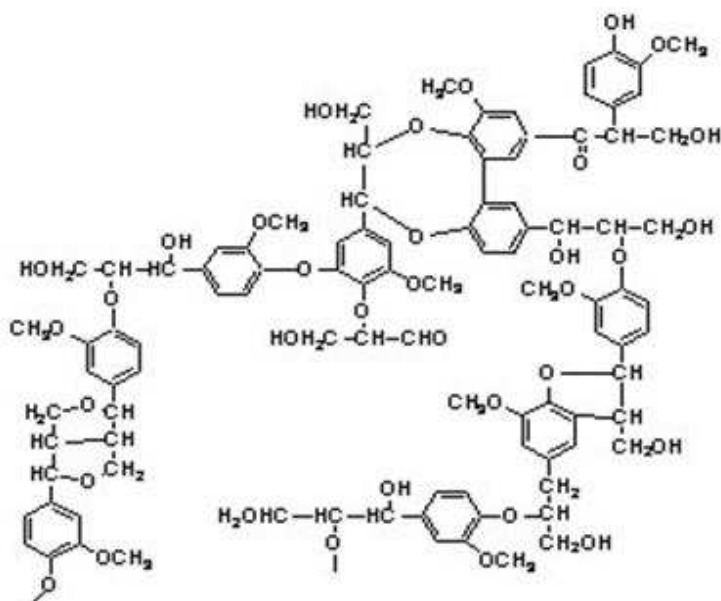
- **เบต้าเซลลูโลส (β -cellulose)** เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 17.5% ณ อุณหภูมิห้อง และสามารถตกตะกอนได้ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นเบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในสารละลายต่าง โดยค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ในช่วงระหว่าง 100-200 หน่วย

- **แกมมาเซลลูโลส (γ -cellulose)** เป็นเซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 17.5% ณ. อุณหภูมิห้อง และละลายได้ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้นแกมมาเซลลูโลสจะสามารถแยกได้จากส่วนที่เป็นของเหลวในสารละลายต่าง โดยที่ค่า DP ของแกมมาเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย

เบต้าเซลลูโลสและแกมมาเซลลูโลสจะมีความยาวของสายเซลลูโลสต่ำ และเมื่อเซลลูโลส 2 ชนิดนี้มารวมกันจะถูกเรียกว่า เฮมิเซลลูโลส [39]

2.1.7.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 17-33 ถือว่ามีมากเป็นอันดับ 3 รองจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ตามลำดับ โดยจะขึ้นกับชนิดของไม้ด้วย มักพบรวมอยู่กับเซลลูโลส และพบมากในบริเวณมิดเดิลลามেলা โดยลิกนินจะทำหน้าที่เสมือนกาวเชื่อมเส้นใยแต่ละเส้นเข้าด้วยกัน รวมถึงผนังเซลล์ชั้น S_2 ของพืชชั้นสูง [25, 37] ดังนั้นในกระบวนการผลิตเยื่อ จึงจำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกหรือทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง เพื่อให้สามารถแยกกลุ่มเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ ลิกนินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนแบบสามมิติ ประกอบไปด้วยฟีนิลโพรเพน (Phenyl propane) หลายหน่วยมาเชื่อมต่อกัน การจัดเรียงตัวเป็นแบบไม่มีระเบียบ (Amorphous) ดังแสดงในภาพที่ 2-13 ลิกนินสามารถละลายได้ในสารละลายต่าง เมื่อชิ้นไม้ถูกต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 170 องศาเซลเซียส ดังนั้นลิกนินจึงถูกแยกออกจากชิ้นไม้ได้โดยง่ายในขั้นตอนการทำเยื่อ (Pulping) [37] นอกจากนี้ลิกนินยังมีโครงสร้างทางเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแสงและความชื้น เป็นผลให้กระดาษมีสีเหลือง [26, 27] สำหรับการผลิตเยื่อแบบเคมีนั้น ลิกนินคือสิ่งที่ไม่ต้องการและจะต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ออกไปจากไม้ เนื่องจากลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่จะเข้าไปขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยของกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่ำ และหากมีปริมาณสูงจะส่งผลให้กระดาษมีสีเหลือง ซึ่งเกิดจากสาเหตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น [27]



ภาพที่ 2-13 โครงสร้างของโมเลกุลลิกนิน [40]

2.1.7.4 สารแทรก (Extractives)

สารแทรกเป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างในเนื้อไม้ ส่วนใหญ่จะสามารถละลายในน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีสภาพเป็นกลางได้ มวลโมเลกุลต่ำ ปกติจะแทรกอยู่เป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ และอยู่ภายนอกเซลล์ โดยสารจะถูกหลั่งออกมานอกเซลล์ภายหลังจากที่เนื้อไม้ถูกทำลายด้วยแรงเชิงกล แผลง หรือเชื้อรา สารแทรกเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดสีกลิ่น รสในเนื้อไม้ และมีหน้าที่แปรตามชนิดของสารในเนื้อไม้ เช่น การทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสลายของไม้ เป็นต้น สามารถพบสารแทรกอยู่ตามส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ ลำต้น ราก ใบ และเปลือกไม้ ตัวอย่างสารแทรก ได้แก่ กรดเรซิน (Resin acid) กรดไขมัน (Fatty acid) และแอลกอฮอล์ เป็นต้น [37]

2.1.8 การผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping)

การผลิตเยื่อกระดาษ หมายถึง การผลิตเส้นใยเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยเป็นกระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ให้กลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ซึ่งอาจมีการกำจัดลิกนินออก หรืออาจเพียงแต่ทำให้ลิกนินอ่อนตัวลงแทนการกำจัดออกก็ได้ ทั้งนี้เพื่อให้เส้นใยอยู่ในสภาพที่เหมาะสมพร้อมนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตกระดาษต่อไปได้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งการผลิตเยื่อกระดาษออกได้เป็น 3 กระบวนการด้วยกัน [27] ดังนี้

2.1.8.1 การผลิตเยื่อไม้บดหรือเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping)

เป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่อาศัยพลังงานเชิงกลในการแยกเส้นใยออกจากกันให้กลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการใช้ความร้อน ความดัน หรือสารเคมีเข้าร่วมในกระบวนการด้วย เพื่อให้ลิกนินอ่อนตัวลงส่งผลให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้น โดยเยื่อที่ผลิตได้จะมีค่าความทึบแสงสูง เนื่องจากเส้นใยมีขนาดสั้น นอกจากนี้ยังได้ค่าความเรียบและค่าผลผลิตที่ได้ (Yield) สูง คือจะได้ค่าผลผลิตประมาณ 90-95% ทั้งนี้กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลจะไม่มีกำจัดลิกนินออกไป ส่งผลให้การนำเยื่อไปฟอกต่อทำได้ยาก และสีของกระดาษที่ผลิตได้มีโอกาสกลายเป็นสีเหลืองเมื่อทำปฏิกิริยากับแสง ความร้อนและความชื้น สำหรับการผลิตเยื่อเชิงกลนี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน [41] คือ

1) การผลิตเยื่อแบบหินบด (Stone groundwood pulping, SGW pulping) เป็นกระบวนการผลิตที่นำเอาตัวหินบดมาช่วยในการแยกเส้นใยออกเป็นเส้นเดี่ยวๆ โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างท่อนไม้กับตัวหินบด เส้นใยที่ได้จะมีขนาดสั้นและไม่สมบูรณ์

2) การผลิตเยื่อแบบจานบด (Refiner mechanical pulping, RMP) เป็นการใช้แรงเสียดทานร่วมกับความร้อนที่เกิดขึ้นตรงบริเวณจานบด (Refiner plate) ที่อยู่ภายในเครื่องบด (Refiner) เพื่อทำการแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ โดยเส้นใยที่ได้จะมีความสมบูรณ์และได้ขนาดที่ยาวกว่าเส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบ SGW

3) การผลิตเยื่อแบบเชิงกลและความร้อน (Thermomechanical pulping, TMP) เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนามาจาก RMP โดยในระหว่างการบดเยื่อนั้นจะมีการให้ความร้อนเข้าสู่เครื่องบดเยื่อด้วย เส้นใยที่ได้จะมีความยาวและความสมบูรณ์ของเส้นใยมากกว่าแบบ RMP

2.1.8.2 การผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping)

เป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่ใช้ทั้งพลังงานความร้อนและสารเคมีเข้าร่วมในการกำจัดลิกนิน โดยทำการละลายลิกนินออกมาเพื่อแยกเส้นใยออกจากกันได้ง่าย ทำให้เยื่อที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้มีค่าความขาวสว่างและความแข็งแรงสูงกว่าเยื่อเชิงกล แต่การละลายลิกนินออกมานั้น จะมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนถูกละลายออกมาด้วย ส่งผลให้ผลผลิตของเยื่อที่ได้มีค่าต่ำกว่าเยื่อเชิงกล คืออยู่ที่ประมาณ 40-50% โดยเส้นใยที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้จะมีความยาวและความสมบูรณ์ของเส้นใยมากกว่าการผลิตเยื่อแบบเชิงกล และสามารถนำไปทำการฟอกเยื่อต่อได้ง่าย เนื่องจากลิกนินหลงเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย ดังนั้นเยื่อ

ที่ผลิตได้จะมีโอกาสเกิดสีเหลืองได้ยากกว่าเยื่อเชิงกล การผลิตเยื่อเคมีนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทย่อยๆ ดังนี้

1) **กระบวนการโซดา (Soda process)** เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่าง โดยสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อย่างเดียว ซึ่งจะถูกใช้เป็นสารเคมีต้มเยื่อในการกำจัดลิกนินออกจากชิ้นไม้ โดยกระบวนการนี้จะนิยมใช้กับการผลิตเยื่อจากพืชไม่มีเนื้อไม้ (Non-wood) เป็นหลัก [42]

2) **กระบวนการซัลไฟต์ (Sulfite process)** เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบกรด โดยสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งได้จากกรดซัลฟิวรัส (H_2SO_3) และสารประกอบไบซัลไฟต์ (MHSO_3) เมื่อ M คือ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) หรือ โซเดียม (Na) เยื่อที่ผลิตได้จะมีค่าความขาวสว่างสูง ง่ายต่อการนำไปทำการฟอกเยื่อต่อได้ นอกจากนี้ยังให้ค่าผลผลิตที่ได้จากการฟอกเยื่อสูงและนำไปทำการบดเยื่อต่อได้ง่ายอีกด้วย [34]

3) **กระบวนการคราฟต์ (Kraft process)** เป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนามาจากกระบวนการโซดาในข้างต้น โดยสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide, Na_2S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ข้อดีสำหรับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์นี้คือ ใช้เวลาในการต้มเยื่อน้อย และเยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง รวมถึงยังสามารถนำสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่ายอีกด้วย [34, 43]

2.1.8.3 การผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Chemimechanical pulping)

เป็นกระบวนการ 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรกจะเป็นการใช้สารเคมีเพื่อทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง ส่งผลให้เส้นใยแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้โดยง่าย และมีการใช้พลังงานในกระบวนการแยกย่อยน้อยลง ขั้นที่ 2 จะเป็นการบดเนื้อไม้หรือวัตถุดิบอื่นๆ ที่ผ่านการแช่ด้วยสารเคมีมาแล้ว เพื่อทำการสกัดเยื่อออกมา เยื่อที่ได้จากวิธีการผลิตนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเยื่อเชิงกล แต่จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเยื่อเชิงเคมี อีกทั้งผลผลิตที่ได้จะต่ำกว่าเยื่อเชิงกล เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกไปบางส่วน [24, 33]

2.1.9 ปฏิกริยาของลิกนินและคาร์โบไฮเดรตในการผลิตเยื่อแบบโซดา (Lignin and carbohydrate reaction in soda pulping)

การผลิตเยื่อแบบโซดาสามารถกำจัดลิกนินออกได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นั่นคือการทำให้สายโซ่ของโมเลกุลลิกนินมีขนาดสั้นลงและทำให้เกิดหมู่ฟีนอลเลตไอออน (Phenolate ion) และคาร์บอกซิเลตไอออน (Carboxylate ion) ซึ่งเป็นหมู่ที่ละลายน้ำทั้งคู่ เป็นผลให้เกิดการแตกตัวของเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ จึงสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้หลังจากที่มีการฟอร์มตัวเป็นแผ่นกระดาษ ในขณะที่คาร์โบไฮเดรตจำพวกเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเป็นด่างสูง จะถูกทำลายโดยปฏิกิริยาที่เรียกว่า ปฏิกริยาฟิลลิ่ง (Peeling reaction) ซึ่งจะไปทำให้ glycosidic bond เกิดการแตกตัวออกมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงบริเวณที่เป็นหมู่ปลาย (End group) ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ค่าผลผลิตที่ได้และความแข็งแรงของเยื่อลดลง [44, 45]

2.1.10 การบดเยื่อ (beating)

เป็นการใช้แรงกลในการปรับสภาพเส้นใย โดยการให้น้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นสูงไหลผ่านช่องแคบที่อยู่ระหว่างตัวหมุน (Rotor) กับตัวที่หยุดอยู่กับที่ (Stator) ของเครื่องบดเยื่อ จึงทำให้เกิดแรงเชิงกลและแรงบีบอัดในเส้นใย ส่งผลให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างเส้นใย และระหว่างเส้นใยกับตัวเครื่องบดเยื่อขึ้น เป็นผลให้ชั้นของผนังเซลล์เส้นใยเกิดการแตกออก เส้นใยเกิดการดูดซับน้ำและพองตัวดีขึ้น ทำให้เส้นใยที่ได้มีความยืดหยุ่นและนุ่มมากขึ้น เมื่อนำไปผลิตกระดาษจะได้กระดาษที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากการที่ผนังเส้นใยเกิดการแตกออก ทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยเกิดการสานตัวกันเป็นแผ่นกระดาษได้ดีขึ้น

กลไกที่เกิดขึ้นกับเส้นใยในระหว่างการบดเยื่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- 1) เส้นใยเปียกน้ำและเกิดการดูดซับน้ำเข้าไป จนทำให้เกิดการพองตัวของเส้นใยขึ้น โดยส่วนที่เป็นผลึกของเส้นใย (Crystalline region) จะถูกทำลายไป ทำให้เส้นใยเกิดการรับน้ำและเกิดการพองตัวได้ดีขึ้น
- 2) เกิดเส้นใยแตกแขนง (Fibrillation) ขึ้น ซึ่งถือเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเส้นใย ทำให้เกิดความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น

3) เกิดการแยกตัวของชั้นผนังเส้นใย เช่น เกิดการแยกตัวระหว่างชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิและชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ เป็นต้น ส่งผลให้เส้นใยมีความยืดหยุ่น (Flexible) ได้ดี

การบดเยื่อจะช่วยให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเกิดได้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) และความแข็งแรงต่อการหักพับ (Folding endurance) ในทางกลับกันการบดเยื่อจะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear strength) ลดลง เนื่องจากความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยาวของเส้นใยเป็นหลัก ซึ่งเมื่อเกิดการบดเยื่อขึ้นเส้นใยที่ได้จะมีขนาดสั้นลง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าลดลงตามไปด้วย [24, 26, 36]

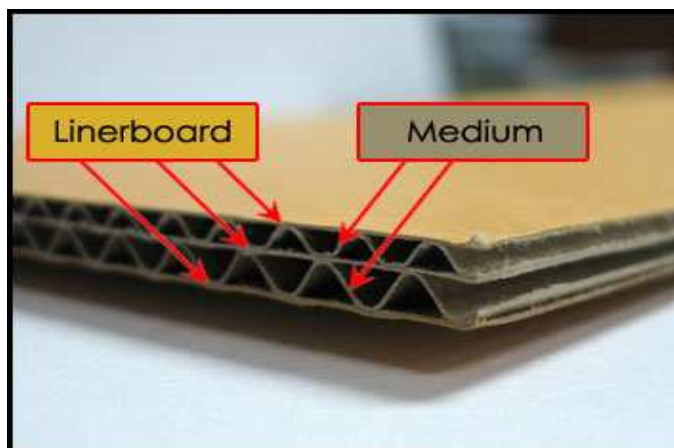
2.1.11 กระดาษลูกฟูก (Corrugated board)

ในปัจจุบันมีการใช้งานกระดาษลูกฟูกมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม รวมถึงในแง่ของการขนส่งสินค้าด้วย เนื่องจากกระดาษลูกฟูกมีข้อดีหลายประการ [46, 47] ได้แก่

- มีสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุบางชนิด
- สามารถนำมารีไซเคิลใหม่ได้ และจัดหาได้ง่าย
- มีความสามารถในการปกป้องสินค้าดีเยี่ยม
- สามารถนำมาออกแบบงานได้หลากหลาย ทั้งการตัด พับเป็นรูปแบบต่างๆ ได้มากมาย
- ต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงค่อนข้างคุ้มทุน

2.1.11.1 โครงสร้างของกระดาษลูกฟูก

กระดาษลูกฟูก (Corrugated board) จะประกอบไปด้วย กระดาษผิวกล่องหรือกระดาษแข็งประกบลูกฟูก (Liner board) และกระดาษลอนลูกฟูก (Corrugating medium หรือ flute) [33, 48] ดังแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 โครงสร้างของกระดาษลูกฟูก [47]

1) กระดาษผิวกลองหรือกระดาษแข็งประกบลูกฟูก (Liner board) จะทำจากเยื่อเคมี (Chemical pulp) โดยมากจะได้จากกระบวนการคราฟต์ หรือซัลไฟต์ หรือเยื่อกึ่งเคมี (Semi-chemical pulp) ลักษณะกระดาษจะเป็นแผ่นเรียบ มีน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษอยู่ในช่วง 125-350 กรัมต่อตารางเมตร ปกติแล้วจะนำไปประกบกับลอนลูกฟูกที่ด้านบนและล่างของตัวลอน กระดาษผิวกลองจะประกอบไปด้วยชั้น 2 ชั้น คือ ชั้นผิวบน (Top Ply) และชั้นฐาน (Base Ply) โดยในการผลิตกระดาษประเภทนี้จะใช้เยื่อทั้งหมด 2 ประเภทด้วยกัน [46] คือ

- **เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin pulp)** ได้แก่ เยื่อไยขาว (Softwood pulp) ซึ่งจะใช้ในการผลิตกระดาษเป็นหลัก เนื่องจากกระดาษประเภทนี้ต้องการความแข็งแรงมาก กระดาษผิวกลองที่ผลิตได้นี้ เรียกว่า Kraftliner ในบางกรณีจะมีการใช้เยื่อไยสี (Hardwood pulp) มาผลิตกระดาษด้วย แต่จะใช้สัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณเยื่อทั้งหมดที่ใช้ทำแผ่นกระดาษ

- **เยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp)** ได้แก่ เศษกระดาษ กระดาษกลองลูกฟูกเก่า (Old Corrugated Container; OCC) โดยกระดาษผิวกลองที่ผลิตได้จากเยื่อชนิดนี้ เรียกว่า Testliner ซึ่งปกติแล้วจะมีการนำเยื่อรีไซเคิลมาผสมเพื่อขึ้นเป็นแผ่นกระดาษผิวกลองนี้ เพียงแค่ประมาณ 20% เท่านั้น เนื่องจากกระดาษชนิดนี้ยังต้องการความแข็งแรงที่สูงอยู่ เพื่อให้สามารถใช้งานได้ ทั้งนี้คุณภาพของกระดาษที่ผลิตได้จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของเยื่อรีไซเคิลที่นำมาใช้งาน เส้นใยที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วจะมีขนาดสั้นลง และความสามารถในการอุ้มน้ำทำได้น้อยลง ส่งผลให้พันธะระหว่างเส้นใยเกิดได้น้อยลง ดังนั้นความแข็งแรงของกระดาษซึ่งขึ้นกับพันธะระหว่างเส้นใยมีค่าลดลงไปตามรอบของการรีไซเคิล นอกจากนี้เส้นใยที่ได้จะมีคุณภาพต่ำและความแข็งแรงน้อย

2) กระดาษลอนลูกฟูก (Corrugated medium) ทำจากเยื่อกึ่งเคมี (Semi-chemical pulp) และใช้เยื่อใยสั้น (Hardwood pulp) มาผลิตเป็นลอน เนื่องจากตัวลอนลูกฟูกจะต้องการความแกร่งมากกว่าความแข็งแรง สำหรับการใส่เยื่อบริสุทธิ์มาผลิตเป็นกระดาษลอนลูกฟูกนั้น ส่วนใหญ่จะใช้ในงานที่ต้องอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง ส่วนการนำเยื่อรีไซเคิลมาผลิตเป็นลอนนั้นจะสามารถใช้ได้ในงานที่หลากหลายมากกว่า [46]

2.1.12 การพิมพ์เฟล็กโซกราฟี (Flexographic printing)

การพิมพ์เฟล็กโซกราฟีเป็นระบบการพิมพ์พื้นฐนประเภทหนึ่งเช่นเดียวกับการพิมพ์เล็เตเตอร์เพรส แต่จะต่างกันตรงที่แม่พิมพ์พอลิเมอร์ในการพิมพ์ประเภทนี้จะมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่า นอกจากนี้หมึกพิมพ์ที่ใช้จะมีลักษณะเหลวเหมาะกับงานพิมพ์ประเภทบรรจุภัณฑ์และฉลาก [49] โดยทั่วไปจะเหมาะกับการพิมพ์บนวัสดุที่มีความอ่อนตัว เช่น กระดาษ โลหะอ่อนและพลาสติก เป็นต้น หมึกพิมพ์จะประกอบไปด้วยตัวทำละลายหลายชนิด ส่วนแม่พิมพ์นั้นสามารถเปลี่ยนขนาดไปตามสิ่งที่จะพิมพ์ได้ ในปัจจุบันการพิมพ์ประเภทนี้มีแนวโน้มเข้ามามีบทบาทต่องานพิมพ์หลากหลายแทนที่ระบบพิมพ์แบบเล็เตเตอร์เพรส เนื่องจากใช้เวลาในการเตรียมพร้อมพิมพ์ไม่นาน นอกจากนี้แม่พิมพ์ยังมีความทนทานกว่าและได้คุณภาพงานพิมพ์เป็นที่ยอมรับในตลาดมากกว่า [50, 51]

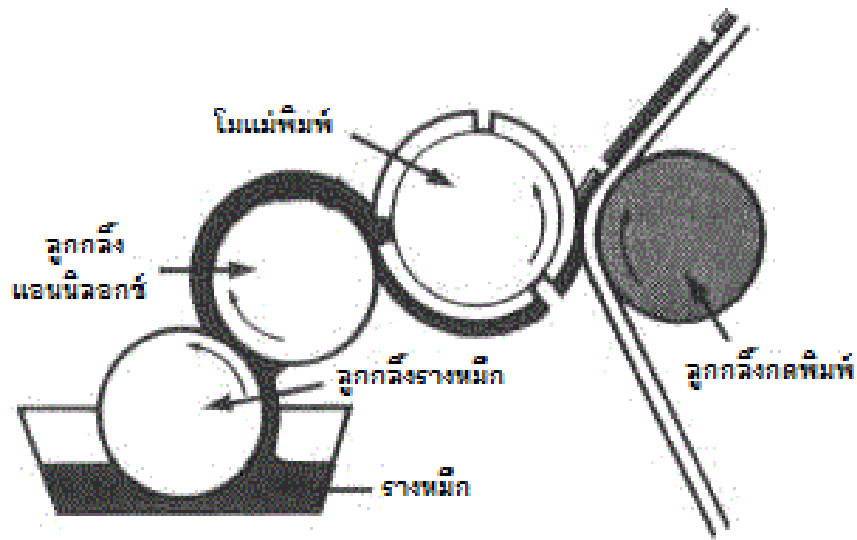
- ระบบควบคุมและจ่ายหมึก

หน่วยพิมพ์เฟล็กโซกราฟีประกอบไปด้วยลูกกลิ้ง 4 ลูก ได้แก่ ลูกกลิ้งวางหมึก ลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์ โมแม่พิมพ์และลูกกลิ้งกดพิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2-15 ลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์จะเป็นตัวกลางในการถ่ายทอหมึกจากรางหมึกไปสู่โมแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อลักษณะและคุณภาพงานพิมพ์ [52]

- ลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์

โดยมากลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์จะทำจากโลหะซึ่งเคลือบด้วยโครเมียมหรือเซรามิก ผิวลูกกลิ้งจะมีลักษณะเป็นบ่อหมึกเล็กๆ ทำหน้าที่ในการรับหมึกพิมพ์จากรางหมึกและทำการจ่ายหมึกให้แก่แม่พิมพ์ ซึ่งขนาดของบ่อหมึกนี้จะมีขนาดเล็ดยหลายขนาดตามความต้องการปริมาณหมึกของภาพพิมพ์ เช่น งานลายเส้นพื้นที่บจะต้องการหมึกปริมาณมาก จึงต้องใช้แอนนิลอกซ์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนงานพิมพ์แบบฮาล์ฟโทนที่เป็นงานละเอียดบ่อหมึกจะเล็กและ

ละเอียดตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้เองเครื่องพิมพ์เฟล็กโซกราฟีจึงได้ออกแบบมาสำหรับการถอดเปลี่ยนลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ได้ [52]



ภาพที่ 2-15 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบจ่ายหมึก [53]

ปริมาณหมึกและความหนาของชั้นหมึกที่ใช้จะแปรผันไปตามชนิดของวัสดุที่ใช้พิมพ์และประเภทของงานพิมพ์แต่ละแบบ จึงต้องเลือกลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานด้วย ดังแสดงตามตารางที่ 2-4

ความละเอียดของลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์นี้จะเรียกว่า จำนวนเซลล์ (Cell count) มีหน่วยเป็นจำนวนเซลล์ต่อความยาว 1 หน่วย เช่น 80 เส้น/ซม. (l/cm.) เป็นต้น ยิ่งมีความละเอียดของจำนวนเซลล์มาก หมายความว่าหมึกที่พิมพ์ลงไปจะยังมีปริมาณน้อย นอกจากนี้ปริมาณหมึกพิมพ์ยังขึ้นกับรูปร่างของบ่อหมึกอีกด้วย

ตารางที่ 2-4 ค่าความละเอียดและปริมาตรบ่อหมึกบนลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์กับประเภทงานพิมพ์
ฉลากที่เหมาะสม

ประเภทงานพิมพ์	ความละเอียด		ปริมาตรบ่อหมึก (cm ³ /m ²)
	l/cm.	lpi.	
Process (150 lpi)	320	810	2.6
Process (133 lpi)	280	710	2.6
Process (120 lpi)	240	610	3.0
Process (100 lpi)	220	560	3.4
Process (80 lpi)	180	460	4.6
ลายเส้น/ตัวอักษร	140	360	6.5
ลายเส้น/พื้นที่บ	120	300	8.0
พื้นที่บ	80	200	12.0

2.1.12.1 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

คุณภาพของงานพิมพ์ในระบบเฟล็กโซกราฟีนั้น จะขึ้นกับตัวแปรหลายชนิดด้วยกัน อาทิเช่น ชนิดของเครื่องพิมพ์ ลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ ระบบจ่ายหมึก แม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้พิมพ์รวมไปถึงหมึกพิมพ์ด้วย โดยที่หมึกพิมพ์นั้นถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก เนื่องจากเป็นหมึกพิมพ์ชนิดเหลว (Liquid ink) ซึ่งจะต้องมีความหนืดต่ำเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนอย่างเหมาะสม ดังนั้นหมึกพิมพ์ที่ใช้จึงต้องมีตัวทำละลายผสมอยู่ด้วยในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามถ้าหมึกพิมพ์มีความหนืดต่ำเกินไป จะทำให้หมึกพิมพ์ไม่ติดอยู่บนพื้นผิววัสดุพิมพ์ หรืออาจให้ความดำไม่เพียงพอ หมึกพิมพ์อาจไปกองรวมกันอยู่ด้านข้างของภาพพิมพ์ได้ [54, 55]

2.1.12.2 กระดาษสำหรับระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

สมบัติกระดาษที่ควรพิจารณาก่อนที่นำไปพิมพ์ ได้แก่ ความเรียบ ซึ่งจะขึ้นกับความยาวเส้นใย ชนิดของเส้นใย การใส่สารเติมแต่ง ชนิดของเครื่องผลิตกระดาษและการเคลือบผิวหน้ากระดาษ นอกจากนี้การกระจายตัวของเส้นใยยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่องานพิมพ์ เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดี จะทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่ผิววัสดุส่งผลเสียต่อ

บริเวณภาพพิมพ์ที่เป็นฮาล์ฟโทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงบริเวณน้ำหนักรีดอ่อน จะเกิดสีที่ไม่สม่ำเสมอและบริเวณพื้นตายจะเกิดเป็นรอยกระดำกระด่างขึ้น [56]

- สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษ

สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษ หมายถึง สภาพของกระดาษที่มีสมบัติในการรับหมึกเพื่อให้ได้งานพิมพ์ที่มีคุณภาพคงที่และสามารถยอมรับได้ โดยการประเมินสภาพพิมพ์ได้ของกระดาษจะต้องทำการทดสอบภายใต้สภาวะการพิมพ์จริง โดยสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพงานพิมพ์ ได้แก่ ค่าความดำบริเวณพื้นตาย และเม็ดสกปรกบนวม เป็นต้น [57]

- สมบัติกระดาษที่มีผลต่อการพิมพ์

สมบัติกระดาษที่มีผลต่อการพิมพ์หลักๆ ได้แก่ ความมันวาวและความเรียบของกระดาษ โดยความมันวาวของผิวหน้ากระดาษจะมีผลต่อการปรากฏของสีและน้ำหนักของสีในภาพพิมพ์ซึ่งจะขึ้นกับส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตกระดาษ ขั้นตอนการทำแห้งและการปรับสภาพผิวหน้าในกระบวนการผลิตกระดาษ ส่วนความเรียบจะสัมพันธ์โดยตรงกับความมันวาวของผิวหน้ากระดาษและความสามารถในการรับหมึก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระดับความละเอียดของสกรีนและการผลิตน้ำหนักรีดของภาพพิมพ์นั้นๆ [58]

2.1.12.3 คุณภาพงานพิมพ์ (Print quality)

คุณภาพงานพิมพ์ที่นิยมวัดกัน มีดังนี้

- **ความดำ (Print density)** ความดำของภาพพิมพ์เป็นผลมาจากปรากฏการณ์การดูดกลืนและการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ผ่านฟิลเตอร์สีแดง เขียวและน้ำเงินในเครื่องวัดความดำ ซึ่งปริมาณแสงสะท้อนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับการดูดกลืนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ของสีนั้นๆ เป็นหลัก โดยค่าความดำจะได้มาจากสมการที่ 1 ดังนี้ [59]

$$D = \log 1/R = \log I_0/I \quad (1)$$

เมื่อ D = ค่าความดำ

R = ปริมาณแสงสะท้อนจากภาพพิมพ์ผ่านฟิลเตอร์แต่ละสี

I = ปริมาณแสงที่สะท้อนขึ้นมาจากบริเวณภาพพิมพ์

I_0 = ปริมาณแสงที่สะท้อนขึ้นมาจากบริเวณที่ไม่มีการพิมพ์

ค่าความดำนี้จะสัมพันธ์กับความหนาของชั้นฟิล์มหมึกบนวัสดุพิมพ์ โดยทั่วไปหมึกพิมพ์จะมีลักษณะกึ่งโปร่งแสง เมื่อพิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์แล้ว ค่าความดำที่วัดได้จะเป็นค่าความดำของชั้นฟิล์มหมึกรวมกับแสงที่สะท้อนขึ้นจากผิววัสดุพิมพ์ที่ผ่านชั้นมาจนทะลุผิวชั้นฟิล์มหมึก ดังนั้นยิ่งชั้นฟิล์มหมึกมีความหนา ค่าความดำที่วัดได้ก็จะยิ่งสูง แต่จะมีจุดๆ หนึ่งที่ค่าความดำจะไม่เพิ่มขึ้นอีกแม้ว่าจะเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มหมึกก็ตาม นั่นคือ เมื่อหมึกพิมพ์หนาจนปิดผิววัสดุที่ใช้พิมพ์จนสนิท แสงจึงไม่สามารถสะท้อนขึ้นมาจากผิววัสดุพิมพ์ได้ ค่าความดำที่วัดได้จึงเป็นค่าความดำของหมึกพิมพ์อย่างเดียว [60]

- **การผลิตน้ำหมึกสี (Tone reproduction)** คือ ปราบกฎการณณ์เกรเดชัน (Gradation) ของน้ำหมึกสีบนภาพพิมพ์ตั้งแต่บริเวณสว่างของภาพพิมพ์ (High light) จนถึงบริเวณเงา (Shadow) โดยจะทำการเปรียบเทียบกับต้นฉบับแล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของเม็ดสกรีนต้นฉบับกับเปอร์เซ็นต์ของเม็ดสกรีนบนสิ่งพิมพ์ [61]

- **การบวมของเม็ดสกรีน (Dot gain)** เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบการพิมพ์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเกิดจากปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น แรงกดพิมพ์ สมบัติการรับหมึกของวัสดุพิมพ์ และสมบัติสภาพการไหลของหมึกพิมพ์ เป็นต้น โดยปรากฏการณ์นี้จะมีผลต่อคุณภาพของการผลิตน้ำหมึกสีของงานพิมพ์ด้วย การบวมเม็ดสกรีนจะเป็นผลต่างระหว่างเปอร์เซ็นต์เม็ดสกรีนของต้นฉบับกับภาพที่พิมพ์ได้ เช่น ณ ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ต้นฉบับ 50 เปอร์เซ็นต์บนแม่พิมพ์ เมื่อนำไปพิมพ์งานแล้ววัดเม็ดสกรีนได้ 70 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีค่าการบวมของเม็ดสกรีนเกิดขึ้น เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์นั่นเอง

2.1.12.4 การประเมินคุณภาพการพิมพ์ (Print quality evaluation)

ก่อนการพิมพ์งานจริงด้วยเครื่องพิมพ์เฟล็กโซกราฟี สามารถทำการทดสอบแม่พิมพ์และหมึกพิมพ์เบื้องต้นเพื่อหาสภาวะการพิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุพิมพ์ได้ โดยใช้เครื่องมือทดสอบการพิมพ์ในระดับห้องปฏิบัติการ เช่น เครื่องมือทดสอบสภาพพิมพ์ได้สำหรับการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี IGT F1 ดังแสดงในภาพที่ 2-16 โดยจะมีการจำลองหน่วยการพิมพ์ขึ้นพื้นฐาน อันประกอบไปด้วยลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ ไบมีดปาดหมึก โมแม่พิมพ์และลูกกลิ้งกดพิมพ์ รวมถึงสามารถปรับตั้งแรงกดของไบมีดปาดหมึกและแรงกดพิมพ์ระหว่างแม่พิมพ์และวัสดุที่ใช้

พิมพ์ได้อีกด้วย แต่จะไม่มีส่วนจ่ายหมึกอยู่ เนื่องจากจะใช้วิธีการหยดหมึกพิมพ์ลงไปตามบนบริเวณที่อยู่ระหว่างใบมีดปาดหมึกกับลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์แทนเมื่อทำการพิมพ์ [62]



ภาพที่ 2-16 เครื่องทดสอบสภาพพิมพ์ได้สำหรับระบบการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี IGT F1 [62]

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการบ่งชี้คุณภาพงานพิมพ์มีอยู่มากมายหลายชนิด โดยชนิดที่ได้รับความนิยมสามารถทำการวัดและคำนวณค่าการบ่งชี้คุณภาพงานพิมพ์ออกมาได้หลากหลาย คือ เครื่องวัดความดำ (Densitometer) ดังแสดงในภาพที่ 2-17 ซึ่งสามารถใช้วัดค่าความดำของภาพพิมพ์พื้นตายและฮาล์ฟโทน เพื่อทำการคำนวณและวิเคราะห์คุณภาพงานพิมพ์ต่างๆ เช่น ช่วงความดำ ความเปรียบต่าง หรือค่าเม็ดสกรีนบวมต่อไปได้ [63]



ภาพที่ 2-17 เครื่องวัดความดำ IHARA R730 Color Reflection Densitometer [63]

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Matsui และคณะ [64] ได้ศึกษาผลของการแช่วัสดุผสมระหว่างเยื่อรีไซเคิลและกากมันสำปะหลังในแป้งอะซิเตทเพื่อผลิตเป็นถาดรองไข่ ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำและความแข็งแรงต่อแรงดึง พบว่าการแช่ในแป้งอะซิเตทจะทำให้ผิวหน้าเรียบขึ้น การดูดซึมน้ำลดลงและความแข็งแรงสูงขึ้น โดยอัตราส่วนผสมระหว่างเยื่อรีไซเคิลและกากมันที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด อยู่ที่ 90:10

สาวิตรี พิสุทธิพิเชฏฐ์ [65] ได้ศึกษาถึงการใช้กากมันสำปะหลังทดแทนเยื่อกระดาษจากกล่องกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้วเพื่อผลิตกระดาษลอนลูกฟูก พบว่ากากมันมีอนุภาคขนาดใหญ่ปนอยู่มาก จึงควรมีการคัดขนาดก่อนการใช้งาน ยิ่งผสมกากมันเพิ่มขึ้นความแข็งแรงจะลดลงและอัตราการระบายน้ำออกจากแผ่นเยื่อทำได้ช้าลง การผสมกากมันสำปะหลังกับเยื่อกระดาษสามารถทำได้มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักกระดาษ

ศุภลักษณ์ ไอสถานนท์ [66] ได้ศึกษาหาวิธีการปรับสภาพกากมันสำปะหลังและหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมกับเยื่อเพื่อใช้เป็นเส้นใยทดแทนในเยื่อรีไซเคิล สำหรับการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก พบว่าการใช้ตะแกรงร่อนให้ผลดีกว่าการใช้เครื่องคัดขนาดเส้นใยและกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้างบนตะแกรง 25 เมช ให้ความแข็งแรงที่ดี การนำเอากากมันสำปะหลังไปต้มด้วยน้ำกลั่นจะให้ผลด้านความแข็งแรงที่ดีกว่าการต้มด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งถือเป็นภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการต้มกากมันสำปะหลังด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปริมาณกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการเติมลงไปผสมกับเยื่อ คือ ร้อยละ 5-10 ของน้ำหนักกระดาษ ถ้าหากมีการเติมลงไปผสมในปริมาณที่สูงกว่านี้จะทำให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ได้ลดลง

Jiménez และคณะ [67] ได้ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการผลิตเยื่อแบบไฮดรอกซ์ของต้นมะกอกต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตขึ้น โดยใช้แผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) พบว่าหากต้องการได้ค่าผลผลิตที่ได้ ไฮโลเซลลูโลส แอลฟา-เซลลูโลส และความขาวสว่างสูง แต่ปริมาณลิกนินต่ำ จะต้องต้มเยื่อที่อุณหภูมิค่าประมาณ 155-160 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นโซดาสูงประมาณ 10% และใช้เวลาในการต้มเยื่อในช่วงสั้นๆ ประมาณ 15 นาที เมื่อพิจารณาถึงสมบัติกระดาษที่ผลิตขึ้น พบว่าหากต้องการความแข็งแรงที่ดีจะต้องใช้ภาวะในกระบวนการผลิตเยื่อที่แตกต่างกันออกไป เช่น การจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่ดีจะต้องเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเยื่อให้สูงมากพอ หรือหากต้องการความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านทานแรงฉีกที่ดีจะต้องใช้เวลาในการผลิตเยื่อที่

นานขึ้น เป็นต้น ดังนั้นการจะให้ได้สมบัติเยื่อและสมบัติกระดาษที่ดีทั้งคู่นั้นจะต้องมีการบดเยื่อร่วมด้วย เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพของกระดาษตามต้องการโดยไม่สูญเสียสมบัติเยื่อไป

Gümüşkaya และ Usta [68] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและโครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystalline) ของเยื่อจากเฮมพ์ (Hemp) ซึ่งผ่านกระบวนการอัลคาไลซัลไฟต์ในภาวะที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน พบว่า ความเป็นผลึกของเยื่อจะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 140-180 องศาเซลเซียส แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ขนาดผลึกของเซลลูโลสในเยื่อตัวอย่างจะเพิ่มตามอุณหภูมิในการต้ม แต่โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนเวลาในการต้ม แสดงว่าอุณหภูมิในการต้มจะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตและโครงสร้างที่เป็นผลึกของเยื่อตัวอย่างมากกว่าเวลาในการต้ม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุดิบและสารเคมี

1. กากมันสำปะหลัง จากบริษัท เยนเนวัล สตาร์ช จำกัด, ประเทศไทย
2. เยื่อใยสั้น (เยื่อใยคาลิปต์สที่ผ่านการฟอก; LBKP#2) จากบริษัท ฟินิกซ์ พัลป์ แอนเพเพอร์ จำกัด มหาชน
3. ก่อองกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) แบบ Single-faced ไม่มีการพิมพ์และยังไม่ผ่านการใช้งาน จากบริษัท เยนเนวัล สตาร์ช จำกัด, ประเทศไทย
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 จากบริษัท Merck KGaA, Germany
5. เอทานอล (Ethanol) เกรดห้องปฏิบัติการ จากบริษัท VMR International S.A.S., France
6. โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) เกรดห้องปฏิบัติการ, ความบริสุทธิ์ร้อยละ 40 จากบริษัท Sigma Aldrich, Germany
7. เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) เกรดอุตสาหกรรม (Activity = 21084.24 LU/ml) จากบริษัท Genencor International, Singapore
8. สารละลายไอโอดีน เกรดห้องปฏิบัติการ, ความบริสุทธิ์ร้อยละ 1, น้ำหนักโมเลกุล 253.81 จากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์, ประเทศไทย
9. สารกันซึม (Alkyl Ketene Dimer; AKD) (pH = 3.8, Viscosity = 9 cP, Solid content = 12.7%) จากบริษัท เอ็คก้า เคมีคัลส์ จำกัด, ประเทศไทย
10. แป้งมันสำปะหลังดิบ หรือแป้งประจุบวก (MC = 14%, pH = 6, DS = 0.031) จากบริษัท เยนเนวัล สตาร์ช จำกัด, ประเทศไทย
11. หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำสีดำ จากบริษัทเฉลิมชัยชาญ จำกัด, ประเทศไทย
12. กระดาษกรองเบอร์ 4; Whatman International Ltd., England
13. น้ำกลั่น

3.1.2 วัสดุและเครื่องมือ

1. ตะแกรงขนาด 25 เมช (ขนาดรูเปิดเท่ากับ 0.71 มิลลิเมตร)
2. ตะแกรงขนาด 50 เมช (ขนาดรูเปิดเท่ากับ 0.297 มิลลิเมตร)
3. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper); รุ่น N-193VT, AMC, USA
4. เครื่องต้มเยื่อ (Autoclave digester); รุ่น UEC-2017A, Universal Engineering Corporation, India
5. เครื่องกวนผสมสาร (Magnetic stirrer) รุ่น TTS, Denver instrument, Japan
6. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator); รุ่น T-100, Formax, Adirondack Machine Corporation, USA
7. เครื่องบดเยื่อ (Valley beater); รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporation, India
8. เครื่องหาสภาพระบายได้ (Freeness tester); รุ่น CF/A, Regmed Industria Technica de Frecisao, Brazil
9. เครื่องปั่นกวน (Overhead stirrer) รุ่น RW 20, IKA[®] Werke GmbH, Germany
10. เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former); รุ่น RK-2A KWT, PTI Laboratory Equipment, Austria
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง (0.1-21 kg); รุ่น GX-20K, AND, Japan
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002, Denver Instrument, Germany
13. เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber quality analyzer, FQA); รุ่น LDA02, Optest Equipment Inc., Canada
14. เครื่องวัดความชื้น (Moisture Determination Balance); รุ่น FD-600, Kett Electric Laboratory, Japan
15. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter); Denver Instrument, Germany
16. ตู้อบ (Hot air oven); รุ่น Venticell, Brand MMM, Germany
17. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath); รุ่น WB 29, Memmert GmbH, Germany
18. กล้องจุลทรรศน์ (Microscope), รุ่น BX-51, Olympus, Japan
19. เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester); Frank, Germany
20. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength tester); รุ่น Strograph E-S, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan

21. เครื่องตัดกระดาษเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Sheet cutter); รุ่น Saltaranpur, Germany
22. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear resistance tester); รุ่น Pro-Tear, Thwing-Albert Instrument Company, USA
23. เครื่องวัดสมบัติทางแสงของกระดาษ (Brightness tester); รุ่น Color Touch PC, Technidyne corporation, USA
24. เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester); รุ่น Digi-Bekk, Smoothness Tester No. 168, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan
25. เครื่องวัดความต้านทานการซึมอากาศ (Air resistance) Gurley type Porosimeter Model B No. 158, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan
26. เครื่องมือทดสอบความแข็งตึงของกระดาษ (Stiffness tester); รุ่น 150-B, Taber[®] V-5 Stiffness Tester, Taber[®] Industries, USA
27. เครื่องวัดแรงกด (Crush tester); Type 48, L&W Crush tester, Lorentzen & Wettre, Finland
28. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength tester); รุ่น GT-7013-A1, Gotech testing machines inc., Taiwan
29. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength tester); รุ่น Lorentzen & Wettre, Sweden
30. อุปกรณ์วัดค่าการดูดซึมน้ำ (Cobb tester), Regmed Industria Technica de Frecisao, Brazil
31. เครื่องทดสอบสภาพพิมพ์ได้ (Printability tester); IGT รุ่น F1, IGT Testing System, Netherlands
32. เครื่องวัดความดำ (Color Reflection Densitometer) IHARA รุ่น R730, Ihara Electronic Industries Co., Ltd., Japan
33. กระบอกตวงขนาด 25, 100, 1000 มิลลิลิตร
34. ปีกเกอร์ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิลิตร
35. แท่งแก้วคนสาร
36. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
37. ปิเปต (Pipet)

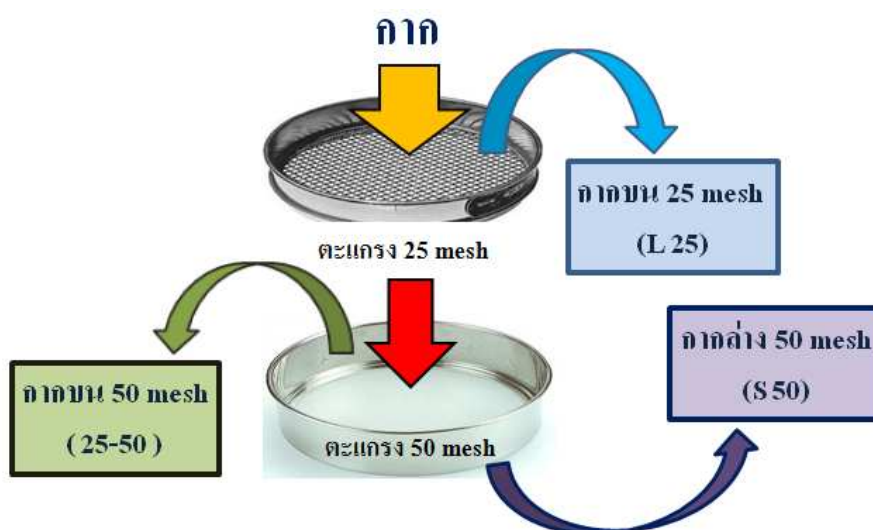
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้วด้วยวิธีโซดา และทำการเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกล ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ดังนี้คือ

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: หาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งออก

3.2.1.1 การคัดขนาดกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังที่นำมาใช้งานนั้นมีขนาดชิ้นกากที่หลากหลาย ทำให้ต้องมีการคัดขนาดกากมันสำปะหลังก่อนการนำมาใช้งาน โดยการนำกากมันสำปะหลังไปร่อนผ่านตะแกรง 2 ขนาด คือ ขนาด 25 เมช (รูเปิด 0.71 มิลลิเมตร) และขนาด 50 เมช (รูเปิด 0.297 มิลลิเมตร) ได้กากมันสำปะหลังออกมาทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ค้างบนตะแกรง 25 เมช (L 25) ส่วนที่ค้างบนตะแกรง 50 เมช (25-50) และส่วนที่ลอดผ่านตะแกรง 50 เมช (S 50) ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 การคัดขนาดกากมันสำปะหลังด้วยตะแกรงขนาด 25 เมชและ 50 เมช ตามลำดับ

เหตุที่เลือกใช้ตะแกรง 2 ขนาดนี้ (ขนาด 25 เมช และ 50 เมช) เนื่องจากงานวิจัยของศุภลักษณ์ [66] พบว่าตะแกรงขนาด 25 เมช จะให้ผลการคัดขนาดที่ดี นอกจากนี้ผลที่ได้จากการคัดขนาดด้วยเครื่องแยกความยาวของเส้นใย (Bauer McNett Classifier) ใน Unit 2 (50 เมช) แสดงให้เห็นถึงการคัดแยกเส้นใยได้ปริมาณมากที่สุด จึงตัดสินใจเลือกใช้ตะแกรงทั้ง 2 ขนาดนี้ เพื่อให้ได้เส้นใยที่เล็กและละเอียดมากขึ้น

จากนั้นนำกากมันสำปะหลังที่ได้ในแต่ละส่วนไปทำการส่องดูลักษณะทาง สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้กากมัน สำปะหลังเฉพาะส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

3.2.1.2 การขจัดแป้ง

กากมันสำปะหลังยังคงมีแป้งหลงเหลืออยู่ในปริมาณมาก (ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์) จึงต้องนำกากมันไปผ่านขั้นตอนการขจัดแป้งออกก่อนการใช้งาน โดยการนำกากมัน สำปะหลังที่ได้ในแต่ละส่วนไปวัดความชื้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักกากเปียกมาประมาณ 700 กรัม เทใส่ลงไปในเครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) ดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 เครื่องตีกระจายเยื่อ [69]

เติมน้ำกลั่นตามลงไป 3000 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากัน แล้วทำการปรับค่า ความเป็นกรด-เบส (pH) ของน้ำเยื่อให้อยู่ในช่วงประมาณ 6.5-7.0 ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการ ทำงานของแอลฟา-อะไมเลส แต่โดยปกติแล้วจะวัดค่าได้ประมาณ 4-5 เนื่องจากภายในกากจะมี แบคทีเรียบางชนิดปะปนอยู่ ทำให้เกิดการย่อยสลายกากมัน ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบสของ กากมันมีสภาพเป็นกรด จึงต้องทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลางมากขึ้นโดยการเติม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3% ลงไป ปรับค่าจนกว่าจะได้ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 6.5-7.0 จากนั้นจึงทำการเติมแอลฟา-อะไมเลสลงไปประมาณ 60.12 LU/ml ทำการปั่น กวนพร้อมกับการให้ความร้อนไปด้วย จนอุณหภูมิสูงประมาณ 90 องศาเซลเซียส จับเวลาต่ออีก 10 นาที ทำการตรวจสอบแป้งที่เหลืออยู่ในกากมันสำปะหลังด้วยการหยดไอโอดีนลงไปในกากที่ สุ่มขึ้นมาบางส่วน หากมีการเปลี่ยนสีจะต้องทำการสกัดไปเรื่อยๆ จนกว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนสี

ของไอโอดีน นั่นคือ ไม่พบแบ่งเหลือในกากแล้ว จึงนำกากที่ได้ไปปั่นแห้ง ซึ่งน้ำหนักและวัดความชื้น ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากกากมันสำปะหลังแต่ละส่วน ได้แก่ ไฮโดรเซลลูโลส โดยวิธี Acid chlorite ของ Browning [70] แอลฟาเซลลูโลสและลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88 [71] เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าการขจัดแบ่งนั้นส่งผลต่อเส้นใยจากมันสำปะหลังอย่างไร

3.2.1.3 การผลิตเยื่อเชิงเคมี

คัดเลือกกากมันสำปะหลังที่มีลักษณะเหมาะสมต่อการผลิตเยื่อมาใช้งาน โดยนำไปทำการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาตรร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO₃) ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร และเอทานอล (C₂H₅OH) ปริมาตรร้อยละ 92.86 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จุดประสงค์ในการนำสารเคมีเหล่านี้มาใช้ในการวิจัย เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อเชิงเคมี เนื่องจากยังไม่ทราบว่ากากมันสำปะหลังที่นำมาใช้งานนั้น มีความเหมาะสมต่อการผลิตเยื่อในภาวะใด จึงได้ทำการทดลองทั้ง 3 ภาวะ คือ ภาวะที่เป็นกรดอ่อน (โซเดียมไบซัลไฟต์) ภาวะที่เป็นกลาง (เอทานอล) และภาวะที่เป็นด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์) โดยอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L: W) คือ 8 ต่อ 1 และภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อ คือ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแบ่งแล้วมาบรรจุลงในบอมบ์ (Bomb) ซึ่งเป็นภาชนะที่ใช้สำหรับต้ม
- 2) ทำการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการต้มและปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่มเข้าไปตามวิธีการคำนวณที่แสดงในภาคผนวก จากนั้นจึงทำการเติมสารเคมีแต่ละชนิดและน้ำที่คำนวณได้ลงไปบอมบ์แต่ละบอมบ์
- 3) ปิดฝาบอมบ์ให้แน่นสนิท แล้วนำไปใส่ในเครื่องต้มเยื่อ (Autoclave digester) ดังแสดงในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 เครื่องต้มเยื่อ

เปิดสวิทช์ทำความร้อน (Heater) จนอุณหภูมิภายในเครื่องต้มเยื่อสูงประมาณ 120 องศาเซลเซียส ทำการจับเวลาจนครบ 120 นาที นำบอมบ์ออกจากเครื่องต้มเยื่อ จากนั้นทำการฉีดน้ำหล่อให้บอมบ์เย็นลง ไซบอมบ์นำเยื่อต้มออกมาทำการล้างน้ำ บั่นแห้งและชั่งน้ำหนัก ตามลำดับ

3.2.1.4 ชั้นแผ่นกระดาษทดสอบ

นำกากมันสำปะหลังที่ได้รวมทั้งกากมันที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (Control) ไปผสมกับเยื่อใยสั้น (HW) ในสัดส่วนกากมันสำปะหลังร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ โดยในที่นี้ จะมีการใช้เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator) ดังแสดงในภาพที่ 3-4 เพื่อช่วยในการกระจายตัวของกากมันสำปะหลัง เนื่องจากกากมันค่อนข้างเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน จึงต้องทำการตีกระจายก่อนนำไปผสมกับเยื่อใยสั้นที่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 โดยบดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) อยู่ในช่วง 350 ± 30 มิลลิเมตร เพื่อขึ้นแผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัม/ตารางเมตร โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Kothen ดังแสดงในภาพที่ 3-5 ตามมาตรฐาน ISO 5269-2:1998 [72] ที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อ 0.3 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3-4 เครื่องตีกระจายเยื่อ



ภาพที่ 3-5 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Kothen

ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษ ได้แก่ ความหนาแน่น ตามมาตรฐาน TAPPI T411 om-97 ความเรียบ ตามมาตรฐาน TAPPI T479 cm-99 ความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 และความต้านทานแรงฉีก ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [71]

จากผลการทดลองในขั้น 3.2.1 ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกใช้ขนาดกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อและทราบถึงภาวะที่เหมาะสมตลอดจนการเลือกใช้สารเคมีที่จะนำมาผลิตเยื่อในขั้น 3.2.2 ต่อไปได้

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง

3.2.2.1 การคัดขนาดและขจัดแป้ง

นำกากมันสำปะหลังมาคัดเอาเฉพาะขนาดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 1 มาทำการขจัดแป้งตามข้อ 3.2.1.2 จากนั้นนำกากที่ขจัดแป้งได้ไปทำการปั่นแห้ง ชั่งน้ำหนักและวัดความชื้น ตามลำดับ รวมถึงทำการคำนวณค่าผลผลิตเยื่อ (Pulp yield) ที่ได้หลังการขจัดแป้งด้วย

3.2.2.2 การผลิตเยื่อ

ทำการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2.2.1 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ซึ่งเป็นภาวะที่พบว่าดีที่สุดจากการทดลองตอนที่ 1) ดังต่อไปนี้

แบ่งกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วส่วนหนึ่งมาทำการต้มเยื่อแบบโซดาในภาวะต่างๆ ดังนี้คือ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 18, 20, 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

อุณหภูมิในการต้ม 100, 120, 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 และ 180 นาที โดยอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L: W) ที่ใช้ในการต้มเยื่อครั้งนี้ คือ 16 ต่อ 1 เพื่อช่วยให้สารเคมีสามารถแทรกซึมเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) นำกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้วมาบรรจุลงในบอมบ์ (Bomb) ทำการคำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มและปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่มเข้าไปในแต่ละบอมบ์ตามวิธีการคำนวณที่แสดงในภาคผนวก จากนั้นจึงทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่คำนวณได้ลงไปบอมบ์

2) ปิดฝาบอมบ์ให้แน่นสนิท แล้วนำไปใส่ในเครื่องต้มเยื่อ (Autoclave digester) เปิดสวิตซ์ทำความร้อน (Heater) ทำการต้มเยื่อตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดไว้ในแต่ละภาวะ เมื่อครบตามกำหนดนำบอมบ์ออกจากเครื่องต้มเยื่อ ฉีดน้ำหล่อให้บอมบ์เย็นลง ไขบอมบ์ นำเยื่อต้มออกมา จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำดำ (Black liquor) ออกมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณต่างตกค้างในเยื่อ (residual alkali) อยู่ในน้ำดำหลังจากการต้มเยื่อ ตามมาตรฐาน SCAN standard N33:94 [73] โดยการทำซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ จากนั้นนำเยื่อมาล้างน้ำ บั่นแห้งและชั่งน้ำหนัก ตามลำดับ

3) ทำการคำนวณค่าผลผลิตเยื่อ (Pulp yield) ที่ได้และตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology) กับเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะ เยื่อกากที่ไม่ผ่านการต้มเยื่อ (Control) และเยื่อใยสั้น (Hardwood) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065-1:2001 [72] ดังแสดงในภาพที่ 3-6 โดยจำนวนเส้นใยที่ใช้วัดคือ 5000 เส้น และในแต่ละภาวะจะมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ข้อมูลเกี่ยวกับความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย (Width) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) ปริมาณกระจุกเส้นใย (Shives) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (Curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (Kink index)



ภาพที่ 3-6 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย [74]

3.2.2.3 ขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบ

นำกากมันสำปะหลังแต่ละภาวะไปผสมกับเยื่อใยสั้น (Hardwood) ที่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [71] ให้ได้ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) อยู่ในช่วง 350 ± 30 มิลลิลิตร ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-99 [72] โดยผสมในสัดส่วนกากร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ เพื่อขึ้นแผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัม/ตารางเมตร โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นแบบ Rapid-Kothen ตามมาตรฐาน ISO 5269-2:1998 [72] ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษ ได้แก่

- **น้ำหนักมาตรฐาน (Grammage)** คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งส่วนใหญ่จะวัดในหน่วยของกรัมต่อตารางเมตร หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แกรม (Gram) โดยวัดได้จากการนำเอาแผ่นทดสอบที่ผลิตขึ้นมาทำการชั่งน้ำหนักแล้วนำค่าที่ได้ไปหารด้วยพื้นที่ของแผ่นทดสอบ ตามมาตรฐาน TAPPI T410 om-98 [71]

- **ความหนา (Thickness)** คือ ระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบ โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ภายใต้ภาวะควบคุมตามมาตรฐาน TAPPI T411 om-97 [71] ค่าที่วัดได้จะออกมาในหน่วยมิลลิเมตร



ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดความหนา

- **ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density)** คำนวณได้จากการนำค่าน้ำหนักมาตรฐานไปหารด้วยความหนาของแผ่นทดสอบนั้นๆ ตามมาตรฐาน TAPPI T411 om-97 [71]

- **ความเรียบ (Smoothness)** จะเป็นการปล่อยลมผ่านผิวหน้ากระดาษด้านล่าง แล้วทำการจับเวลากระทั่งลมผ่านผิวหน้ากระดาษจนหมด คิดในหน่วยวินาที ทำการวัดความเรียบตามมาตรฐาน TAPPI T479 cm-99 [71] ด้วยเครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-8 ยิ่งเวลามาก แสดงว่ากระดาษมีความเรียบสูง อาจหมายความว่ากระดาษแผ่นนั้นเนื้อแน่น เส้นใยสานตัวแนบชิดและสร้างพันธะกันได้ดี



ภาพที่ 3-8 เครื่องวัดความเร็ว

- **ความต้านทานการซึมอากาศ (Air resistance)** โดยปกติเราจะไม่ทำการวัดความพรุนโดยตรง แต่จะทำการวัดความสามารถในการยอมให้อากาศไหลผ่านของกระดาษ (Air resistance) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวน ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุนในกระดาษเป็นหลัก ส่วนใหญ่แล้วการที่กระดาษมีความพรุนมากจะทำให้สมบัติทางด้านความแข็งแรง เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile) ความต้านทานแรงดันทะลุ (Burst) ลดลง นอกจากนี้ยังบอกถึงความสามารถในการดูดซับของเหลวของกระดาษได้อีกด้วย จึงมีความสำคัญต่อการนำกระดาษไปใช้งาน หรือนำไปพิมพ์นั่นเอง โดยทั่วไปการวัดความต้านทานการซึมอากาศนี้จะทำการวัดด้วยเครื่องวัดความต้านทานการซึมอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3-9 ตามมาตรฐาน TAPPI T 460 om-02 [71]



ภาพที่ 3-9 เครื่องวัดความต้านทานการซึมอากาศ

- **ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)** คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะสามารถรับได้ก่อนที่จะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ทำการวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ตามมาตรฐาน TAPPI T 494

om-01 [71] โดยทำการสุ่มตัวอย่างกระดาษในแต่ละภาวะมาประมาณ 5 แผ่น แต่ละแผ่นจะทำการวัด 2 ครั้ง จากนั้นนำไปคำนวณค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) โดยการนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่วัดได้หารด้วยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ เพื่อรายงานผลออกมา ซึ่งค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยภายในกระดาษเป็นหลัก



ภาพที่ 3-10 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง

- **ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength)** เป็นการทดสอบความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงที่มากกระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ของกระดาษ ก่อนที่จะเกิดการแตกออกเนื่องจากแรงดันของลูกยางที่พุ่งตัวขึ้นมาจากเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-11 ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 [71] โดยทำการสุ่มตัวอย่างกระดาษในแต่ละภาวะมา 5 แผ่น แต่ละแผ่นทำการวัด 2 ด้าน คือ ด้านบน (Top side) และด้านล่าง (Bottom side) ด้านละครั้ง มีหน่วยเป็นกิโลปาสคาล (kPa) จากนั้นทำการคำนวณค่าออกมาเป็นดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index) โดยการนำค่าที่อ่านได้จากเครื่องไปทำการหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษแต่ละแผ่น ซึ่งค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุนี้จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังนั้นค่าทั้ง 2 นี้ส่วนใหญ่จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 3-11 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

- **ความต้านทานแรงฉีก (Tear resistance)** เป็นการทดสอบความสามารถของแผ่นกระดาษในการต้านแรงที่ใช้ในการฉีกต่อจากแนวตัดเริ่มต้น มีหน่วยเป็นมิลลินิวตัน (mN) ทำการวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear resistance tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-12 โดยใช้วิธีวัดแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [71] โดยทำการสุ่มตัวอย่างกระดาษมา 5 แผ่น แต่ละแผ่นวัด 2 ครั้ง จากนั้นทำการแปลงเป็นดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) โดยนำค่าที่วัดได้จากเครื่องไปหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน ซึ่งค่าความต้านทานแรงฉีกนี้ จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของตัวเส้นใยและความยาวของเส้นใยเป็นหลัก



ภาพที่ 3-12 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก

3.2.2.4 วิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาภาวะการผลิตเยื่อเชิงเคมีที่ดีที่สุด จากนั้นนำเยื่อจากการต้มด้วยภาวะที่ดีที่สุดไปหาค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-99 [71] โดยค่าสภาพระบายได้นี้ คือ ความสามารถในการระบายน้ำ (Drainage) ของเส้นใย หรือ

อีกนัยหนึ่งคือการลุ่มน้ำของเส้นใยนั่นเอง ซึ่งสามารถทดสอบด้วยเครื่องหาค่าสภาพระบายได้ (Freeness tester) มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3-13 หากค่าสภาพระบายได้ของเยื่อสูงหมายความว่ากระบวนการระบายน้ำของเยื่อทำได้เร็ว มีการลุ่มน้ำของเส้นใยน้อย ในทางกลับกันหากได้ค่าสภาพระบายได้ต่ำแสดงว่ากระบวนการระบายน้ำของเยื่อทำได้ช้า มีการลุ่มน้ำของเส้นใยสูง



ภาพที่ 3-13 เครื่องหาค่าสภาพระบายได้

นำข้อมูลที่ได้จากภาวะในการต้มเยื่อแบบต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี ANOVA แบบ Factorial design ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อดูว่าภาวะในการต้มเยื่อแบบต่างๆ ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

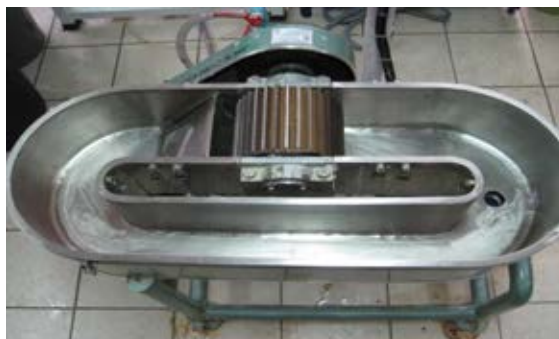
3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: เปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้ว

ในขั้นตอนนี้จะนำเยื่อเคมีจากภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองตอนที่ 2 มาทำการเปรียบเทียบกับเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีเชิงกล โดยนำไปทดแทนเยื่อรีไซเคิลจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) เพื่อผลิตเป็นกระดาษผิวกล่องหรือกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก ดังนี้

3.2.3.1 การผลิตเยื่อเชิงกล

นำกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วส่วนที่เหลือมาทำการบดเยื่อโดยใช้เครื่อง Valley beater ดังแสดงในภาพที่ 3-14 ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [71] โดยบดเยื่อ 2 ระดับ ได้แก่ บดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้อยู่ในช่วง 350 ± 30 มิลลิลิตร และบดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้เท่ากับเยื่อจากภาวะการต้มที่ดีที่สุดจากข้อ 3.2.1 จากนั้นทำการคำนวณค่าผลผลิตเยื่อ (Pulp yield) ที่ได้และตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber

morphology) กับเยื่อเชิงกลที่ผลิตได้ทั้ง 2 ระดับ และเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065-1:2001 [72]



ภาพที่ 3-14 เครื่องบดเยื่อ

3.2.3.2 การเตรียมเยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp)

เยื่อรีไซเคิลที่ใช้ในการทดลองนี้มาจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าแบบหน้าเดียว (Single face) ไม่พิมพ์ลายและยังไม่ผ่านการใช้งานแต่อย่างใด ความชื้นประมาณ 10 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ทำการชั่งน้ำหนักให้ได้ 360 กรัมแห้ง นำไปแช่น้ำทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [71] ให้ได้ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) อยู่ในช่วง 350 ± 30 มิลลิลิตร ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-99 [71]

3.2.3.3 ขึ้นแผ่นกระดาษแข็งประกบลูกฟูก

คัดเฉพาะกากมันสำปะหลังที่ผ่านขั้นตอนการต้มเยื่อแบบโซดาในภาวะที่ดีที่สุด (จากข้อ 3.2.1) และกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบดเยื่อ 2 ระดับ (จากข้อ 3.2.3.1) รวมถึงกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านขั้นตอนการผลิตเยื่อแต่อย่างใด (Control) มาทำการผสมกับเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) ที่เตรียมไว้ ในสัดส่วนกากมันสำปะหลังร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ จากนั้นนำเยื่อผสมทุกภาวะและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกล้วน (ภาวะควบคุม) ไปทำการเติมสารเติมแต่งต่างๆ ในปริมาณดังนี้ คือ แป้งประจุบวกซึ่งเป็นสารให้ความแข็งแรงที่ร้อยละ 1.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และสารกันซึม Alkyl ketene dimer (AKD) ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยสาเหตุที่เลือกสัดส่วนสารเติมแต่งตามนี้ เนื่องจากในงานวิจัยของเขมรศมีและอิงเสียง [75] พบว่าการเติมแป้งไปร้อยละ 0.8 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการใช้สารกันซึม (AKD) ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและค่าการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์ที่อุตสาหกรรมกำหนด (มอก.) ของกระดาษผิวกล่อง [71] แต่เนื่องจากแป้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นคนละตัวกับแป้งที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าว จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของแป้งที่ร้อยละ 1.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งตามคำแนะนำของผู้ผลิตแทน จากนั้นขึ้นแผ่นกระดาษแข็งประกบลูกฟูกให้ได้น้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัม/ตารางเมตร

3.2.3.4 ทดสอบสมบัติกระดาษ

นำกระดาษแข็งประกบลูกฟูกที่ผลิตได้ ไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษดังนี้

- สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักมาตรฐาน ตามมาตรฐาน TAPPI T410 om-98 ความหนาและความหนาแน่น ตามมาตรฐาน TAPPI T411 om-97 ความเรียบ ตามมาตรฐาน TAPPI T479 cm-99 ความต้านทานการซึมอากาศ ตามมาตรฐาน TAPPI T 460 om-02 ความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 ความต้านทานแรงฉีก ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 ความแข็งตึงของกระดาษ (Stiffness) ตามมาตรฐาน TAPPI T566 om-02 [71] วัดด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งตึงของกระดาษ (Stiffness tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 เครื่องวัดค่าความแข็งตึงของกระดาษ

- สมบัติของกระดาษแข็งประกบลูกฟูก ได้แก่ การดูดซึมน้ำ (Cobb test) วัดด้วยอุปกรณ์วัดค่าการดูดซึมน้ำ (Cobb tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-16 ตามมาตรฐาน TAPPI T 411 om-04 [71] ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับวัดค่าการซึมน้ำของกระดาษ กระดาษแข็งและกระดาษกล่องลูกฟูกที่ผ่านการใส่สารเติมแต่ง (Sizing) แล้ว โดยค่าที่วัดได้จะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเมื่อเกิดการสัมผัสกับน้ำ เช่น กล่อง หรือ ถัง โดย

ผลิตภัณฑ์บางประเภทจะต้องการการดูดซึมน้ำมาก แต่บางประเภทอาจต้องการการดูดซึมน้ำแค่พอสมควร เช่น กระดาษทำลอนลูกฟูก เป็นต้น [76]



ภาพที่ 3-16 อุปกรณ์วัดค่าการดูดซึมน้ำ

ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 [71] โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength tester) ค่าที่วัดได้จะบ่งบอกถึงความเหนียวของกระดาษในการต้านแรงดันทะลุซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เช่น กล่องกระดาษลูกฟูก เป็นต้น [76]

ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring crush resistance) หมายถึงความสามารถของกระดาษที่ต้านทานแรงกดในแนวระนาบเดียวกับกระดาษ จนขอบกระดาษหักพับลงได้ [76] มีหน่วยการวัดเป็นกิโลนิวตัน (kN) ตามมาตรฐาน ISO 12192:2002 [72] โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดแรงกด (Crush tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 เครื่องวัดแรงกด

- สมบัติเชิงแสงของกระดาษ ได้แก่ ความขาวสว่าง (Brightness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 [71] โดยเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร ของแผ่นกระดาษ ซึ่งเป็นช่วงของการสะท้อนแสงสีน้ำเงิน ทำการวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง ดังแสดงในภาพที่ 3-18 โดยการสุ่มตัวอย่างกระดาษในแต่ละภาวะมา 5 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะวัด 3 ตำแหน่ง และความทึบแสง (Opacity) ตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 [71] ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการกันแสงไม่ให้ทะลุผ่านแผ่นกระดาษ หากมีค่าน้อยแสดงว่ากระดาษมีความทึบแสงต่ำ โดยทำการสุ่มกระดาษตัวอย่างจากแต่ละภาวะมา 5 แผ่น ในแต่ละแผ่นวัด 3 ตำแหน่ง สามารถทำการวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสงเช่นเดียวกับการวัดค่าความขาวสว่าง



ภาพที่ 3-18 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง

- สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษ วัดโดยทำการพิมพ์พื้นตาย (Solid) บนกระดาษแข็ง ประกอบลูกฟูกด้วยเครื่องทดสอบสภาพพิมพ์ได้สำหรับระบบการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี IGT F1 ดังแสดงในภาพที่ 2-17 โดยตั้งแรงกดระหว่างแอนนิลออกซ์กับแม่พิมพ์ (Anilox force) ที่ 100 นิวตัน แรงกดระหว่างแม่พิมพ์กับวัสดุพิมพ์ (Printing force) ที่ 250 นิวตัน ความเร็วในการพิมพ์ที่ 0.3 เมตรต่อวินาที และใช้หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ จากนั้นทำการวัดสมบัติทางการพิมพ์ นั่นคือ ความดำ (Print Density) ของแผ่นพิมพ์ด้วยเครื่องวัดความดำ IHARA R730 Color Reflection Densitometer ดังแสดงในภาพที่ 2-18

3.2.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้จากการผลิตเยื่อเชิงเคมีและเชิงกลมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA แบบ Single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการผลิตเยื่อแต่ละแบบส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยและสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

3.2.3.6 วิเคราะห์ผลเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

นำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เพื่อจะได้ทราบว่ากระดาษแข็งประเภทลูกฟูกที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือไม่อย่างไร โดยกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดให้กระดาษเหนียวสำหรับทำกระดาษฝักกล่องหรือกระดาษแข็งประเภทลูกฟูกนั้นควรมีคุณลักษณะดังแสดงในตารางที่ 3-1 ตามมาตรฐาน TAPPI T808 [71]

ตารางที่ 3-1 คุณลักษณะของกระดาษเหนียวสำหรับผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก [71]

รายการ	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัมต่อตารางเมตร)			
	125	185	230	335
น้ำหนักมาตรฐานในภาวะทดสอบความคลาดเคลื่อนได้ร้อยละ	±5	±5	±5	±5
ปริมาณความชื้นสูงสุดร้อยละ	10	10	10	10
แฟกเตอร์ของการดันทะลุต่ำสุด (กิโลปาสคาล/กรัมต่อตารางเมตร)	2.94	2.94	2.94	2.94
การดูดซึมน้ำต่อ 2 นาที สูงสุด (กรัมต่อตารางเมตร)				
- ด้านสัทพลาด	30	30	30	30
- ด้านตะแกรง	40	40	40	40

บทที่ 4

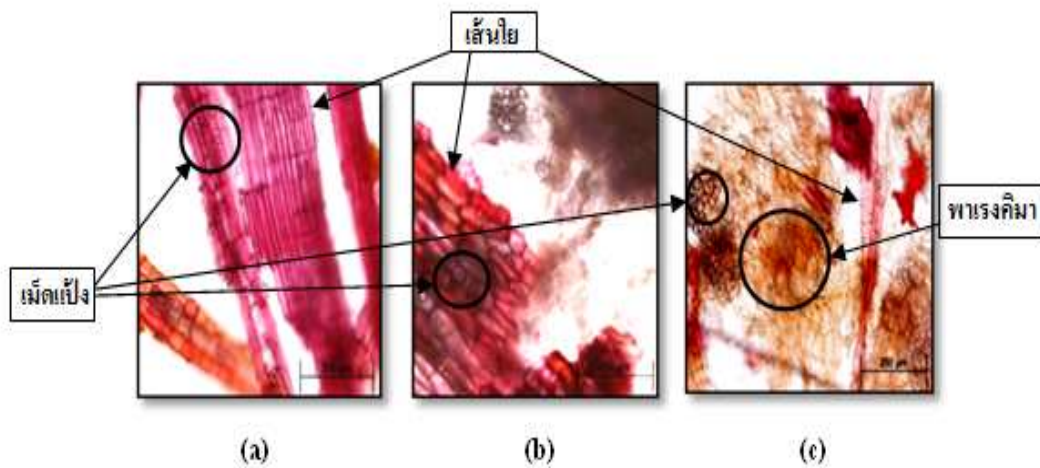
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1: หาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งออก

กากมันสำปะหลังที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ยังคงมีเศษเปลือก หรือชิ้นกากขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับชิ้นส่วนขนาดเล็กมาก ทำให้มีขนาดที่หลากหลาย จึงได้มีการนำกากมันสำปะหลังดังกล่าวไปผ่านขั้นตอนการคัดขนาดก่อนด้วยการนำไปร่อนผ่านตะแกรง 2 ขนาด คือ ขนาด 25 เมช (รูเปิด 0.71 มิลลิเมตร) และขนาด 50 เมช (รูเปิด 0.297 มิลลิเมตร) ได้กากมันสำปะหลังออกมาทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ค้างบนตะแกรง 25 เมช (L 25) ส่วนที่ค้างบนตะแกรง 50 เมช (25-50) และส่วนที่ลอดผ่านตะแกรง 50 เมช (S 50) ซึ่งลักษณะของกากมันสำปะหลังแต่ละส่วนจะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก จึงได้นำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อประโยชน์ในการนำกากมันสำปะหลังแต่ละส่วนไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป ดังแสดงผลในหัวข้อ 4.1.1

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยกากมันสำปะหลังด้วยกล้องจุลทรรศน์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายเส้นใยกากมันจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10x (a) L 25
(b) 25-50 (c) S 50

จากภาพที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่า กากมันสำปะหลังแต่ละส่วนมีลักษณะเส้นใยที่ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 25 เมช (a) และกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำอยู่ระหว่างตะแกรงขนาด 25 และ 50 เมช (b) เส้นใยจะมีลักษณะเกาะกันเป็นแผงและมีกลุ่มก้อนเส้นใยอยู่มาก จึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อ เพื่อแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อไป ส่วนกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช (c) เส้นใยจะมีลักษณะที่เล็กและละเอียดพอสมควร อีกทั้งเมื่อพิจารณาบริเวณโดยรอบจะพบพาราเควอมา (Parenchyma) กระจายตัวอยู่ทั่วไป ลักษณะเช่นนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อต่อ เพราะอาจส่งผลทำให้เส้นใยแตกตัวเป็นเส้นใยขนาดย่อยและละเอียดมากๆ จนสูญเสียสภาพเส้นใยและไม่สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นนี้ จึงตัดสินใจเลือกใช้กากมันสำปะหลังเฉพาะส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 25 เมช (a) และกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำระหว่างตะแกรงขนาด 25 และ 50 เมช (b) มาใช้งาน และด้วยความที่กากมันสำปะหลังทั้ง 2 ส่วนนี้มีลักษณะที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือยังคงเกาะกลุ่มกันเป็นแผงเส้นใย จึงนำมาผสมรวมกันเพื่อทำการผลิตเยื่อต่อไป

นอกจากนี้จากภาพที่ 4-1 ยังพบอีกว่า กากมันสำปะหลังแต่ละส่วนจะมีลักษณะของเม็ดแป้งกระจายตัวอยู่มากมาย ซึ่งแป้งเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพของเส้นใยในการขึ้นแผ่นกระดาษ โดยหากนำกากมันสำปะหลังไปผ่านขั้นตอนการผลิตเยื่อในภาวะที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้เกิดการสุกของแป้งขึ้น จึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถเลือกใช้ภาวะในการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ เพราะการที่แป้งสุกจะทำให้กากเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ในแง่ของความเรียบและความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องนำกากมันสำปะหลังไปผ่านขั้นตอนการขจัดแป้งออกก่อนนำไปผลิตเยื่อที่อุณหภูมิสูง โดยได้มีการวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากกากมันสำปะหลังแต่ละส่วนทั้งก่อนและหลังการขจัดแป้ง เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าการขจัดแป้งนั้นส่งผลต่อเส้นใยจากมันสำปะหลังอย่างไร ดังแสดงผลในหัวข้อ 4.1.2

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากมันสำปะหลังแต่ละส่วน หลังการขจัดแป้งเปรียบเทียบกับส่วน 25-50 ที่ไม่ได้ผ่านการขจัดแป้ง จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบเคมีในกากมันสำปะหลัง (ร้อยละ)

ตัวอย่าง	ไฮโดรเซลลูโลส	ลิกนิน	แป้ง	อื่นๆ	รวม
25-50	40.43	9.61	33.68	16.28	100.00
25-50 สกัด	45.98	7.29	0.00	13.05	66.32
L 25 สกัด	43.66	11.78	0.00	6.04	61.48
S 50 สกัด	45.06	6.40	0.00	16.03	67.49

จากตารางที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบทางเคมีในเส้นใยกากมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะเป็นไฮโดรเซลลูโลส รองลงมาคือ แป้ง ลิกนินและองค์ประกอบอื่นๆ ตามลำดับ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้วในแต่ละส่วนพบว่าปริมาณไฮโดรเซลลูโลสมีค่าสูงใกล้เคียงกัน แสดงว่ากากมันสำปะหลังแต่ละส่วนมีปริมาณเส้นใยอยู่มากพอสมควร จึงน่าจะสามารถนำมาใช้เป็นเส้นใยทดแทนเยื่อกระดาษจากไม้สำหรับการผลิตกระดาษได้

ส่วนปริมาณลิกนินในกาก L 25 สกัดจะมีมากที่สุด รองลงมาคือ 25-50 สกัดและ S 50 สกัดตามลำดับ จากผลที่ได้ตรงนี้จึงเป็นข้อสนับสนุนสำหรับการนำกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 25 เมช (L 25) และกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 50 เมช (25-50) มาผลิตเยื่อต่อ เนื่องจากลิกนินยังคงมีอยู่ในปริมาณสูง ทำให้ต้องนำไปกำจัดลิกนินออกก่อนจึงจะใช้งานได้ แต่สำหรับกากมันสำปะหลังส่วนที่ลอดผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช (S 50) นั้นจะมีปริมาณลิกนินอยู่น้อย จึงไม่จำเป็นต้องนำไปกำจัดออกอีก ดังนั้นจึงคัดเฉพาะกากส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 25 เมช (L 25) และกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 50 เมช (25-50) มาใช้งานต่อเท่านั้น โดยนำมาผสมรวมกันแล้วจึงทำการผลิตเยื่อต่อ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 4.1.1

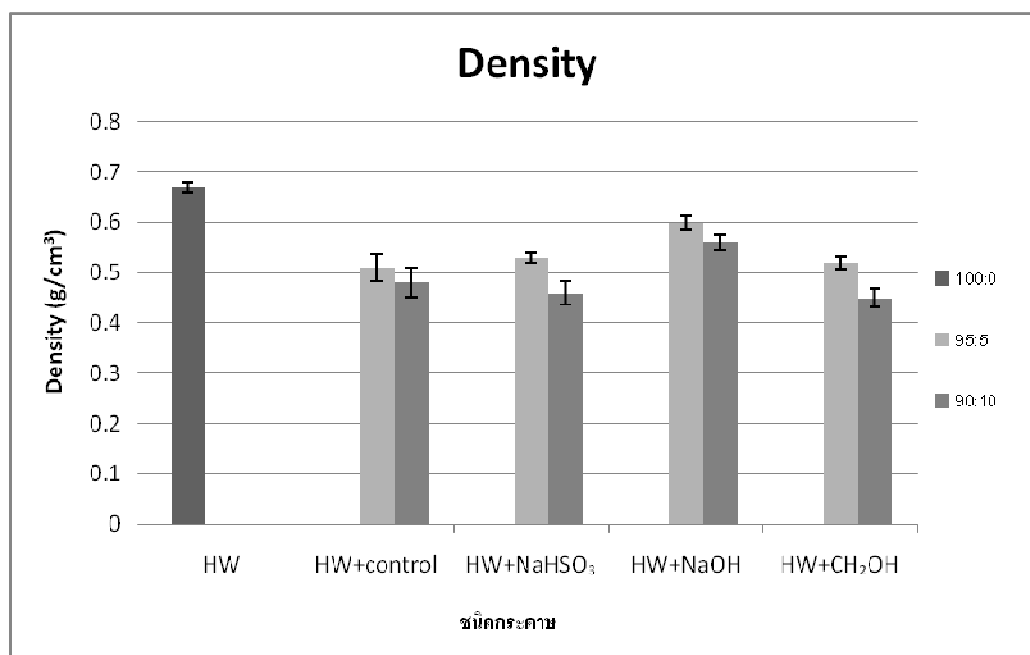
นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างกาก 25-50 ที่ขจัดแป้งและไม่ขจัดแป้งแล้ว พบว่าการขจัดแป้งไม่ได้ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสในกากมันสำปะหลังลดลงแต่อย่างใด นั่นคือเส้นใยไม่ได้ถูกทำลายไปในระหว่างการขจัดแป้ง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเอนไซม์อะไมเลสที่ใช้สำหรับการขจัดแป้งในงานวิจัยนี้มีความจำเพาะต่อแป้งสูง จึงไม่ส่งผลต่อเส้นใยกากมันสำปะหลังแต่ประการใด

4.1.3 ผลของการผลิตเยื่อเชิงเคมีต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ผลิตได้

จากผลการทดลองที่ 4.1.1 และ 4.1.2 ทำให้ทราบว่าควรนำกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 25 เมช (L 25) และกากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 50 เมช (25-50) มารวมกัน เพื่อนำไปทำการผลิตเยื่อเชิงเคมีต่อด้วยสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาณร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ปริมาณร้อยละ 92.86 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นจึงนำไปผสมกับเยื่อใยสั้น (HW) ในสัดส่วนกากร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ เพื่อขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัม/ตารางเมตร และทำการวัดสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของกระดาษ ได้ผลดังนี้

4.1.3.1 ความหนาแน่น (Density)

ผลการวัดความหนาแน่นของแผ่นกระดาษในทุกภาวะ สามารถแสดงดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+C₂H₅OH) ตามลำดับ ในสัดส่วนกากร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ

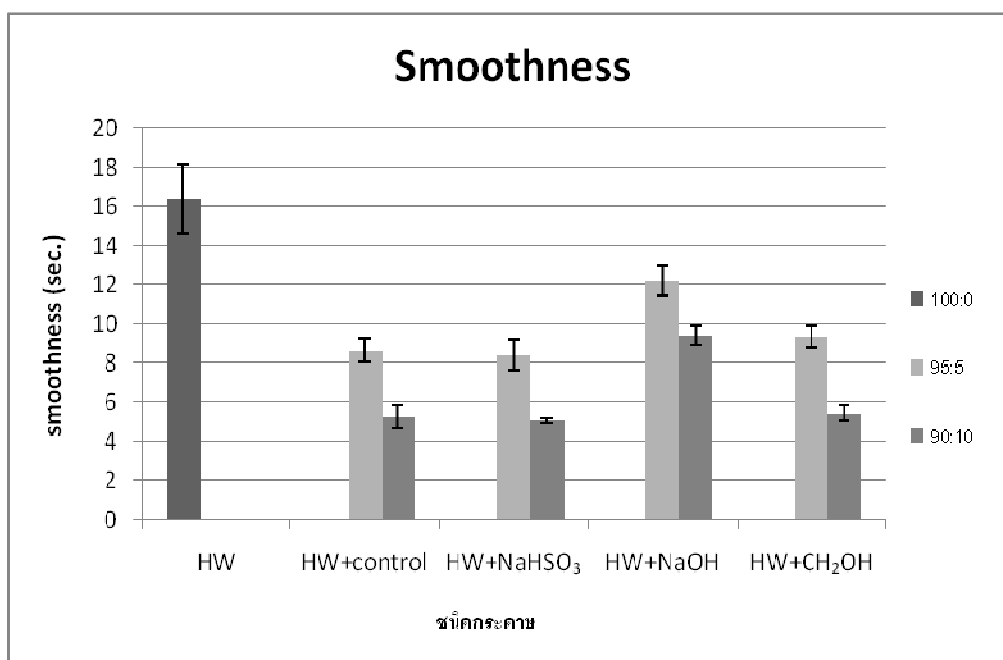
จากภาพที่ 4-2 พบว่าเมื่อทำการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมใน กระดาษไม่ว่าจะเป็นภาวะใดก็ตาม จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นกระดาษที่วัดได้มีค่า ลดลงเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นที่วัดได้จากกระดาษที่ผลิตด้วยเยื่อใยสั้นล้วน (HW) ทั้งสิ้น แสดงว่ากากมันสำปะหลังยังคงมีกลุ่มก้อนกากอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เส้นใยเรียงตัวไม่แนบ ชิดกัน ความหนาแน่นของแผ่นกระดาษที่วัดได้จึงมีค่าต่ำลง เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนการผสมกาก มันในกระดาษมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระดาษที่วัดได้ยิ่งลดต่ำลงตามไปด้วย

หากพิจารณากระดาษที่มีการผสมด้วยกากมันที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่ อย่างใด (HW+Control) เทียบกับกระดาษที่ผสมกากมันซึ่งผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมี ต่างๆ พบว่าการนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีแล้วนำไปผสมกับเยื่อใย สั้นเพื่อขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของกระดาษเพิ่มขึ้น แสดงว่า กระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะช่วยให้เส้นใยกากมันเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น ปริมาณกลุ่มก้อน กากลดลง เส้นใยแนบชิดกันดีขึ้น ความหนาแน่นของแผ่นกระดาษที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น

การผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมี 3 ชนิด พบว่าจะให้ค่าความหนาแน่น ของแผ่นกระดาษที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยกระดาษที่ผสมกากมันซึ่งผ่านการผลิตเยื่อด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนโซเดียมไบซัลไฟต์และเอทานอลจะให้ค่า ความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันและแทบไม่แตกต่างจากกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่ ประการใดเลย แสดงว่ากากมันสำปะหลังที่นำมาผลิตกระดาษมีความเหมาะสมต่อภาวะการผลิต เยื่อแบบต่างมากที่สุดนั่นเอง

4.1.3.2 ความเรียบ (Smoothness)

การผสมกากมันสำปะหลังเข้าไปในกระดาษทุกภาวะ จะส่งผลต่อความ เรียบโดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+C₂H₅OH) ตามลำดับ ในสัดส่วนการร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ

จากภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่ากระดาษที่มีการผสมกากมันสำปะหลังเข้าไปร่วมในการผลิตกระดาษนั้น ไม่ว่าจะเป็นกากชนิดใดก็ตาม จะทำให้ค่าความเรียบของกระดาษที่วัดได้น้อยกว่าค่าความเรียบของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) ในทุกกรณี ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวเส้นใยกากมันสำปะหลังเองยังคงมีกลุ่มก้อนกากมันอยู่ในปริมาณมาก ทำให้เส้นใยในกระดาษไม่แนบชิดกันเท่าที่ควร ส่งผลให้ความเรียบของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากกากผสมมีค่าน้อยกว่าความเรียบที่วัดได้จากกระดาษที่ผลิตด้วยเยื่อใยสั้นล้วน และยังทำการเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังในการผสมมากขึ้น ความเรียบของกระดาษที่ได้จะยิ่งลดลงในทุกกรณี

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเรียบของแผ่นกระดาษที่ผลิตขึ้นจากการผสมกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่อย่างใด (HW+Control) กับแผ่นกระดาษที่มีการผสมกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมีทั้ง 3 ชนิดแล้ว พบว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีแล้ว เมื่อนำไปผสมกับเยื่อใยสั้นเพื่อขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ จะให้ค่าความเรียบของกระดาษที่ดีขึ้นกว่าการนำกากมันสำปะหลังปกติไปผสม แสดงให้เห็นว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้นมีประโยชน์ในการช่วยปรับปรุงสมบัติของเส้นใยกากให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น

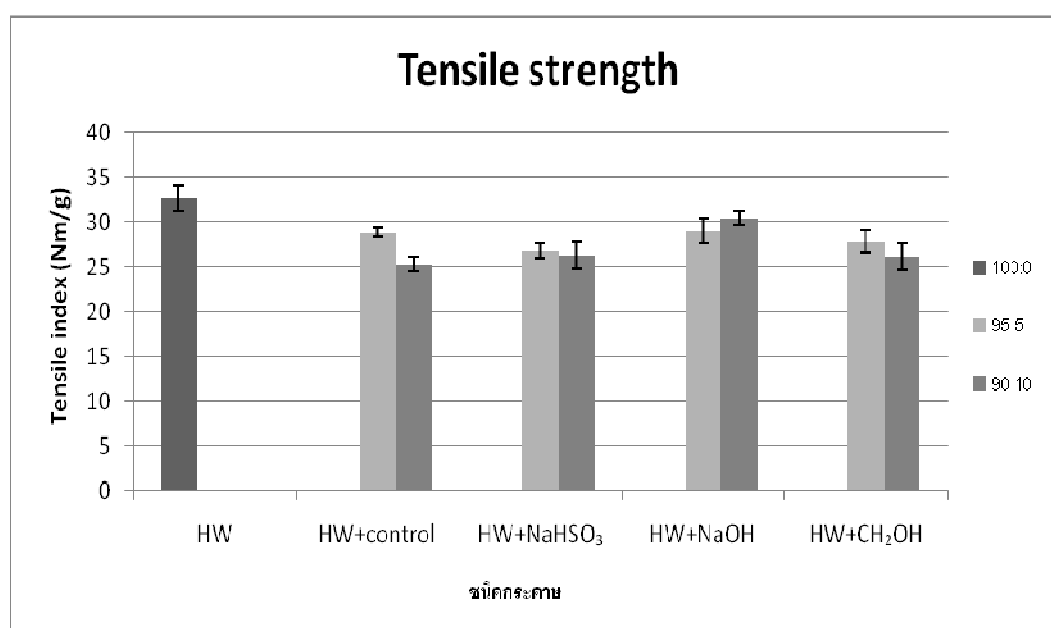
หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การผลิตเยื่อเชิงเคมีช่วยให้เส้นใยกากมันสำปะหลังแยกย่อยได้ดีขึ้น กลุ่มก้อนกากมันหรือกระจุกเส้นใยกากลดน้อยลง ความเรียบของกระดาษที่ผลิตได้จึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมี 3 ชนิด พบว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าความเรียบมากที่สุด รองลงมาคือ เอทานอลและโซเดียมไบซัลไฟต์ ตามลำดับ แสดงว่ากากมันสำปะหลังมีความเหมาะสมต่อการผลิตเยื่อเชิงเคมีในภาวะที่เป็นด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์) มากที่สุด นั่นคือเส้นใยกากมันสำปะหลังจะเกิดการแยกย่อยได้ดีในภาวะที่เป็นด่าง ส่วนภาวะที่เป็นกรดและกลางจะให้ผลความเรียบที่ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก และแทบไม่แตกต่างจากกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่อย่างใดเลย ดังนั้นการผลิตเยื่อเชิงเคมีในภาวะที่เป็นกลางและกรดจึงแทบไม่ได้ส่งผลต่อตัวเส้นใยกากมันสำปะหลังเท่าใดนัก

4.1.3.3 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ผลการทดลองวัดความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้ แสดงดัง

ภาพที่ 4-4



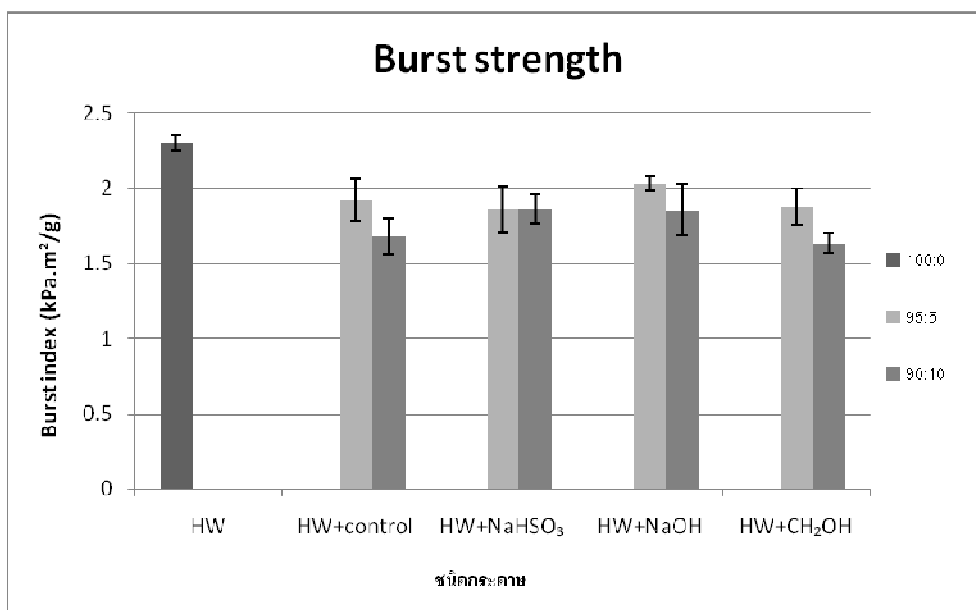
ภาพที่ 4-4 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+C₂H₅OH) ตามลำดับ ในสัดส่วนการร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ

จากภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่ากระดาษที่มีการผสมกากมันสำปะหลังเข้าไปในทุกภาวะ จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษน้อยกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนผสมของกากมันสำปะหลังมากยิ่งขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ได้จะยังมีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวเส้นใยกากมันสำปะหลังจะมีการสร้างพันธะกับเส้นใยจากเยื่อใยสั้น (Bonding) ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยไม่ดี ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงซึ่งขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลักนั้นมีค่าลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณากระดาษที่มีการผสมกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีเปรียบเทียบกับกระดาษที่มีการผสมกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่อย่างใด (Control) พบว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอทานอล จะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นกระดาษที่ได้ใกล้เคียงกับการนำกากมันปกติมาผสมกับเยื่อใยสั้น มีเพียงกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่านั้นที่ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ากากมันสำปะหลังมีความเหมาะสมต่อภาวะการผลิตเยื่อแบบต่างที่สุดและโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เส้นใยกากเกิดการแยกย่อยได้ดี จึงส่งผลให้การสานตัวสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยกากมันและเส้นใยกระดาษเกิดได้ดี ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษสูงขึ้นตามไปด้วย

4.1.3.4 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength)

ผลจากการวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้ในทุกภาวะ จะแสดงดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+C₂H₅OH) ตามลำดับ ในสัดส่วนการร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ

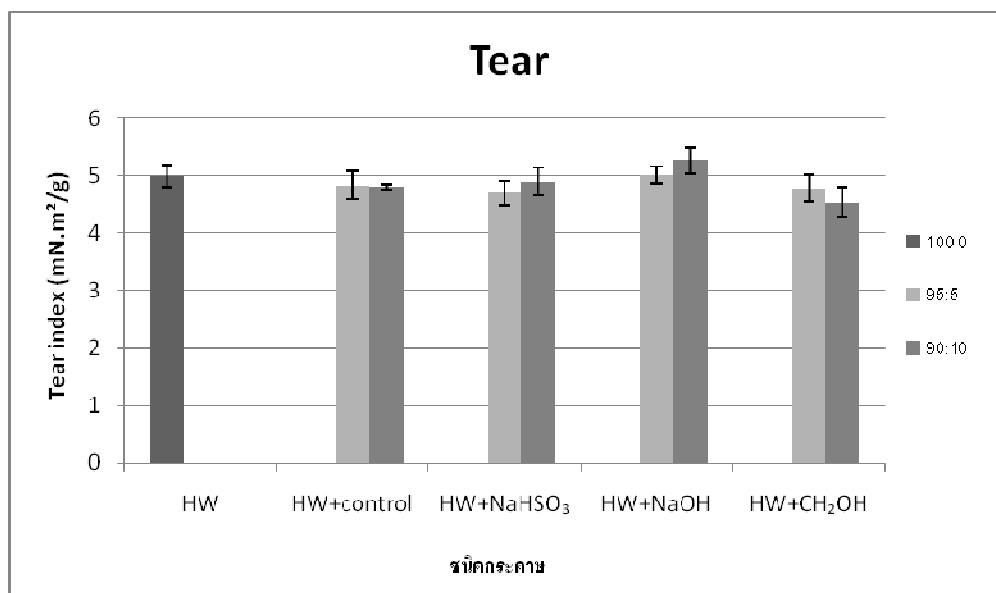
จากภาพที่ 4-5 พบว่าการผสมกากมันสำปะหลังในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นในทุกภาวะจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตได้ลดลงและไม่สามารถเทียบเท่ากับค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อใยสั้นล้วน (HW)

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความแข็งแรงของแผ่นกระดาษที่เตรียมได้จากการนำเยื่อใยสั้นล้วน (HW) ไปผสมกับกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมีทั้ง 3 ชนิดกับกากมันที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่อย่างใด (control) พบว่าการนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์และเอทานอลจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นกระดาษที่วัดได้ใกล้เคียงกับการผสมด้วยกากมันปกติ แสดงว่าสารเคมีทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่ได้ส่งผลต่อกากมันสำปะหลังแต่ประการใด หรืออีกนัยหนึ่งคือภาวะการผลิตเยื่อด้วยสารเคมีทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่มีความเหมาะสมต่อการนำมาปรับปรุงสมบัติของเส้นใยกากมันสำปะหลังที่นำมาใช้งาน ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านความแข็งแรงของแผ่นกระดาษแต่อย่างใด

ในส่วนของการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะให้ผลในอีกแง่หนึ่ง คือค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นกระดาษที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากความแข็งแรงของแผ่นกระดาษที่มีการผสมกากมันปกติเข้าไป แสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของเส้นใยกากมันให้มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานได้ โดยทำให้เกิดการแยกย่อยของเส้นใยกากได้ดีขึ้น ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยกากมันและเส้นใยกระดาษเกิดได้ดี ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นกระดาษซึ่งขึ้นกับสมบัติดังกล่าวมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้แนวโน้มจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงตึงตึงที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เนื่องจากความแข็งแรงทั้ง 2 ค่านี้เป็นผลมาจากความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยเป็นสำคัญ ดังนั้นผลที่ได้จึงสอดคล้องไปในทางเดียวกัน นอกเหนือจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า กากมันล้าปะหลังที่นำมาใช้งานนั้นจะมีความเหมาะสมต่อภาวะการผลิตเยื่อแบบต่างที่สุดอีกด้วย

4.1.3.5 ความต้านทานแรงฉีก (Tear)

ค่าความต้านทานแรงฉีกของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้ในทุกภาวะ จะแสดงดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) เยื่อผสมจากกากมันล้าปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (HW+Control) เยื่อผสมจากกากมันล้าปะหลังขจัดแป้งที่ผลิตด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ (HW+NaHSO₃) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (HW+NaOH) และเอทานอล (HW+C₂H₅OH) ตามลำดับ ในสัดส่วนกากร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักกระดาษ

จากภาพที่ 4-6 พบว่าความต้านทานแรงฉีกมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกภาวะ โดยการผสมกากมันเข้าไปในกระดาษจะทำให้ความต้านทานแรงฉีกที่วัดได้มีค่าสูงใกล้เคียงกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วน และเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนในการผสมกากมันที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของแผ่นกระดาษที่วัดได้มีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงว่าเส้นใยกากมันค่อนข้างมีความแข็งแรงพอสมควร หรืออาจมีความยาวเส้นใยที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าเยื่อใยสั้นเล็กน้อย เมื่อนำไปผสมกับเยื่อใยสั้นเพื่อขึ้นเป็นแผ่นกระดาษจะทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตได้มีค่ามากเทียบเท่ากับเยื่อใยสั้นล้วนนั่นเอง นอกเหนือจากนี้การนำกากมันสำปะหลังไปผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของแผ่นกระดาษที่วัดได้สูงกว่าในทุกภาวะ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากตัวเส้นใยกากเองหลังผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีแล้ว สามารถสร้างพันธะได้ดีขึ้น ทำให้เมื่อนำไปผสมกับเยื่อกระดาษเพื่อขึ้นแผ่น จะให้กระดาษที่มีค่าความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากกากมันปกติ เนื่องจากถึงแม้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะขึ้นกับตัวเส้นใยเป็นสำคัญ แต่การเพิ่มขึ้นของพันธะก็สามารถช่วยปรับปรุงแรงฉีกได้เล็กน้อย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น นำไปสู่บทสรุปในการเลือกใช้กากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 25 เมช และส่วนที่อยู่ระหว่างตะแกรง 25 และ 50 เมช มาผสมรวมกันเพื่อนำไปผลิตเยื่อเชิงเคมีต่อ โดยภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้วคือภาวะที่เป็นต่างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะให้สมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ดีที่สุดในบรรดาสารเคมีที่นำมาทดลองทั้งหมด นอกจากนี้จากการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกากมันสำปะหลังยังทำให้แน่ใจว่าการขจัดแป้งนั้นไม่ได้ส่งผลต่อเส้นใยกากมันที่จะนำมาใช้งานแต่ประการใด จึงสามารถทำการทดลองต่อไปได้

4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2: หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง

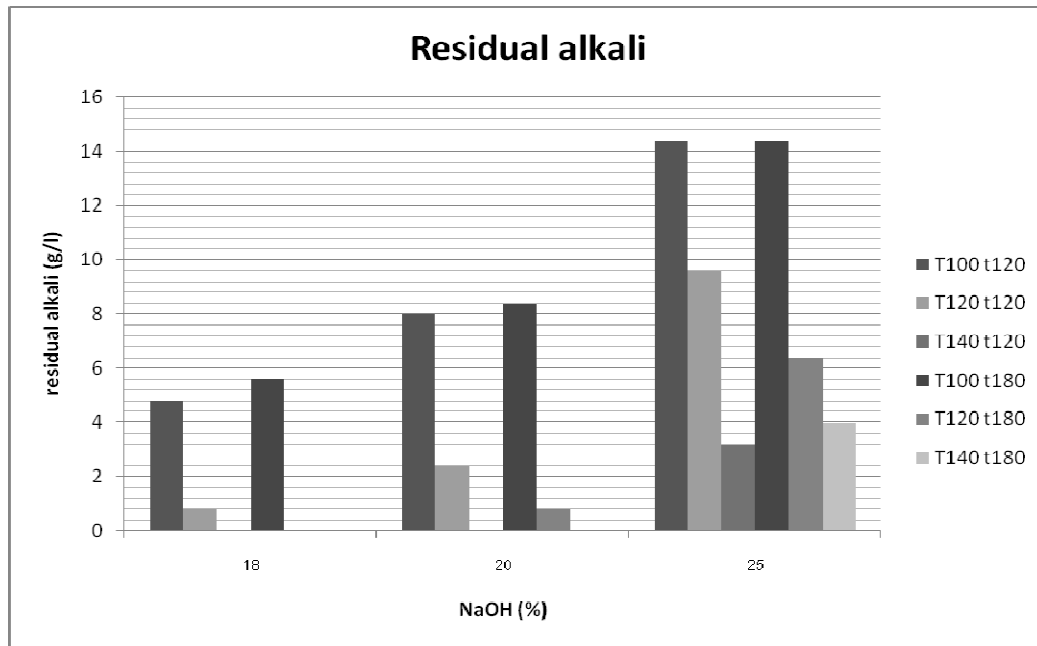
จากผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.1 ทำให้ทราบว่าควรเลือกใช้กากมันสำปะหลังส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 25 เมชผสมรวมกับกากมันส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 50 เมช ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2 จึงได้ทำการคัดขนาดกากมันสำปะหลังด้วยตะแกรงเพียงขนาดเดียวคือ 50 เมช โดยจะนำเอาส่วนที่ค้ำบนตะแกรงไปทำการขจัดแป้งต่อด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (Activity = 210842.4 LU) จากนั้นจึงนำกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้งแล้วไปทำการผลิตเยื่อเชิงเคมีต่อไป โดยภายหลังจากการขจัดแป้งแล้วค่าผลผลิตเยื่อที่ได้ (Pulp Yield) ของเส้นใยกากมัน

ค่าปะหลังจะมีค่าเท่ากับ 45.42 ± 2.34 (เปอร์เซ็นต์ \pm SD) แสดงให้เห็นว่าภายในกากมีแป้งเป็นองค์ประกอบอยู่มาก จึงทำให้ค่าผลผลิตของเยื่อที่ได้ลดลงไปกว่าครึ่ง ทั้งนี้ปริมาณแป้งภายในกากมันสำปะหลังจะแปรผันไปตามแหล่งที่มาและสายพันธุ์ของมันสำปะหลังที่นำมาใช้งานด้วย

กากมันสำปะหลังที่ผ่านการคัดขนาดและขจัดแป้งแล้วจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยการผลิตนั้นจะมีการทดลองทำในหลายภาวะ คือทำการต้มที่อุณหภูมิ 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 และ 180 นาที ด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 18 20 และ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อหาภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับสภาพเส้นใยกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการผลิตกระดาษ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลจากการผลิตเยื่อแบบโซดาในแง่ของสมบัติเยื่อและกระดาษที่ผลิต ได้ผลดังนี้

4.2.1 ปริมาณต่างตกค้างในเยื่อ (Residual alkali)

ปริมาณต่างตกค้างในเยื่อภายหลังจากการต้มเยื่อจะทำให้ทราบว่าในการต้มเยื่อนั้นมีปริมาณการใช้ต่างอย่างเหมาะสมเพียงใด ดังนั้นจึงเป็นค่าที่สำคัญมากและควรพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก เพราะหากปริมาณต่างที่ใช้ไม่เพียงพอสำหรับการต้มเยื่อ จะทำให้ลิกนินที่ถูกละลายออกไปจากเยื่อแล้วสามารถกลับมารวมตัวกันได้อีก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิด lignin condensation ทำให้ต้องนำเยื่อที่ได้นั้นไปทำการฟอกต่อ ซึ่งเป็นการเพิ่มกระบวนการในการจัดการกับเยื่อนั้นยิ่งขึ้น ดังนั้นปริมาณต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อควรมีมากเพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือ การมีปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่มากเกินพอที่จะไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ lignin condensation ขึ้นได้นั่นเอง โดยผลจากการวิเคราะห์ปริมาณต่างที่ตกค้างอยู่ในเยื่อภายหลังจากการต้ม จะแสดงดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 ปริมาณต่างตกค้างในเยื่อเมื่อใช้อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการต้มเยื่อที่ระดับต่างๆ

จากภาพที่ 4-7 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าปริมาณต่างตกค้างในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่ในบางภาวะกลับไม่หลงเหลือต่างอยู่เลย ซึ่งอาจหมายความว่าใช้ต่างหมดพอดี หรือมีปริมาณต่างไม่เพียงพอสำหรับการต้มเยื่อก็ได้ นั่นคือภาวะการต้มเยื่อที่ใช้อุณหภูมิในการต้มที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที (T120 t180) ด้วยความเข้มข้นต่าง 18 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส นาน 120 และ 180 นาที (T140 t120 และ T140 t180) โดยมีระดับความเข้มข้นต่าง 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการต้มเยื่อนั้นรุนแรงเกินไป โดยเฉพาะอุณหภูมิที่สูงมากถึง 140 องศาเซลเซียส (T140) จะไปเร่งให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาในระบบได้มากขึ้น อีกทั้งปริมาณต่างในระบบมีไม่มากพอ ผลคือไม่หลงเหลือต่างอยู่ในระบบหลังจากการต้มเยื่อเลย เพราะใช้ไปจนหมดนั่นเอง แต่หากเพิ่มปริมาณต่างให้มากขึ้นเป็นร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะพบว่ามีปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่มากพอสมควร แม้ว่าจะทำการต้มเยื่อโดยใช้อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส ที่เวลา 120 และ 180 นาทีก็ตาม (T140 t120 และ T140 t180) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีอิทธิพลต่อปริมาณต่างตกค้างในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อนั่นเองและผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 พบว่าค่า Sig. หรือ

ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างตกค้างในเยื่อภายหลังจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ

จากการพิจารณาในส่วนของการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้สำหรับต้มเยื่อ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นต่างและเวลาในการต้มเยื่อเท่ากัน การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มมากขึ้น จะยิ่งทำให้ปริมาณต่างตกค้างในเยื่อในระบบภายหลังจากการต้มเยื่อลดลง นั่นคือการทำอุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเร่งการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ต่างถูกใช้ไปในระบบมาก เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการต้มเยื่อและทำการวัดค่าปริมาณต่างที่ตกค้างอยู่ในระบบจึงพบว่ามีย่าน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส (T140) ในระดับความเข้มข้นต่างร้อยละ 18 และ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะทำให้ต่างไม่หลงเหลืออยู่เลย ต้องทำการเพิ่มปริมาณต่างที่ใช้เป็นร้อยละ 25 จึงจะสามารถเหลือต่างในระบบได้เพียงพอ ดังนั้นหากทำการต้มเยื่อด้วยอุณหภูมิสูงๆ จำเป็นต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นมากๆ เพื่อให้มีปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่ในระบบที่มากพอนั่นเอง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติจากตารางที่ 4-2 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างตกค้างในเยื่อภายหลังจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ

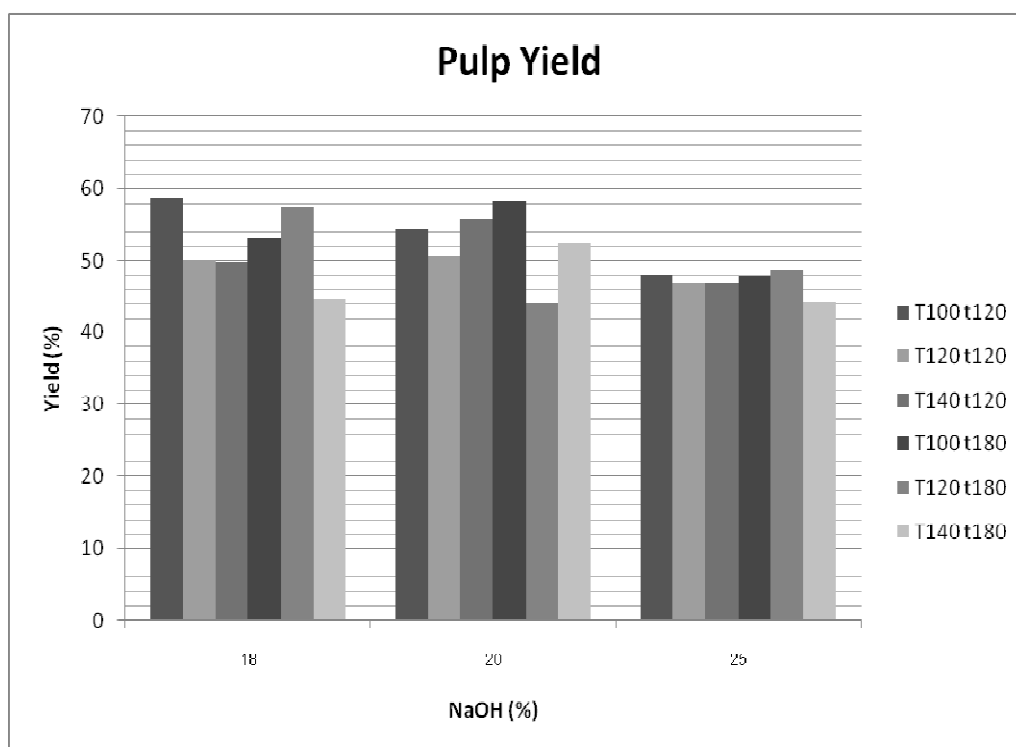
นอกจากนี้จากภาพที่ 4-7 ยังพบว่าหากทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการต้มเยื่อ ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่ำๆ จะยังไม่ค่อยส่งผลต่อปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่ในระบบ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้สำหรับต้มเยื่อให้มากขึ้น ปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่ภายหลังจากการต้มเยื่อจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากยิ่งใช้เวลาในการต้มเยื่อนานขึ้น สารเคมีจะยิ่งมีโอกาสแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับกากมันได้ดี เมื่อต่างถูกใช้ไปมากขึ้น ปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่ในระบบภายหลังจากการต้มเยื่อจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ จะส่งผลต่อปริมาณต่างตกค้างในเยื่อภายหลังจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญนั่นเอง

จากข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่ภายหลังจากการต้มเยื่อ คือ อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นของสารเคมีซึ่งในที่นี้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สำหรับต้มเยื่อ และยิ่งทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูง จะยิ่งเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อมาก เพื่อให้มีปริมาณต่างตกค้างในเยื่ออยู่ในระบบมากพอ โดยผลที่ได้จากกราฟ

แสดงให้เห็นว่าภาวะที่มีปริมาณต่างตกค้างมากที่สุดคือ ภาวะการต้มเยื่อที่ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 และ 180 นาที (T100 t120 และ T100 t180) ด้วยความเข้มข้นต่างร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

4.2.2 ผลผลิตเยื่อที่ได้ (Pulp yield)

ผลผลิตของเยื่อที่ได้ภายหลังจากการต้มเยื่อด้วยภาวะที่หลากหลาย โดยใช้ อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับต้มเยื่อที่ระดับต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ผลผลิตเยื่อที่ได้จากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในระดับต่างๆ

จากภาพที่ 4-8 พบว่าการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที (T100 t120) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้สูงสุด เนื่องจากเป็นภาวะการต้มเยื่อที่อ่อนที่สุดจึงเกิดการสูญเสียปริมาณเยื่อในระบบไปน้อย ส่วนภาวะที่ให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้ต่ำสุด คือการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 180 นาที (T120 t180) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง นอกจากนี้ภาวะการต้มเยื่อที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส เป็น

เวลานาน 180 นาที (T140 t180) ในทุกระดับความเข้มข้น จะให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้ค่อนข้างต่ำ เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากภาวะต่างๆ เหล่านี้เป็นภาวะการผลิตเยื่อที่ค่อนข้างรุนแรง เส้นใยจึงถูกทำลายไปมาก ผลผลิตเยื่อที่ได้จึงต่ำ

หากพิจารณาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อจากภาพที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าที่เวลา 120 นาที (t120) เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อ จะทำให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้มีแนวโน้มลดลงในแต่ละความเข้มข้น เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเร่งให้เกิดการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการแยกเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น เมื่อลิกนินและเส้นใยถูกทำลายไปมาก ปริมาณผลผลิตเยื่อที่วัดได้สุทธิจึงลดลง มีเพียงที่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่ไม่ได้เป็นไปตามแนวโน้มดังกล่าว ทั้งนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดในระหว่างการผลิตเยื่อ ทำให้เกิดการผลิตเยื่อไม่สมบูรณ์ ค่าผลผลิตเยื่อที่วัดได้จึงสูงกว่าความเป็นจริง เมื่อทำการพิจารณาที่เวลา 180 นาที (t180) จะพบว่าหากทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อมากขึ้นแนวโน้มของกราฟที่ได้จะเป็นไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงท้าย สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเส้นใยจะเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดเส้นใยขนาดเล็กในระบบจำนวนมาก ค่าผลผลิตเยื่อที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น แต่หากมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ต้มเข้าไปอีกในระดับที่สูงมากเกินไปจะทำให้เส้นใยบางส่วนถูกทำลายได้ ส่งผลให้ค่าผลผลิตเยื่อที่วัดได้มีค่าลดลงจากเดิมนั่นเอง และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มส่งผลต่อผลผลิตเยื่อที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกันพบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่จะเป็นไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในตอนท้าย ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปในลักษณะเดียวกับการพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อ จึงสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน ทั้งนี้จะพบว่าค่าผลผลิตเยื่อที่วัดได้ค่อนข้างแปรปรวนในแต่ละภาวะ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการที่ในการทดลองนั้นไม่ได้ทำการคัดส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (Reject) ออก ทำให้เมื่อมีการวัดผลผลิตเยื่อที่ได้จึงนับรวมส่วนที่ไม่เป็นเยื่อไปด้วย โดยในแต่ละภาวะที่ใช้ในการผลิตนั้นอาจรุนแรงจนทำให้เส้นใยแตกตัวเป็นเส้นใยขนาดเล็กมากๆ จนสูญเสียสภาพเส้นใยไป ไม่สามารถใช้งานได้ แต่ในกระบวนการผลิตไม่ได้มีการคัดแยกออก เมื่อนำไปคำนวณผลผลิตเยื่อที่ได้จึงนับรวมไปด้วย เช่นในภาวะที่ใช้อุณหภูมิการต้มเยื่อที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที (T120 t180) ด้วยความเข้มข้นต่างร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้มากกว่าการต้มเยื่อด้วยความเข้มข้นต่างร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่อุณหภูมิและเวลาการต้มเยื่อที่เท่ากัน นั่นคือความเข้มข้นต่างที่ระดับร้อยละ 25 อาจส่งผลให้เส้นใยเกิดการแตกตัวเป็น

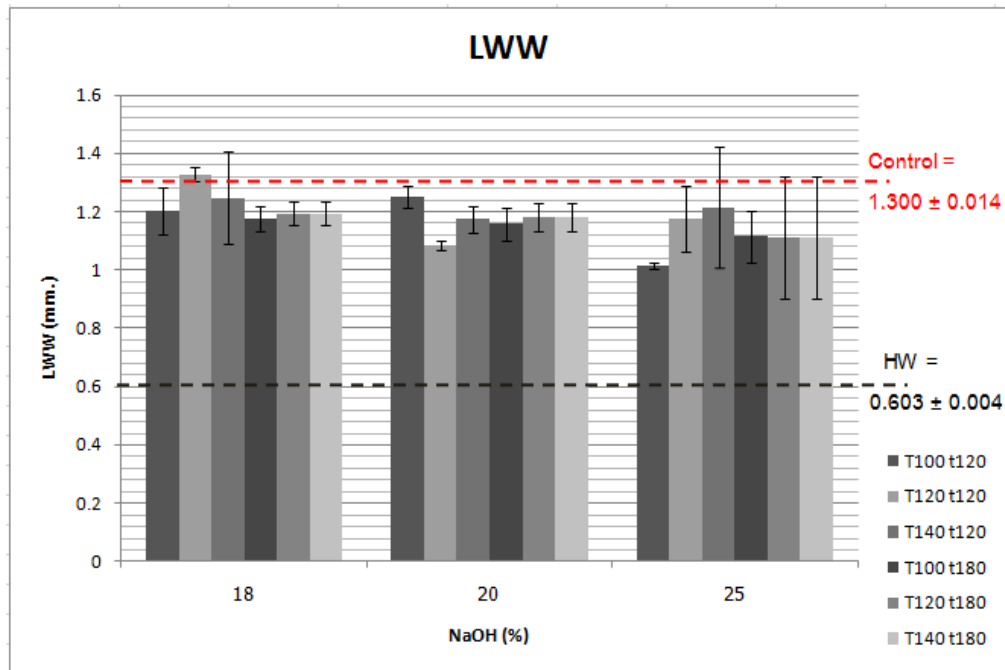
เส้นใยที่มีขนาดเล็กและละเอียดมากจนไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งโดยปกติจะถูกคัดแยกออกไป แต่ในที่นี้จะถูกนำมาใช้งานทั้งหมด ส่งผลให้ค่าผลผลิตเยื่อที่วัดได้สูงขึ้นแทนที่จะลดลงจากเดิม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้มีค่ามากในบางภาวะที่ไม่ควรเป็นเช่นนั้นนั่นเอง เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อ จะส่งผลต่อผลผลิตเยื่อที่ได้ได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อนั้นจะมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนและค่อนข้างแปรปรวนเช่นเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ จะส่งผลต่อผลผลิตเยื่อที่ได้ได้อย่างมีนัยสำคัญนั่นเอง

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology) จากเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะเปรียบเทียบกับเยื่อกากที่ไม่ผ่านการต้มเยื่อ (Control) และเยื่อใยสั้น (Hardwood) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065-1:2001 [72] ได้ข้อมูลเกี่ยวกับความยาวของเส้นใย (LWW) ความกว้างของเส้นใย (Width) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) ปริมาณกระจุกเส้นใย (Shives) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (Curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (Kink index) ดังนี้

- **ความยาวของเส้นใย** เยื่อเชิงเคมีที่ผลิตได้เมื่อนำไปวัดความยาวของเส้นใย ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ความยาวของเส้นใยจากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ

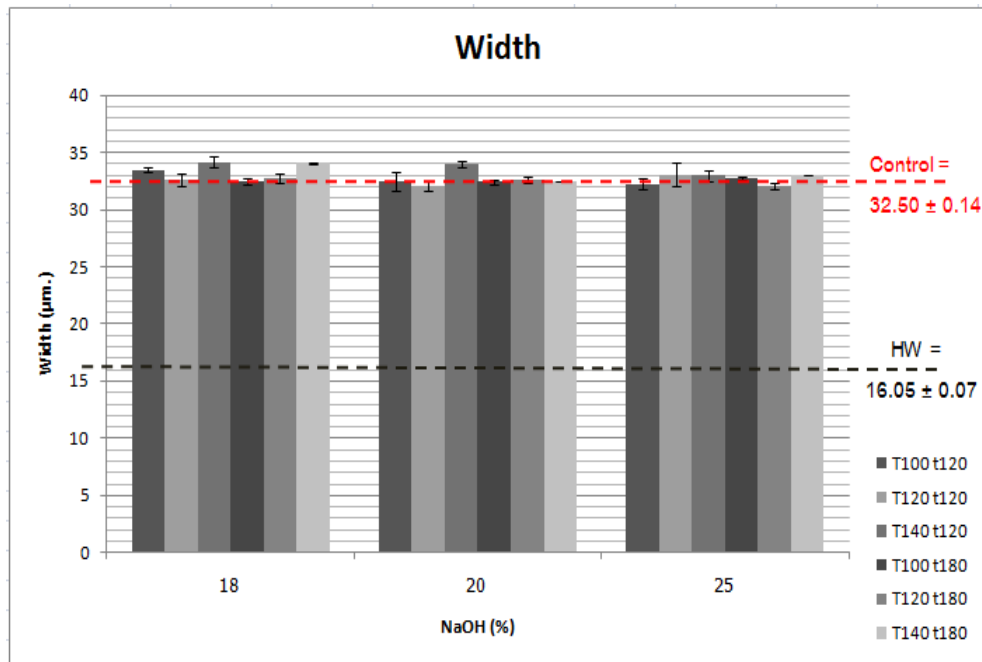
จากภาพที่ 4-9 พบว่าเส้นใยจากมันสำปะหลังที่ได้จากการต้มเยื่อในทุกภาวะ รวมถึงเส้นใยจากกากมันขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการต้มเยื่อ (Control) ล้วนแล้วแต่มีความยาวเส้นใยที่มากกว่าเส้นใยจากเยื่อไม้ (Hardwood) ทั้งสิ้น โดยการนำเส้นใยจากมันไปผลิตเยื่อเชิงเคมี ส่งผลให้ความยาวของเส้นใยสั้นลง เนื่องจากสารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเส้นใย ทำให้เกิดการแยกย่อยเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ความยาวเส้นใยที่วัดได้จึงลดลง

เมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยในช่วงอุณหภูมิและเวลาในการต้มเยื่อน้อยๆ พบว่าหากทำการเพิ่มความเข้มข้นจาก 18 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ความยาวเส้นใยที่วัดได้มีค่ามากขึ้น เนื่องจากภาวะในการผลิตเยื่อยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการแยกย่อยของเส้นใยได้ ประกอบกับการที่เส้นใยขนาดเล็กๆ บางส่วนถูกทำลายไปจากผลของการใช้อุณหภูมิและสารเคมี ในระบบจึงเหลือแต่เส้นใยยาวๆ อยู่มาก ดังนั้นความยาวของเส้นใยโดยรวมจึงเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าเส้นใยเกิดการแยกย่อยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้นและเส้นใยบางส่วนอาจถูกสารเคมีทำลาย ความยาวของเส้นใยในระบบจึงลดลง ส่วนที่เวลาการต้มเยื่อมากๆ พบว่าหากเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของด่างที่ใช้ต้มเยื่อมากขึ้น เส้นใยจะเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความยาวของเส้นใยที่วัดได้มีค่าลดลง หมายความว่าเกิดเส้นใยขนาดเล็กและสั้นในระบบมากขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้หากทำการพิจารณาควบคู่กับค่าผลผลิตเยื่อที่ได้จากข้อ 4.2.2 พบว่ามีความสอดคล้องกันอยู่ เช่นในกรณีของการที่ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการใช้ภาวะการต้มที่อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที (T140 t120) ที่ความเข้มข้นต่างในระดับต่างๆ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความเข้มข้นต่างจาก 18 เปอร์เซ็นต์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ความยาวของเส้นใยจะสั้นลงเนื่องจากภาวะในการต้มเยื่อรุนแรงมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวแยกย่อยของเส้นใยได้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ จำนวนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้สูงขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นต่างจาก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็น 25 เปอร์เซ็นต์ ความยาวของเส้นใยที่วัดได้กลับเพิ่มขึ้นเนื่องจากภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อนั้นรุนแรงมากจนไปทำลายเส้นใยเส้นเล็กๆ จนหมด ส่งผลให้เหลือแต่เส้นใยที่ยาวๆ ในระบบ ความยาวเส้นใยที่วัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าผลผลิตเยื่อที่วัดได้จึงลดลงนั่นเอง

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นของด่างที่ใช้สำหรับการต้มเยื่อกับความยาวเส้นใยนั้นไม่ปรากฏแนวโน้มของกราฟที่ชัดเจน ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อเป็นหลักว่าจะสามารถทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยได้ดีในระดับใด หรือรุนแรงมากจนทำลายเส้นใยหายไปบางส่วน ทั้งนี้ภาวะที่ให้ค่าความยาวเส้นใยมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T120 t120) ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 เปอร์เซ็นต์ และภาวะที่ให้ค่าความยาวเส้นใยสั้นที่สุดคือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T100 t120) ด้วยความเข้มข้นด่างที่ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 0.720, 0.406 และ 0.095 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ ต่างก็ไม่ส่งผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญนั่นเอง

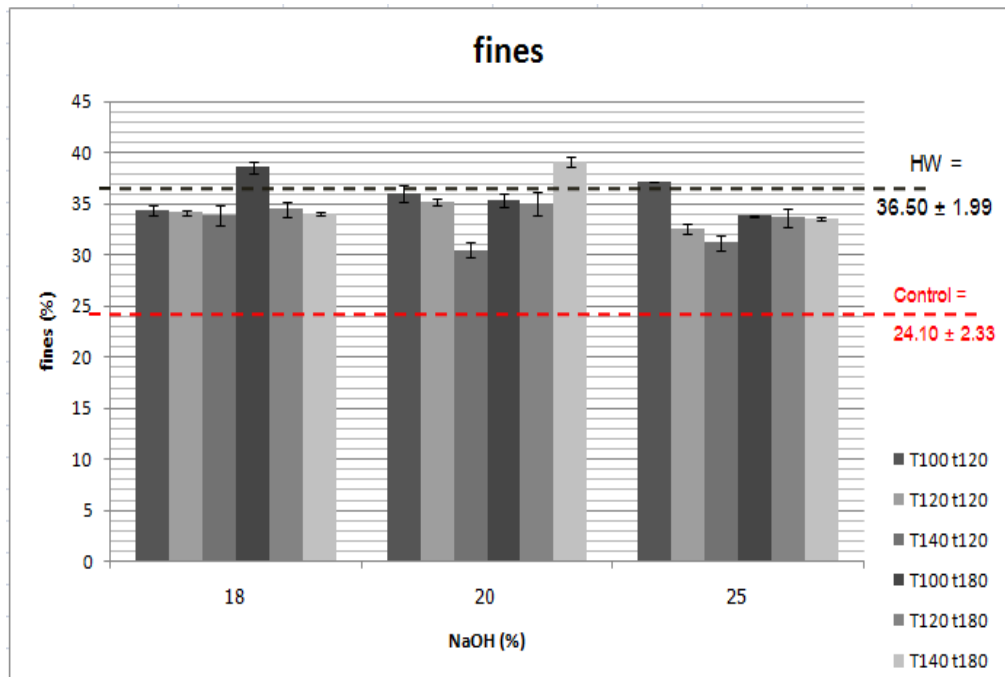
- **ความกว้างของเส้นใย (Width)** ทำการวัดความกว้างของเส้นใยจากเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 ความกว้างของเส้นใยจากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ

จากภาพที่ 4-10 พบว่าภายหลังจากการผลิตเยื่อเชิงเคมีแล้วจะได้เส้นใยที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นจากเส้นใยจากมันปกติ (Control) เนื่องจากการต้มเยื่อด้วยด่าง สารเคมีจะแทรกซึมเข้าไปภายในเส้นใยทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัวขึ้น โดยความกว้างของเส้นใยในแต่ละภาวะการผลิตเยื่อค่อนข้างใกล้เคียงกันมากและในทุกภาวะจะมีความกว้างของเส้นใยมากกว่าเส้นใยที่ได้จากเยื่อใยสั้น (HW) ทั้งสิ้น ทั้งนี้ภาวะที่ให้ความกว้างของเส้นใยมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T140 t120) ด้วยความเข้มข้นด่าง 18 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าที่ภาวะนี้มีการดูดซึมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปมากทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัวมากส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยที่วัดได้มีค่ามากนั่นเอง ส่วนภาวะการผลิตเยื่อที่ให้ความกว้างของเส้นใยน้อยสุดคือที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T120 t120) ความเข้มข้นด่างที่ 20 เปอร์เซ็นต์และที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T120 t180) ด้วยความเข้มข้นด่าง 25 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือที่ภาวะนี้มีการดูดซึมสารเคมีต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะการผลิตเยื่ออื่นๆ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 0.000 0.101 และ 0.007 ตามลำดับ แสดงว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ ต่างก็ส่งผลต่อความกว้างของเส้นใยนัยสำคัญทั้งสิ้น ส่วนเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อจะไม่ส่งผลต่อความกว้างของเส้นใยนัยสำคัญแต่อย่างใด

- ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) ทำการวัดปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ

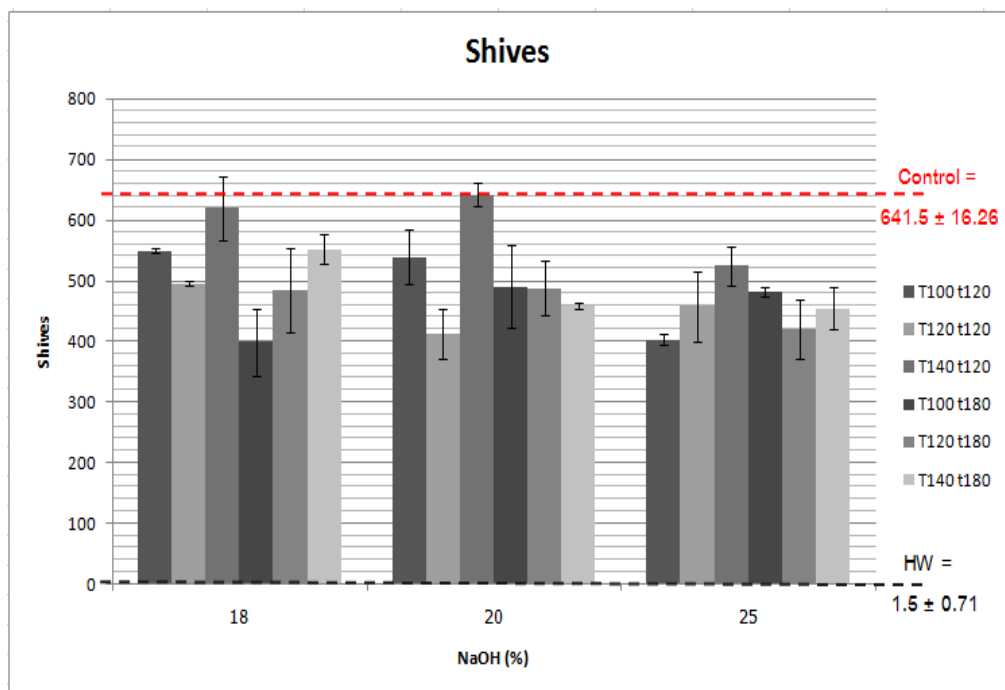
จากภาพที่ 4-11 พบว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีในทุกภาวะจะเพิ่มขึ้นจากก่อนผ่านการผลิตเยื่อ (Control) และในบางภาวะมีค่าเทียบเท่าหรือมากกว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยื่อใยสั้น (HW) เลยทีเดียว แสดงให้เห็นว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะช่วยทำให้เส้นใยกากมันเกิดการแตกตัวแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น โดยภาวะที่ได้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T140 t180) ความเข้มข้นด่างที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และภาวะที่ให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กน้อยสุดคือการผลิตเยื่อเชิงเคมีที่ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที (T140 t120) ด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นด่างและอุณหภูมิในการต้มเยื่อที่ระดับต่างๆ ณ เวลา 120 นาที (t120) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นด่างที่ใช้ต้มเยื่อมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง เนื่องจากในภาวะการผลิตเยื่อที่ค่อนข้างสูง สารเคมีและความร้อนจะไปมีผลให้เส้นใยขนาดเล็กๆ ถูกทำลายไปบางส่วน ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่วัดได้ในระบบจึงมีค่าลดลง และที่เวลาการต้มเยื่อ 180 นาที (t180) ก็จะให้ผลเช่นเดียวกัน

ด้วย แสดงว่ายิ่งใช้ภาวะการผลิตเยื่อที่รุนแรง จะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในระบบ ซึ่งเป็นผลจากการถูกทำลายด้วยความร้อนและสารเคมีมากขึ้นนั่นเอง

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 0.000 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ ต่างก็ส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทั้งสิ้น

- ปริมาณกระจุกเส้นใย (Shives) ทำการวัดปริมาณกระจุกเส้นใยจากเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-12



ภาพที่ 4-12 ปริมาณกระจุกเส้นใยจากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ

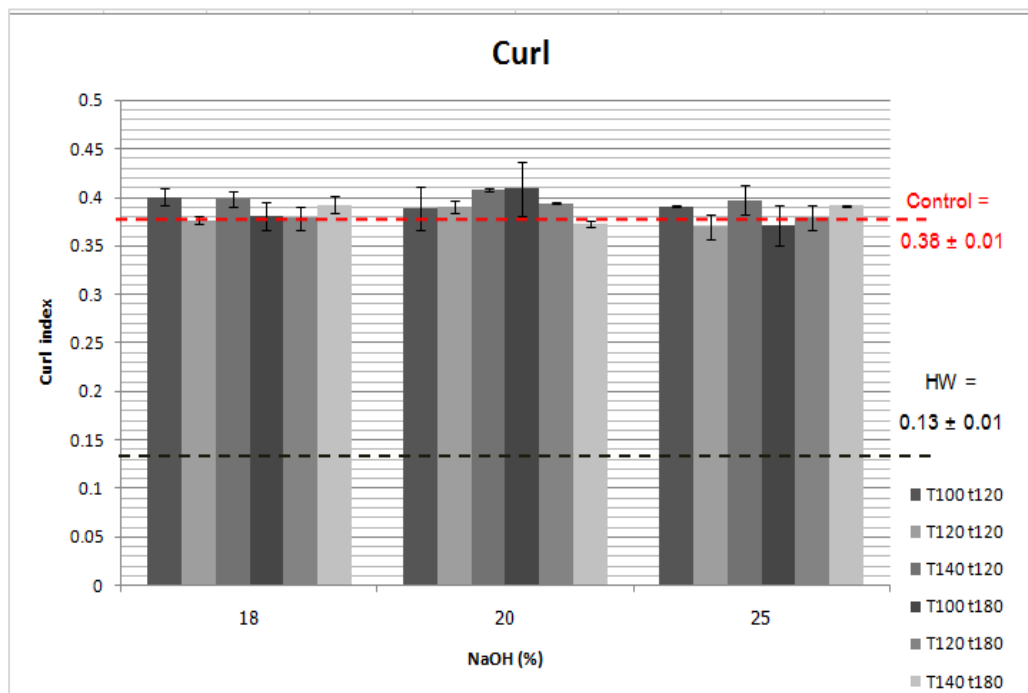
จากภาพที่ 4-12 จะพบว่าเส้นใยจากมันสำปะหลังปกติแล้วจะมีปริมาณกระจุกเส้นใยอยู่มาก แต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีแล้วจะทำให้ปริมาณกระจุกเส้นใยเหล่านั้นลดน้อยลงในทุกภาวะ แสดงให้เห็นว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีสามารถช่วยให้เส้นใยจากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผสมกับเยื่อใยสั้นเพื่อทำการผลิตกระดาษมากขึ้น แม้ว่าจะยังไม่สามารถเทียบเท่าเยื่อใยสั้นทางการค้าก็ตาม โดยภาวะที่มีปริมาณกระจุกเส้นใยมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ความเข้มข้นต่างที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และภาวะที่มี

ปริมาณกระจกเส้นใยน้อยสุดคือการผลิตเยื่อเชิงเคมีที่ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 เปอร์เซ็นต์

หากทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อที่เวลาและระดับความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เท่ากัน พบว่าการต้มเยื่อที่ใช้เวลาน้อยๆ (t120) เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ต้มเยื่อในช่วงแรกจะทำให้กระจกเส้นใยมีปริมาณลดลง เส้นใยแตกตัวแยกย่อยเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆต่อไปอีกจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้กระจกเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการทำลายเส้นใยขนาดเล็กในระบบไป ทำให้ปริมาณกระจกเส้นใยในระบบมีสัดส่วนที่มากขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้ อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆสำหรับต้มเยื่อควรเลือกใช้ในระดับที่เหมาะสม คือให้สามารถแยกย่อยเส้นใยออกมาได้ดีเท่านั้น เพราะหากใช้สูงเกินไปจะให้ผลลัพธ์ตรงกันข้ามคือได้ปริมาณ กระจกเส้นใยมากขึ้นแทน ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตกระดาษนั่นเอง

เมื่อพิจารณาในภาวะการต้มเยื่อที่ใช้เวลานานๆ (t180) พบว่าที่ระดับความเข้มข้นต่าง 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อสูงขึ้น ปริมาณกระจกเส้นใยที่วัดได้จะมีมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อนั้นสูงจนเกิดการทำลายเส้นใยขนาดเล็กๆ ไป ผลคือทำให้เหลือแต่กลุ่มก้อนเส้นใยขนาดใหญ่ๆ ปริมาณกระจกเส้นใยที่วัดได้จึงมีมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นต่าง 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อมากขึ้นกระจกเส้นใยจะยิ่งลดลง แสดงว่าเป็นภาวะการผลิตเยื่อที่ค่อนข้างรุนแรง คือทั้งอุณหภูมิสูง ความเข้มข้นต่างมาก และต้มเยื่อเป็นเวลานาน จนเกิดการทำลายทั้งเส้นใยขนาดเล็กๆ และกลุ่มก้อนเส้นใยขนาดใหญ่ไปด้วย ส่งผลให้ปริมาณกระจกเส้นใยที่วัดได้ในระบบลดลงนั่นเอง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นต่างๆที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.000, 0.003 และ 0.005 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เวลา และระดับความเข้มข้นต่างๆที่ใช้สำหรับต้มเยื่อจะส่งผลต่อปริมาณกระจกเส้นใยที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญทั้งสิ้น

- **ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (Curl index)** ผลจากการวัดดัชนีความโค้งงอของเส้นใยจากเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-13

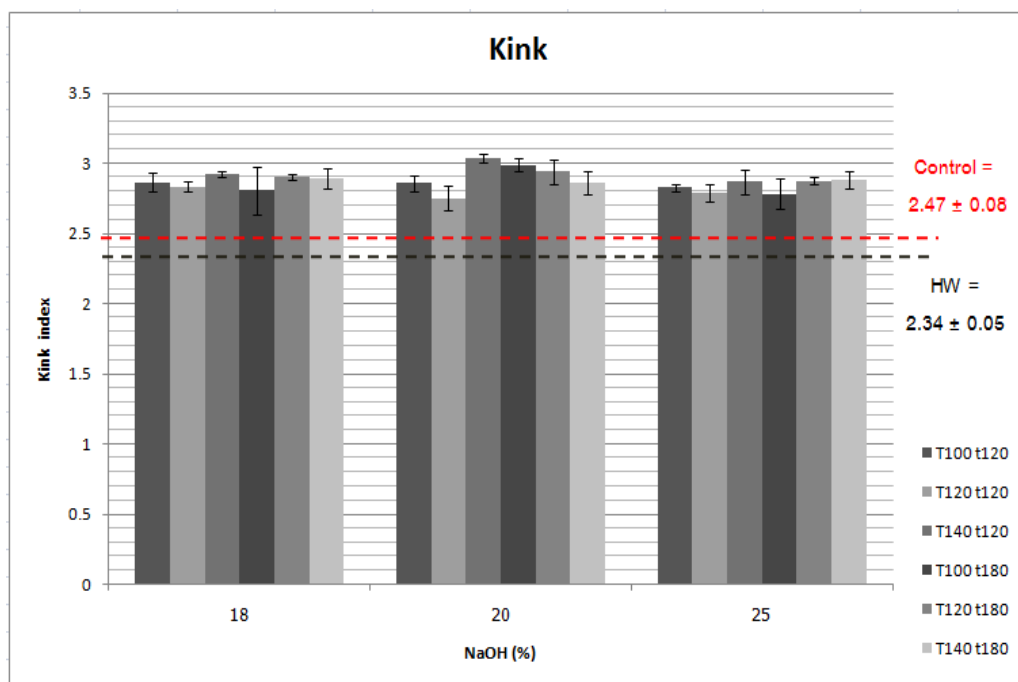


ภาพที่ 4-13 ดัชนีความโค้งงอของเส้นใยจากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ

จากภาพที่ 4-13 พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะทำให้เส้นใยเกิดการโค้งงอมากขึ้นจากกากมันปกติ (Control) เล็กน้อย รวมถึงโค้งงอมากกว่าเยื่อใยสั้น (HW) ทั้งสิ้น เนื่องจากความร้อนและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่ออาจส่งผลให้เกิดการบิดโค้งงอของเส้นใยจากมันสำปะหลังขึ้นได้ โดยภาวะที่เกิดการโค้งงอมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T100 t180) ความเข้มข้นด่างที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และภาวะที่เกิดการโค้งงอน้อยที่สุด คือที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T120 t120) ด้วยความเข้มข้นด่าง 25 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาถึงภาวะการผลิตเยื่อทั้งในส่วนของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นด่างที่ใช้ต้มเยื่อที่ระดับต่างๆ พบว่าให้ค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไม่ค่อยแตกต่างกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นด่างที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.080, 0.202 และ 0.152 ตามลำดับ แสดงว่าปัจจัยในแง่ของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นด่างที่ใช้ในการต้มเยื่อจะไม่ส่งผลต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญแต่ประการใด

- ดัชนีความหักงอของเส้นใย (Kink index) ผลจากการวัดดัชนีความหักงอของเส้นใยจากเยื่อเชิงเคมีที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 ดัชนีความหักงอของเส้นใยจากการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับต่างๆ

จากภาพที่ 4-14 พบว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับดัชนีความโค้งงอของเส้นใยดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น แสดงว่า 2 ค่านี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันอยู่ โดยในทุกภาวะการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะให้ดัชนีความหักงอของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยกากมันปกติ (Control) และเส้นใยจากเยื่อใยสั้น (HW) ทั้งสิ้น เนื่องจากสารเคมีและความร้อนที่ใช้ในการผลิตเยื่อจะทำให้เกิดการหักงอของเส้นใยกากมันล่าช้าลงนั่นเอง โดยภาวะที่เกิดการหักงอมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T140 t120) ความเข้มข้นด่างที่ 20 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นภาวะที่ทำให้เส้นใยเกิดการหักงอขึ้นเป็นส่วนมากและภาวะที่เกิดการหักงอน้อยที่สุด คือที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T120 t120) ด้วยความเข้มข้นด่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผลคล้ายคลึงกับดัชนีความโค้งงอของเส้นใยมาก

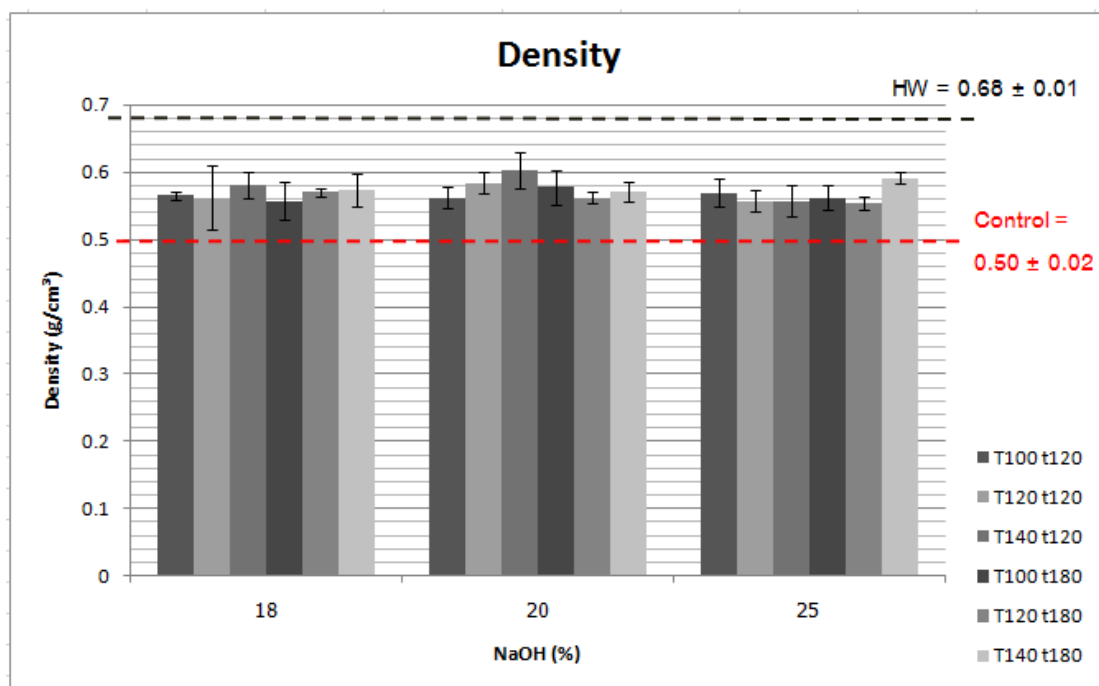
เมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีความหักงอของเส้นใยที่วัดได้จากภาวะการผลิตเยื่อแบบต่างๆ พบว่าไม่ค่อยแตกต่างกัน ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นด่างที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่า

เท่ากับ 0.108, 0.443 และ 0.098 ตามลำดับ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อจะไม่ส่งผลต่อดัชนีความหักเหของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด

4.2.4 สมบัติทางกายภาพของกระดาษ

นำกากมันสำปะหลังที่ได้จากการผลิตเยื่อแต่ละภาวะไปผสมกับเยื่อใยสั้น (Hardwood) ในสัดส่วนกากมันสำปะหลังร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ เพื่อขึ้นแผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัม/ตารางเมตร โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นแบบ Rapid-Kothen ตามมาตรฐาน ISO 5269-2:1998 [72] และทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษ ได้ผลดังนี้

- **ความหนาแน่น (Density)** ทำการคำนวณหาความหนาแน่นของแผ่นกระดาษที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตขึ้น

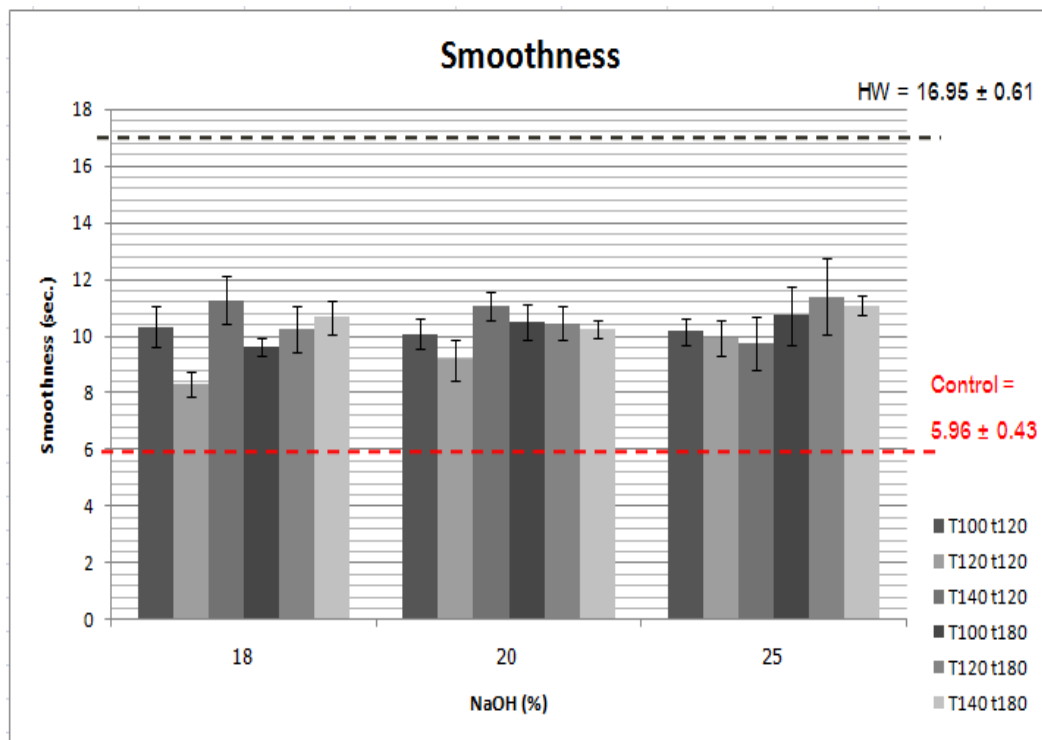
จากภาพที่ 4-15 พบว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความหนาแน่นมากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเส้นใยกากมันสำปะหลังขจัดแป้งที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อ (Control) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่เส้นใยกากมันแยกออกจากกันได้ดี กลุ่มก้อนเส้นใยมีปริมาณลดลง เส้นใยแนบชิดกันมากขึ้น อีกทั้งยังมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยให้กระดาษเข้ารูปได้ดีตามรูพรุนต่างๆ ส่งผลให้กระดาษเนื้อแน่นขึ้น อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของกระดาษที่ได้

ยังไม่สามารถเทียบเท่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วนได้ โดยภาวะที่ให้ความหนาแน่นของกระดาษมากที่สุดคือการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T140 t120) ด้วยความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และภาวะที่ให้ความหนาแน่นของกระดาษน้อยสุดคือการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที (T120 t180) ด้วยความเข้มข้นต่าง 25 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเยื่อมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะไปเร่งการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น กระดาษที่ผลิตได้จึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.015 แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อจะส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

หากทำการเพิ่มความเข้มข้นของด่างที่ใช้ในการผลิตเยื่อมากขึ้นเส้นใยจะแยกย่อยได้ดี ความหนาแน่นของกระดาษที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นด่างที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะให้ผลตรงกันข้าม นั่นคือภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อรุนแรงไปจนไปทำลายเส้นใยขนาดเล็กๆ ความหนาแน่นของกระดาษที่ได้จึงลดลง โดยจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของความเข้มข้นด่างที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.104 แสดงว่าความเข้มข้นไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด นอกจากนี้จากภาพที่ 4-15 ยังพบว่าความหนาแน่นกระดาษที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะไม่มีแนวโน้มของกราฟที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่ออาจไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตขึ้นก็เป็นได้ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.527 แสดงว่าเวลาไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

- **ความเรียบ (Smoothness)** ทำการวัดความเรียบของแผ่นกระดาษที่ผลิตขึ้นได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 ความเรียบของกระดาษที่ผลิตขึ้น

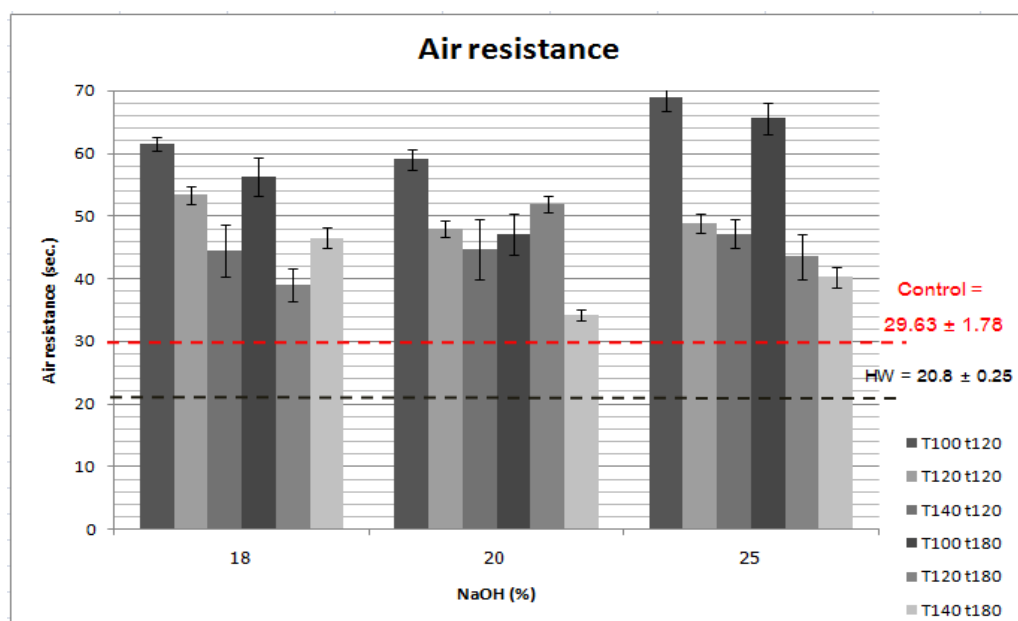
จากภาพที่ 4-16 พบว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการต้มเยื่อแล้วจะทำให้ได้ความเรียบของผิวหน้ากระดาษดีขึ้นกว่าเมื่อไม่ได้ต้ม แสดงว่าการต้มเยื่อกากมันสำปะหลังจะส่งผลให้เส้นใยกากเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น การสานตัวกันระหว่างเส้นใยกากและเส้นใยกระดาษจึงเกิดได้ดี อีกทั้งยังมีเส้นใยขนาดเล็กเกิดขึ้นซึ่งช่วยอุดรูตรงผิวกระดาษทำให้เรียบขึ้น ส่งผลให้ความเรียบของกระดาษที่ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถเทียบเท่าความเรียบของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วนได้อยู่ดี โดยภาวะการต้มเยื่อที่ให้ความเรียบกระดาษมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T120 t180) ที่ความเข้มข้นต่าง 25 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ด้วยความเข้มข้นต่าง 18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาวะการผลิตเยื่อที่ให้ความเรียบกระดาษน้อยที่สุดคือที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T120 t120) ด้วยความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ที่ 18 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อที่ช่วงอุณหภูมิและความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าความเรียบของกระดาษที่วัดได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าการใช้เวลาในการผลิตเยื่อที่นานขึ้นสารเคมีจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยกากได้ดี ส่งผลให้เส้นใยกากเกิดการแยกย่อยมากขึ้น การสานตัวระหว่างเส้นใยกากมันและเส้นใยกระดาษเกิดได้ดีจึงได้กระดาษผิวเรียบเนียนขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นต่างที่ใช้ต้มเยื่อที่ช่วงอุณหภูมิและเวลาคงที่ จะไม่พบ

การเปลี่ยนแปลงค่าความเรียบของกระดาษอย่างชัดเจน โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ มีค่าเท่ากับ 0.061 และ 0.001 ตามลำดับ แสดงว่าความเข้มข้นต่างที่ใช้ไม่ได้ส่งผลต่อความเรียบของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ แต่เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะส่งผลต่อความเรียบของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญนั่นเอง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติที่ใช้ในการผลิตเยื่อนั้นจะพบว่าหากทำการเพิ่มคุณสมบัติใช้ต้มเยื่อสูงขึ้น กระดาษที่ผลิตได้จะให้ความเรียบมากขึ้น กระดาษเนื้อเนียนขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติที่สูงจะไปเร่งการเข้าทำปฏิกิริยาของสารเคมีทำให้สามารถแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยกระดาษได้ดีขึ้น ผลคือเกิดการแยกย่อยของเส้นใยกระดาษได้ดี เส้นใยกระดาษเกิดการสานตัวแบบชิดกับเส้นใยกระดาษได้มากขึ้นและยังมีเส้นใยขนาดเล็กๆ ช่วยอุดตามรูพรุน ทำให้ผิวกระดาษเนียนขึ้น ส่งผลให้ความเรียบของกระดาษที่ได้เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของคุณสมบัติที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าคุณสมบัติที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อความเรียบของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- ความต้านทานการซึมอากาศ (Air resistance) ทำการวัดความต้านทานการซึมอากาศของแผ่นกระดาษที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-17 ความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษที่ผลิตขึ้น

จากภาพที่ 4-17 พบว่าการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปในกระดาดจะช่วยทำให้ ความพรุนในกระดาดลดลง เนื่องจากเส้นใยกากจะไปช่วยอุดตามรูพรุนในเนื้อกระดาดส่งผลให้ ความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศของกระดาดดีขึ้น ค่าความต้านทานการซึมอากาศที่ วัดได้จึงมากกว่ากระดาดที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) และเมื่อทำการเติมกากมันที่ผ่านการ ผลิตเยื่อเชิงเคมีแล้วพบว่าจะยิ่งส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศของกระดาด มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาดที่ผลิตจากเส้นใยกากมันปกติ (Control) ทั้งนี้เป็นเพราะการนำกาก มันสำปะหลังไปผ่านการต้มเยื่อจะช่วยทำให้กระดูกเส้นใยเกิดการแตกตัวแยกย่อยเป็นเส้นใย เดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น ซึ่งเส้นใยกากแยกย่อยเหล่านี้จะเข้าไปอุดตามรูพรุนในเนื้อกระดาดได้ ส่งผลให้ ความพรุนของกระดาดลดลงและความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศมากขึ้นนั่นเอง

โดยภาวะการต้มเยื่อที่ให้ค่าความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T100 t120) ที่ความเข้มข้นต่าง 25 เปอร์เซ็นต์ และภาวะการผลิตเยื่อที่ให้ค่าความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศน้อยสุดคือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T140 t180) ด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์

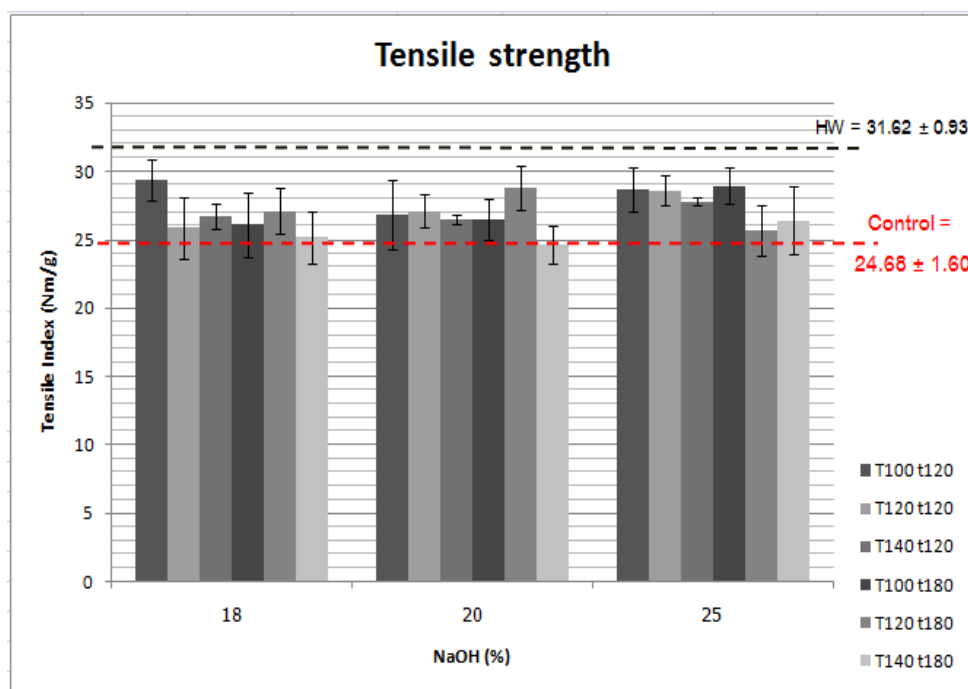
เมื่อพิจารณาภาวะการผลิตเยื่อที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่ม อุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศของกระดาด ลดลง เนื่องจากความร้อนจะไปทำลายเส้นใยขนาดเล็กบางส่วนให้หายไป ซึ่งสอดคล้องกับค่า ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (Fines) ที่ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4-11 ทำให้การอุดรูพรุนภายในเนื้อ กระดาดทำได้แย่งค่าความต้านทานการซึมอากาศที่วัดได้จึงลดลงนั่นเอง โดยเมื่อทำการ วิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิที่ใช้ใน การต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าอุณหภูมิมีผลต่อความต้านทานการซึมอากาศของกระดาด อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นต่างในระดับต่างๆ จะพบว่าหากมีการเพิ่มความ เข้มข้นต่างจาก 18 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ความต้านทานการซึมอากาศของ กระดาดที่ได้ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นต่างที่ใช้ยังไม่สามารถทำให้เกิดการแยกย่อยเส้นใย ได้มาก แต่ไปทำลายเส้นใยขนาดเล็กที่มีอยู่มากกว่า ส่งผลให้การอุดรูพรุนกระดาดเกิดได้น้อย ค่า ความต้านทานการซึมอากาศที่วัดได้จึงมีค่าน้อยตามไปด้วย แต่เมื่อทำการเพิ่มระดับความเข้มข้น ต่างสูงขึ้นจาก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็น 25 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถทำให้เกิดการแยกย่อยของเส้นใย

ได้มาก ทำให้เส้นใยแนบชิดกันดีขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการซึมอากาศมีค่ามากขึ้น โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าความเข้มข้นต่างก็มีผลต่อความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

นอกจากนี้หากพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการต้มเยื่อให้นานขึ้น ความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษที่วัดได้จะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากเส้นใยขนาดเล็กที่มีถูกทำลายมากขึ้น การอุดรูพรุนในเนื้อกระดาษจึงเกิดได้น้อย โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าเวลามีผลต่อความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)** ทำการวัดความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นกระดาษที่ผลิตขึ้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตขึ้น

จากภาพที่ 4-18 พบว่าเส้นใยกากมันสำปะหลังที่ผ่านการต้มเยื่อแล้วจะให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษดีขึ้นกว่าเมื่อไม่ได้ผ่านการต้มเยื่อ แสดงว่าการต้มเยื่อกากมันสำปะหลังจะส่งผลให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น การสานตัวสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยกากและเส้นใยกระดาษจึงเกิดได้ดี ส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมีมาก ค่าความ

แข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจึงเพิ่มตามไปด้วย อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงนี้ก็ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อใยสั้น โดยภาวะการต้มเยื่อที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T100 t120) ที่ความเข้มข้นต่าง 18 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นภาวะการผลิตเยื่อที่อ่อนสุดดังนั้นความร้อนและสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยาให้เกิดการแยกย่อยเส้นใยกากได้ โดยไม่ส่งผลให้เกิดการทำลายเส้นใยขึ้น เส้นใยกากมันที่แยกย่อยได้ดีจะสร้างพันธะกับเส้นใยกระดาษได้มาก ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยสูง กระดาษที่ผลิตได้จึงให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงได้ดีที่สุด ส่วนภาวะที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษต่ำสุดคือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T140 t180) ด้วยความเข้มข้นต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ให้ค่าต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นผสมกับเส้นใยกากมันปกติเสียอีก เนื่องจากเป็นภาวะการผลิตเยื่อที่ค่อนข้างรุนแรงมากจึงส่งผลให้เกิดการทำลายเส้นใยและสูญเสียเส้นใยขนาดเล็กๆ บางส่วนไป ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยน้อยลง กระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำมาก

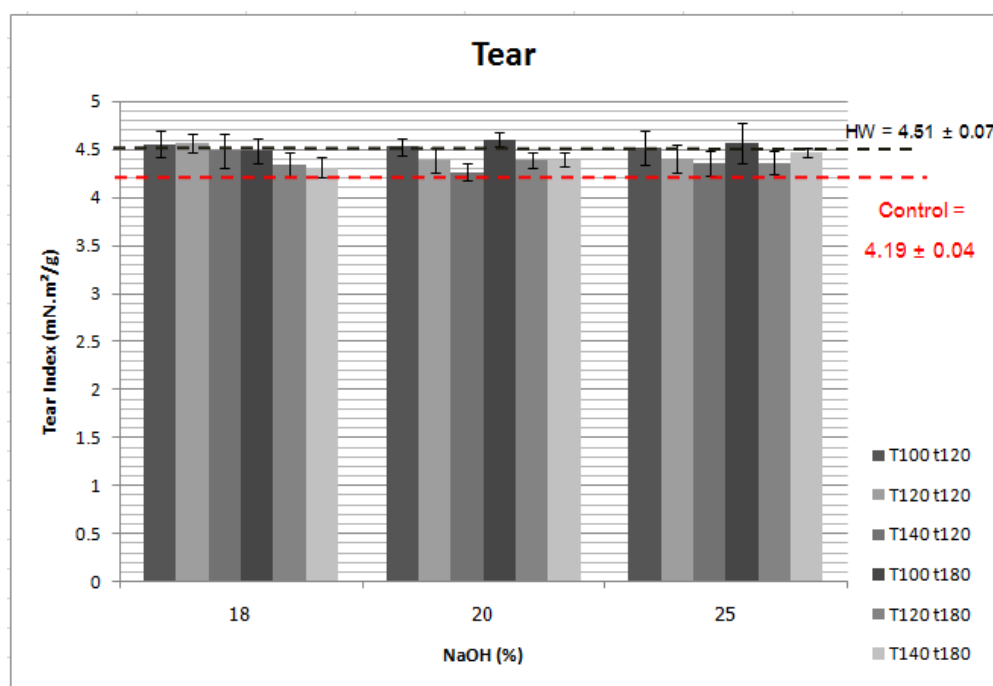
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการผลิตเยื่อโดยให้เวลาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ พบว่าหากทำการเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเยื่อสูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษลดลง เนื่องจากความร้อนในระบบที่สูงขึ้นจะไปทำลายเส้นใยแยกย่อยและเส้นใยขนาดเล็กบางส่วนหายไปจากระบบ ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยกากมันและเส้นใยกระดาษเกิดได้แย่งลง พันธะระหว่างเส้นใยอ่อนแอ ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าลดลง โดยจะสังเกตได้จากที่ภาวะการผลิตเยื่อด้วยอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ณ เวลาและความเข้มข้นต่างในระดับต่างๆ จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษต่ำกว่าภาวะการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิต่ำกว่าทั้งสิ้น ดังนั้นการผลิตเยื่อควรเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมไม่สูงมากนัก เพราะนอกจากจะส่งผลให้เกิดการทำลายเส้นใยบางส่วนไปแล้ว ยังทำให้เกิดการสูญเสียความแข็งแรงระหว่างพันธะเส้นใยและเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตเยื่อไปอีกด้วย โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.002 แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญมาก

การเพิ่มขึ้นของระดับความเข้มข้นต่างที่ใช้ผลิตเยื่อจะทำให้สารเคมีทำปฏิกิริยาแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยกากจึงสามารถแยกย่อยได้ดีขึ้น พันธะระหว่างเส้นใยกากและเส้นใยกระดาษเกิดได้มาก ส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยที่เกิดขึ้นมีค่ามากตามไปด้วย กระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากขึ้นนั่นเอง โดยเมื่อทำการ

วิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของความเข้มข้นที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.046 แสดงว่าความเข้มข้นที่ใช้ในการต้มเยื่อจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน แต่ไม่มากเท่าใดนักเนื่องจากค่าทางสถิติมีค่าเข้าใกล้ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) มาก นั่นคือส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

หากทำการเพิ่มเวลาในการผลิตเยื่อมากขึ้น พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจะมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้เวลาผลิตเยื่อที่นานขึ้นสารเคมีจะมีโอกาสแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเส้นใยจากจนเกิดการแยกย่อยเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น พันธะระหว่างเส้นใยจากและเส้นใยกระดาษจึงมีมากและแข็งแรง ส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของเวลาในการผลิตเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.012 แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความต้านทานแรงฉีก (Tear)** ทำการวัดความต้านทานแรงฉีกของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้ ดังแสดงในภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-19 ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตขึ้น

จากภาพที่ 4-19 พบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่วัดได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกภาวะ โดยการผสมกากมันเข้าไปในกระดาษจะทำให้ความต้านทานแรงฉีกที่วัดได้มีค่าสูงใกล้เคียงกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วน (HW) ซึ่งอาจเกิดจากความยาวของเส้นใย

ที่สูงกว่า ดังผลการวิเคราะห์ความยาวของเส้นใยซึ่งได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-9 เมื่อนำไปผสมกับเยื่อใยสั้นเพื่อขึ้นเป็นแผ่นกระดาษจะทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตได้มีค่าสูงใกล้เคียงกับเยื่อใยสั้นล้วนนั่นเอง

การผลิตเยื่อเชิงเคมีของกากมันสำปะหลังในทุกภาวะจะทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของแผ่นกระดาษที่วัดได้สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากการผสมกากมันที่ไม่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อใดๆ (Control) แสดงว่าการนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะทำให้เส้นใยกากมันมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปผสมกับเยื่อกระดาษเพื่อขึ้นแผ่น จึงส่งผลให้ได้กระดาษที่มีค่าความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ถึงแม้จะมีความยาวเส้นใยลดลงจากก่อนผลิตเยื่อ ทั้งนี้ภาวะการต้มเยื่อที่ให้ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที (T100 t180) ที่ความเข้มข้นต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะให้ค่าความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อใยสั้นล้วนเสียอีก ส่วนภาวะที่ให้ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษต่ำสุดคือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที (T140 t120) ด้วยความเข้มข้นต่าง 20 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ ณ เวลาและความเข้มข้นต่างคงที่ พบว่าหากทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้เส้นใยถูกทำลายได้มาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกซึ่งขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ เป็นหลักมีค่าลดลง โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.000 แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเป็นอย่างมาก

ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ผลิตเยื่อ พบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละระดับความเข้มข้น นั่นคือการเปลี่ยนความเข้มข้นแทบไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษ โดยสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของความเข้มข้นที่ใช้ในการต้มเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.717 แสดงว่าความเข้มข้นต่างไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด เช่นเดียวกับเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อที่แทบไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษเลย เว้นแต่ในกรณีที่ใช้ความเข้มข้นต่างต่ำๆ จะส่งผลให้ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการต้มเยื่อ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์

ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าค่า Sig. หรือค่า P-value ของเวลาที่ใช้ในการต้มเห็จะมีความเท่ากับ 0.589 แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการต้มเห็จะไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

4.2.5 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาภาวะการผลิตเห็ที่ดีที่สุด

ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี ANOVA แบบ factorial design ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยดูได้จากค่า Sig. หรือ ค่า P-value ที่ได้เป็นหลัก หากค่านี้ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยที่กำลังพิจารณามีอิทธิพลต่อสมบัติของเห็และกระดาษรวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่หากพบค่า Sig. หรือ ค่า P-value ที่ได้มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ที่กำลังพิจารณาอยู่อย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตเห็ทั้งหมดต่อสมบัติของเห็และกระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยกากมันสำปะหลังรวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพบว่า ปัจจัยในแง่อุณหภูมิจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความเข้มข้น ส่วนเวลาที่ใช้ในการต้มเห็จะมีผลต่อสมบัติของเห็และกระดาษรวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยน้อยที่สุด หรือแทบไม่ส่งผลเลยในบางสมบัติ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติของเห็ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติของกระดาษในตารางที่ 4-2 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการผลิตเห็ระดับต่างๆ ต่อสมบัติของเห็โดยใช้วิธี ANOVA แบบ factorial design

สมบัติเห็	อุณหภูมิ	เวลา	ความเข้มข้นต่าง (%)	อุณหภูมิ * เวลา	อุณหภูมิ * ความเข้มข้น	เวลา * ความเข้มข้น	อุณหภูมิ * เวลา * ความเข้มข้น
	Sig.	Sig.	Sig.	sig	sig	sig	Sig.
ปริมาณต่างที่ตกค้างในเห็	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
ผลผลิตเห็ที่ได้	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*

หมายเหตุ - อุณหภูมิ * เวลา * ความเข้มข้น คือปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้

- * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value/Sig.} \leq 0.05$)

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการผลิตเยื่อระดับต่างๆ ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยโดยใช้วิธี ANOVA แบบ factorial design

ลักษณะพื้นฐาน วิทยาของเส้นใย	อุณหภูมิ	เวลา	ความเข้มข้น ต่าง (%)	อุณหภูมิ * เวลา	อุณหภูมิ * ความเข้มข้น	เวลา * ความ เข้มข้น	อุณหภูมิ * เวลา * ความ เข้มข้น
	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
1.ความยาวเส้น ใยแบบ LWW	0.720	0.406	0.095	0.877	0.535	0.688	0.434
2.ความกว้าง ของเส้นใย	0.000*	0.101	0.007*	0.470	0.300	0.841	0.008*
3.ปริมาณเส้นใย ขนาดเล็ก	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.015*	0.001*	0.000*
4.ปริมาณ กระจุกเส้นใย	0.000*	0.003*	0.005*	0.010*	0.197	0.155	0.005*
5.ดัชนีความโค้ง งอของเส้นใย	0.080	0.202	0.152	0.172	0.388	0.933	0.076
6.ดัชนีความหัก งอของเส้นใย	0.108	0.443	0.098	0.023*	0.585	0.680	0.117

หมายเหตุ - อุณหภูมิ * เวลา * ความเข้มข้น คือปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลาและ
ความเข้มข้นต่างที่ใช้
- * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value/Sig. \leq 0.05)

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการผลิตเยื่อระดับต่างๆ ต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตขึ้นโดยใช้วิธี ANOVA แบบ factorial design

สมบัติของกระดาษ	อุณหภูมิ	เวลา	ความเข้มข้นต่าง (%)	อุณหภูมิ * เวลา	อุณหภูมิ * ความเข้มข้น	เวลา * ความเข้มข้น	อุณหภูมิ * เวลา * ความเข้มข้น
	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
1.ความหนาแน่น	0.015*	0.527	0.104	0.878	0.795	0.161	0.015*
2.ความเรียบ	0.000*	0.001*	0.061	0.000*	0.001*	0.027*	0.022*
3.ความต้านทานการซึมอากาศ	0.000*	0.000*	0.000*	0.416	0.000*	0.799	0.000*
4.ความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.002*	0.012*	0.046*	0.177	0.046*	0.347	0.005*
5.ความต้านทานแรงฉีก	0.000*	0.589	0.717	0.154	0.424	0.002*	0.821

- หมายเหตุ
- อุณหภูมิ * เวลา * ความเข้มข้น คือปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้
 - * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value/Sig. \leq 0.05)

จากค่าที่แสดงในตารางที่ 4-2 4-3 และ 4-4 ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษโดยตรง เนื่องจากความร้อนจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อ การอ่อนตัวของเส้นใยและการสูญเสียเส้นใยบางส่วนไปเนื่องจากการใช้ความร้อนที่สูงมากเกินไป ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้จึงส่งผลต่อสมบัติเยื่อและกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทั้งสิ้น ในส่วนของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยจะมีเพียงความยาวของเส้นใยแบบ LWW ดัชนีความหักงอและดัชนีความโค้งงอของเส้นใยเท่านั้นที่ไม่ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ นอกนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเยื่อแล้วแต่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยทั้งสิ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ความร้อนหรืออุณหภูมิที่ให้ไปในระบบนั้น ไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยในระบบได้ อีกทั้งยังมีผลเพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เกิดการหักงอหรือโค้งงอของเส้นใย

หากพิจารณาในแง่ของเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อพบว่าแทบไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยแต่อย่างใด มีเพียงสมบัติบางประการของกระดาษที่ได้รับอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อ นั่นคือความเรียบ ความต้านทานการซึมอากาศและความแข็งแรงต่อแรง

ดิ่ง อาจเป็นเพราะยิ่งเพิ่มเวลาในการผลิตเยื่อขนานขึ้นจะทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยได้ดี ส่งผลต่อการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยที่ดี ความสามารถในการดูดตามรุกรุนในเนื้อกระดาษและความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยที่เกิดขึ้นก็เป็นได้ จึงทำให้สมบัติเหล่านี้ได้รับอิทธิพลไปด้วย

ส่วนความเข้มข้นของสารเคมีต่างที่ใช้ในการผลิตจะส่งผลต่อสมบัติแค่บางประการเช่นกัน ได้แก่ ปริมาณต่างที่ตกค้างในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อ ความกว้างของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ปริมาณกระจุกเส้นใย ความต้านทานการซึมอากาศและความแข็งแรงต่อแรงดึง ทั้งนี้เป็นเพราะความเข้มข้นต่างที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดปริมาณต่างที่ตกค้างในระบบภายหลังจากการต้ม เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้ปริมาณต่างที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อ นอกจากนี้สารเคมีต่างยังมีผลต่อความกว้างหรือบวมของเส้นใยเนื่องจากเส้นใยจะมีการดูดซึมสารเคมีเข้าไปจึงเกิดการบวมของเส้นใยขึ้น ทำให้ความกว้างของเส้นใยที่วัดได้เพิ่มขึ้นนั่นเอง อีกทั้งระดับความเข้มข้นต่างจะเป็นตัวชี้วัดปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่เกิดจากการแยกย่อยของกลุ่มก้อนเส้นใยและปริมาณกระจุกเส้นใยที่เปลี่ยนไปในระบบด้วย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อความสามารถของเส้นใยในการดูดตามรุกรุนของกระดาษและความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยโดยตรง เพราะหากความเข้มข้นต่างที่ใช้มีไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้เกิดการแยกย่อยเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ได้ดี การดูดตามช่องว่างรุกรุนในเนื้อกระดาษก็จะทำได้ไม่ดี นอกจากนี้เส้นใยที่แยกย่อยไม่ดี จะมีปริมาณกระจุกเส้นใยมาก ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเกิดได้ไม่ดี ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยจึงน้อย ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจึงต่ำไปด้วยนั่นเอง

เมื่อพิจารณาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อจะพบว่าค่อนข้างส่งผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยพอสมควร ทั้งในส่วนของความกว้างของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กและปริมาณกระจุกเส้นใย นอกเหนือจากการปฏิสัมพันธ์นี้จะมีผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้โดยตรง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสมบัติโดยส่วนใหญ่จะขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายต่างเป็นหลัก ดังนั้นจึงพบปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัยนี้ อย่างในกรณีความกว้างของเส้นใยที่ได้รับอิทธิพลนั้น อาจเป็นเพราะโดยปกติแล้วความกว้างของเส้นใยจะขึ้นกับความเข้มข้นของต่างที่ใช้เป็นหลัก หากมีการดูดซึมต่างเข้าไปมากเส้นใยก็จะบวมตัวและมีความกว้างของเส้นใยมาก ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิและเวลาที่มากจะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิริยาการดูดซึมต่างเข้าไปในเส้นใยให้ดีขึ้นด้วย ดังนั้นจึงต้องมีปัจจัยทั้ง 3 เกื้อหนุนกันสำหรับลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยประเภทนี้ หรืออย่างในกรณีของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กและปริมาณกระจุกเส้นใยจะถูกกำหนดโดยปัจจัยทั้ง 3 ร่วมกัน เนื่องจากลักษณะทางพื้นฐาน

วิทยาของเส้นใยทั้ง 2 ประเภทจะขึ้นกับการแยกย่อยของเส้นใยที่เกิดจากผลของปัจจัยทั้ง 3 โดยตรง จึงมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ ในส่วนของสมบัติกระดาษที่ผลิตขึ้นแทบทุกตัวจะได้รับอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อทั้งสิ้น เว้นแต่ความต้านทานแรงฉีก เนื่องจากสมบัตินี้เป็นผลมาจากความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ และความยาวเส้นใยเท่านั้น จึงได้รับอิทธิพลจากพันธะระหว่างเส้นใยค่อนข้างน้อย ความเข้มข้นต่างและเวลาที่ใช้ในการต้มจึงไม่ค่อยส่งผลต่อสมบัติในด้านนี้ เป็นผลให้ไม่ได้รับอิทธิพลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 3 ชนิดนี้

จากการวิเคราะห์ผลทางด้านลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยและสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ผลิตขึ้น สามารถสรุปได้ว่าภาวะการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อมากที่สุด โดยพิจารณาได้จากค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อเชิงเคมีที่ภาวะนี้มีค่าสูงที่สุดในบรรดาภาวะการผลิตเยื่อทั้งหมด และมีค่าสูงใกล้เคียงกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นล้วนอีกด้วย ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวมีความสำคัญต่อการผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก เนื่องจากกระดาษชนิดนี้ต้องการความแข็งแรงมากพอสำหรับการนำไปทำบรรจุภัณฑ์ จึงเป็นสมบัติกระดาษที่ควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรกๆ อีกทั้งสมบัติของเยื่อในด้านผลผลิตเยื่อที่ได้ ปริมาณต่างที่ตกค้างในเยื่อ หรือปริมาณเส้นใยขนาดเล็กต่างก็ให้ค่าที่สูงทั้งสิ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปผลิตเป็นกระดาษได้ โดยเมื่อพิจารณาถึงสมบัติของกระดาษที่ได้ในแง่อื่นๆ จะพบว่าที่ภาวะนี้สามารถผลิตกระดาษที่ให้ความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศ ความต้านทานแรงฉีก ความหนาแน่น หรือแม้แต่ความเรียบที่มีค่าสูงเป็นอันดับต้นๆ จากภาวะการผลิตเยื่อทั้งหมด ดังนั้นจึงเลือกใช้เยื่อเชิงเคมีที่ผลิตได้จากภาวะนี้ไปทำการทดลองในขั้นต่อไป โดยนำไปทำการวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของเยื่อ ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [71] พบว่ามีค่าเท่ากับ 244 ± 6 มิลลิลิตร

ภาวะการผลิตเยื่ออีกภาวะหนึ่งที่สามารถให้สมบัติเยื่อและกระดาษที่ดีใกล้เคียงกับภาวะที่เลือกใช้นั้นคือภาวะการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที ด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่สาเหตุที่ไม่ได้เลือกใช้ภาวะในการผลิตนี้เนื่องจากเมื่อคำนึงถึงต้นทุนในการผลิตและการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมแล้วพบว่า ภาวะดังกล่าวจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในระบบมากกว่าเพราะใช้เวลาในการต้มเยื่อนานกว่าและยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มอีกด้วย และแม้ว่าจะใช้ภาวะการผลิตที่รุนแรงขึ้นแล้วก็ยังไม่สามารถผลิตกระดาษที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเทียบเท่าภาวะที่เลือกใช้ได้ ดังนั้นจึง

นำไปสู่ข้อสรุปในการเลือกใช้ภาวะการผลิตเยื่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ด้วยความเข้มข้นไซเตียมไฮดรอกไซด์ 18 เปอร์เซ็นต์ เป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อมากที่สุดนั่นเอง

4.3 ผลการทดลองตอนที่ 3: เปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลของกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วเพื่อนำไปผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูก

ในการทดลองนี้ได้นำกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งแล้วส่วนที่เหลือมาทำการบดเยื่อ 2 ระดับ โดยใช้เครื่อง Valley beater คือ บดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้อยู่ในช่วง 350 ± 30 มิลลิลิตร และบดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้เท่ากับเยื่อจากภาวะการผลิตเยื่อเคมีที่ดีที่สุด (อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ไซเตียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 244 ± 6 มิลลิลิตร จากนั้นทำการคำนวณค่าผลผลิตเยื่อ (Pulp yield) ที่ได้และตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology) กับเยื่อเชิงกลที่ผลิตได้ทั้ง 2 ระดับ และเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065-1:2001 [72] ได้ผลดังนี้

4.3.1 ค่าสภาพระบายได้และผลผลิตเยื่อที่ได้

หลังจากการนำกากมันสำปะหลังมาทำการบดเยื่อ 2 ระดับ จะได้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเท่ากับ 335 ± 9 มิลลิลิตร และ 244 ± 6 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยในที่นี้จะขอกำหนดชื่อของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการบดเยื่อ 2 ระดับใหม่ เป็นกากบด 350 มิลลิลิตรและกากบด 240 มิลลิลิตร ตามลำดับ เพื่อให้ง่ายต่อการกล่าวถึง จากนั้นทำการคำนวณค่าผลผลิตเยื่อที่ได้ (Pulp yield) ของกากบดทั้ง 2 ระดับ ได้ค่าเท่ากับ 64.40 เปอร์เซ็นต์ และ 70.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากตรงนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อเชิงเคมีซึ่งมีค่าผลผลิตเยื่อที่ได้เท่ากับ 53.354 เปอร์เซ็นต์ แล้ว พบว่าการผลิตเยื่อเชิงกลจะให้ค่าผลผลิตเยื่อที่ได้สูงมากกว่า เนื่องจากการผลิตเยื่อเชิงกลจะเป็นกระบวนการที่ใช้ขั้นตอนทำการบดเยื่อเพื่อแยกเส้นใยออกจากกันโดยไม่มีการใช้ความร้อนหรือสารเคมีร่วมด้วย อาศัยเพียงแรงเสียดสีระหว่างขั้นตอนเส้นใยและระหว่างเส้นใยด้วยกันเพื่อให้เส้นใยเกิดการแตกตัวแยกย่อยได้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ดังนั้นจึงไม่เกิดการสูญเสียปริมาณเส้นใยเหมือนในกรณีของการผลิตเยื่อเคมีที่มีการใช้ความร้อนและสารเคมีร่วมในการผลิตเยื่อด้วย

4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย

นำกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงกล (กากบด 350 มิลลิลิตรและกากบด 240 มิลลิลิตร) กากมันสำปะหลังจากการต้มเยื่อด้วยภาวะที่ดีที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ด้วยความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 18 เปอร์เซ็นต์ (กากต้ม) กากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่อย่างใด (Control) และเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย ได้ผลแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ชนิดเยื่อ	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	ดัชนีความหักงอของเส้นใย (1 / มม.)	ปริมาณกระจุกเส้นใย	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร)
OCC	1.224 \pm 0.002	40.06 \pm 1.19	0.106 \pm 0.001	1.856 \pm 0.029	6.0 \pm 0.0	19.1 \pm 0.0
Control	1.300 \pm 0.014	24.10 \pm 2.33	0.378 \pm 0.010	2.469 \pm 0.078	641.5 \pm 16.3	32.5 \pm 0.1
กากต้ม	1.180 \pm 0.001	35.69 \pm 0.00	0.365 \pm 0.018	2.754 \pm 0.096	465.5 \pm 33.2	32.8 \pm 0.4
กากบด350 ml.	1.549 \pm 0.112	33.58 \pm 0.125	0.369 \pm 0.002	2.439 \pm 0.011	552.5 \pm 7.8	32.0 \pm 0.6
กากบด240 ml.	0.885 \pm 0.027	40.72 \pm 0.660	0.363 \pm 0.037	2.354 \pm 0.117	470.5 \pm 0.7	31.6 \pm 0.3

- **ความยาวเส้นใยแบบ LWW** จากตารางที่ 4-5 พบว่าเมื่อนำกากมันสำปะหลังไปผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมี จะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดสั้นลงจากเส้นใยกากมันปกติ (Control) และเส้นใยจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) แสดงว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีสามารถทำให้เส้นใยแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดี ก่อให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กและอยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตกระดาษมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาเยื่อเชิงกลที่ผลิตได้แล้วพบว่า กากมันที่ผ่านการบดเยื่อในระดับปกติ คือ 350 ml. จะให้ความยาวเส้นใยมากที่สุดและมากกว่าความยาวเส้นใยของกากมันปกติกับเส้นใยจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าเสียอีก แต่เมื่อนำกากมันไปทำการบดเยื่อให้ได้ค่าสภาพระบายได้เท่ากับของกากต้มที่ภาวะดีที่สุด จะพบว่าได้เส้นใยที่มีขนาดสั้นที่สุด ด้วยเหตุที่กากมันสำปะหลังถูกนำไปผ่านการผลิตเยื่อเชิงกลในระดับที่

มาก เส้นใยที่ได้จึงสั้นลงเยอะ สรุปได้ว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดสั้นมากกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั่นเอง

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อที่ต่างชนิดกัน (กากมันภาวะต่างๆ และเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า) มีค่าเท่ากับ 0.000472 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดเยื่อจะส่งผลต่อความยาวเส้นใยแบบ LWW อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของกากต่างชนิดกัน (การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังด้วยภาวะต่างๆ) จะมีค่าเท่ากับ 0.001511 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากจะส่งผลต่อความยาวเส้นใยแบบ LWW อย่างมีนัยสำคัญ

- **ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก** จากตารางที่ 4-5 พบว่าการนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อทั้งในแบบเชิงกลและเชิงเคมีต่างกันก็ส่งผลให้เกิดปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในปริมาณเพิ่มขึ้นจากกากมันปกติทั้งสิ้น โดยการนำกากมันไปทำการบดเยื่อให้ได้ค่าสภาวะบดได้เท่ากับของกากต้มที่ภาวะดีที่สุด จะให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากที่สุด รองลงมาคือเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า กากต้มจากภาวะที่ดีที่สุด กากบดระดับปกติและกากมันที่ไม่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแต่อย่างใด ตามลำดับ แสดงว่าการบดเยื่อในระดับปกติจะยังไม่สามารถทำให้เกิดปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในจำนวนมากได้ การแยกย่อยของเส้นใยจึงทำได้แค่ระดับหนึ่งเท่านั้น แต่เมื่อทำการบดเยื่อในระดับที่สูงเพิ่มขึ้นเส้นใยจะถูกบดมาก ผังเส้นใยเกิดการหลุดลอกออก ดังนั้นจึงเกิดเป็นเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมากและได้ปริมาณมากกว่าการนำกากมันไปผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีอีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตเยื่อที่แตกต่างกันเนื่องจากการบดเยื่อเกิดจากการใช้ชีบดทำลายผนังเส้นใยจนเกิดการหลุดลอกออกมาเป็นเส้นใยขนาดเล็ก ส่วนการต้มเยื่อจะใช้ความร้อนและสารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดการบวมตัวและแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ดังนั้นปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อยกว่าหากเทียบกันในระดับที่มีค่าสภาวะบดได้ของเยื่อเท่ากันนั่นเอง

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อที่ต่างชนิดกันจะมีค่าเท่ากับ 0.000193 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดเยื่อจะส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของกากต่างชนิดกันจะมีค่าเท่ากับ 0.000731 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากจะส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ

- **ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย** จากตารางที่ 4-5 พบว่ากากมันสำปะหลังทุกภาวะจะมีความโค้งงอของเส้นใยมากกว่าเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าทั้งสิ้น แต่เมื่อนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลและเชิงเคมีแล้วจะพบว่าความโค้งงอของเส้นใยจะเกิดได้น้อยลง โดยกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงกลที่ระดับ 240 มิลลิเมตรจะให้ค่าความโค้งงอน้อยกว่ากากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีและกาดบดในระดับปกติ ตามลำดับ เนื่องจากการบดเยื่อที่ระดับสูงๆ เส้นใยจะถูกตัดสั้นลงมาก โอกาสเกิดการโค้งงอจึงน้อยลง รองลงมาคือการผลิตเยื่อเชิงเคมีซึ่งจะมีการใช้ความร้อนและสารเคมีช่วยแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ และทำให้เส้นใยอ่อนนิ่มลง ความโค้งงอจึงเกิดได้น้อย แต่ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับการบดเยื่อในระดับสูงๆ ได้ แต่หากทำการบดเยื่อที่ระดับปกติความโค้งงอของเส้นใยที่เกิดขึ้นก็ยังถือว่ามียอยู่ในปริมาณมากอยู่ ทั้งนี้ค่าความโค้งงอที่วัดได้จากกากมันทุกชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าการนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่างๆ จะช่วยลดความโค้งงอลงได้เพียงเล็กน้อย

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อต่างชนิดกันมีค่าเท่ากับ 0.000115 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดเยื่อจะส่งผลต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของกากต่างชนิดกันจะมีค่าเท่ากับ 0.88584 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากไม่ได้ส่งผลต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด

- **ดัชนีความหักงอของเส้นใย** จากตารางที่ 4-5 พบว่าแนวโน้มจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าที่วัดได้จากดัชนีความโค้งงอของเส้นใยเลย ต่างกันเพียงแค่น้อยคือดัชนีความหักงอของเส้นใยที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีในที่นี่จะมีค่ามากที่สุด ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการใช้ความร้อนและสารเคมีในกระบวนการผลิตมีผลทำให้เส้นใยบางส่วนเกิดการหักงอเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความหักงอของเส้นใยที่วัดได้จากกากมันสำปะหลังทุกชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกันมากและแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อต่างชนิดกันมีค่าเท่ากับ 0.000734 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อจะส่งผลต่อดัชนีความหักงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของกากต่างชนิดกันจะมีค่าเท่ากับ 0.034625 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากจะส่งผลต่อดัชนีความหักงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ

- **ปริมาณกระจกเส้นใย** จากตารางที่ 4-5 พบว่าการนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีและเชิงกลจะสามารถลดปริมาณกระจกเส้นใยลงจากกากมันสำปะหลังปกติที่ไม่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแต่อย่างใดได้ ด้วยเหตุนี้ไม่ว่าจะเป็นการผลิตเยื่อเชิงเคมีหรือเชิงกลก็ตาม ต่างก็สามารถทำให้เส้นใยกากมันเกิดการแตกตัวแยกย่อยได้ดีขึ้น ปริมาณกระจกเส้นใยที่วัดได้จึงมีค่าน้อยลง โดยในที่นี้การนำกากมันไปผ่านการต้มเยื่อจะเป็นการลดปริมาณกระจกเส้นใยลงได้มากกว่าการนำกากมันไปผ่านการบดเยื่อที่ระดับ 240 มิลลิลิตรและการบดเยื่อที่ระดับปกติ ตามลำดับ แสดงว่าการใช้ความร้อนและสารเคมีจะส่งผลให้เกิดการแยกย่อยเส้นใยได้ดีกว่าการบดเยื่อ อย่างไรก็ตามกากมันสำปะหลังที่ผ่านการต้มเยื่อก็ยังมีปริมาณกระจกเส้นใยอยู่มากกว่าเยือกช่องกระดาษลูกฟูกเก่าอยู่ดี

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อต่างชนิดกันมีค่าเท่ากับ $1.64E-06$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อจะส่งผลต่อปริมาณกระจกเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของกากต่างชนิดกันจะมีค่าเท่ากับ 0.002083 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากจะส่งผลต่อปริมาณกระจกเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความกว้างของเส้นใย** จากตารางที่ 4-5 พบว่าการนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะทำให้ได้เส้นใยที่มีความกว้างมากที่สุดเนื่องจากสารเคมีต่างที่ใช้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยทำให้เกิดการบวมตัวและอ่อนนุ่มขึ้น เมื่อนำมาขึ้นแผ่น เส้นใยจะเกิดการยุบตัวแบบซิดกันได้ดี ความกว้างของเส้นใยจึงมากกว่าภาวะอื่นๆ รองลงมาคือกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านกระบวนการผลิตแต่อย่างใด กากบดที่ระดับปกติ กากบดที่ระดับ 240 มิลลิลิตรและเยือกช่องกระดาษลูกฟูกเก่า ตามลำดับ แสดงว่าการต้มเยื่อจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดความกว้างมากกว่าการบดเยื่อเนื่องจากผลจากการใช้สารเคมีในระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนการบดเยื่อจะเป็นการทำให้ผนังเส้นใยเกิดการหลุดลอกออกมา ดังนั้นเส้นใยที่ได้หลังการบดจึงมีขนาดความกว้างน้อยลง ยิ่งบดมากก็จะยิ่งทำให้เส้นใยมีความกว้างลดลงมากนั่นเอง ส่วนเยือกช่องกระดาษลูกฟูกเก่าจะให้ค่าความกว้างของเส้นใยน้อยสุด

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อต่างชนิดกันมีค่าเท่ากับ $5.99E-07$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อจะส่งผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ค่า P-

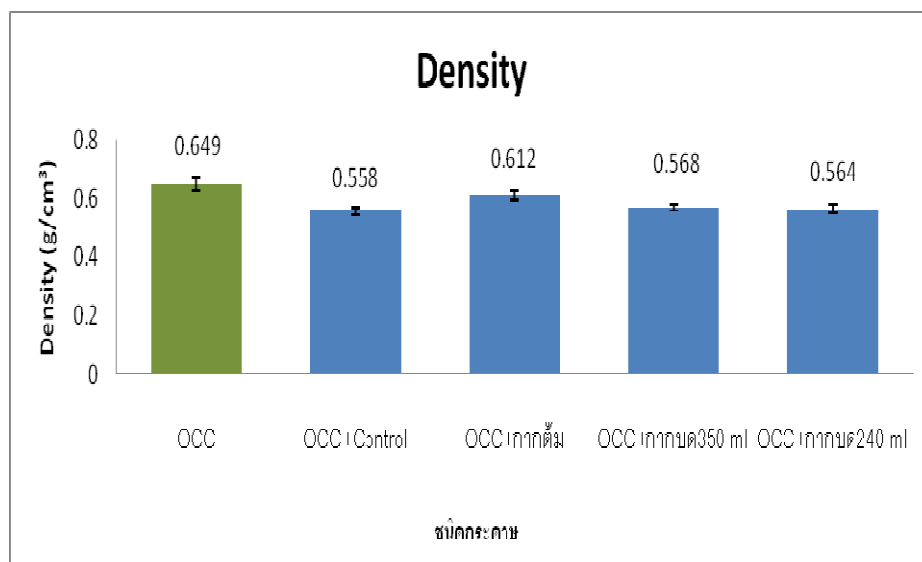
value ของกากต่างชนิดกันจะมีค่าเท่ากับ 0.111847 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากไม่ได้ส่งผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.3 สมบัติกระดาษ

นำกากมันสำปะหลังที่ผ่านการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ด้วยความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 18 เปอร์เซ็นต์ (กากต้ม) กากมันสำปะหลังที่ผ่านการบดเยื่อ 2 ระดับ (กากบด 350 มิลลิเมตร และกากบด 240 มิลลิเมตร) และกากมันที่ไม่ผ่านการผลิตเยื่อแต่อย่างใด (Control) มาผสมกับเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า (OCC) ในสัดส่วนกากมันสำปะหลังร้อยละ 10 ของน้ำหนักกระดาษ จากนั้นนำเยื่อผสมทุกภาวะและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกล้วน (ภาวะควบคุม) ไปทำการเติมสารเติมแต่งต่างๆ ในปริมาณดังนี้ คือ แป้งประจุบวกซึ่งเป็นสารให้ความแข็งแรงที่ร้อยละ 1.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และสารกันซึม Alkyl ketene dimer (AKD) ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อขึ้นแผ่นกระดาษแข็งประเภทลูกฟูกให้ได้น้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัม/ตารางเมตร และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษได้ผลดังนี้

4.3.3.1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษ ได้แก่

- **ความหนาแน่น** ทำการคำนวณหาความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-20



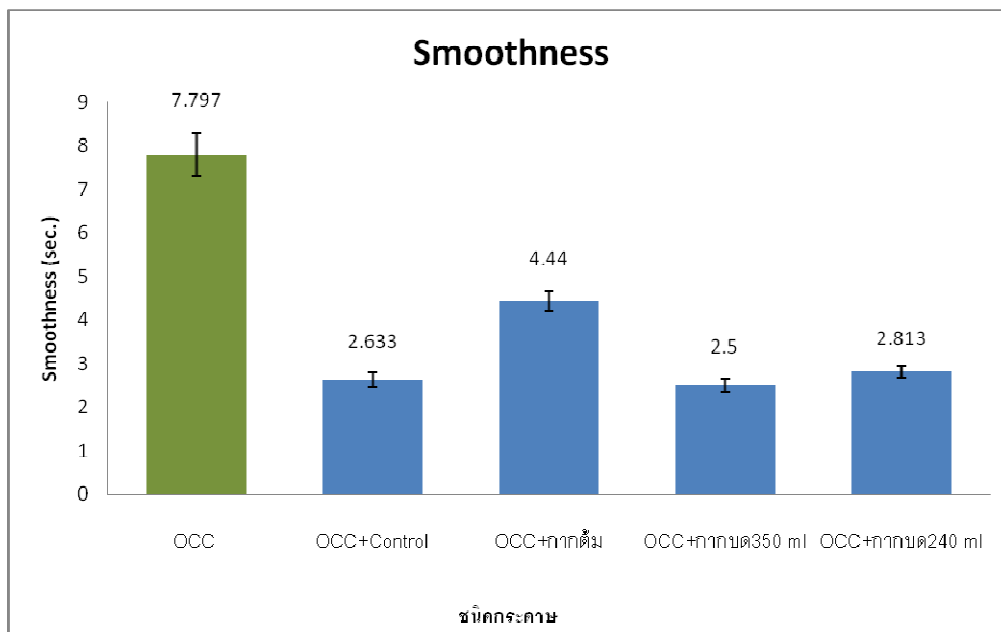
ภาพที่ 4-20 ความหนาแน่นของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-20 พบว่าการเติมกากมันสำปะหลังปกติ (Control) เข้าไปในกระดาษจะทำให้ความหนาแน่นของกระดาษที่ได้ลดลงจากเดิมพอสมควร แต่เมื่อนำกากมัน

สำหรับหลังจากผ่านกระบวนการผลิตเชื้อจะช่วยปรับสมบัติด้านความหนาแน่นของกระดาษให้ดีขึ้นได้ โดยการนำกากมันไปผ่านการต้มเชื้อจะให้ค่าความหนาแน่นของกระดาษมากกว่าการนำกากมันไปบดเชื้อที่ 350 มิลลิลิตร และการบดเชื้อที่ 240 มิลลิลิตร ตามลำดับ แสดงว่าการใช้ความร้อนและสารเคมีในกระบวนการผลิตเชื้อเชิงเคมีจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวแยกย่อยของเส้นใยกากมันได้ดีกว่าการนำกากมันไปผ่านการบดเชื้อไม่ว่าจะที่ระดับใดก็ตาม เมื่อเส้นใยเกิดการแยกย่อยได้ดี จะเกิดการสานตัวแบบชิดกันได้มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระดาษดีขึ้นนั่นเอง และหากทำการพิจารณาในส่วนของการบดเชื้อ 2 ระดับจะพบว่าได้ค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากลักษณะของเส้นใยที่ได้หลังจากการบดแทบไม่แตกต่างกัน แต่การบดเชื้อที่ระดับมากกว่า จะเกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กและสั้นลงจำนวนมาก ซึ่งบางที่อาจมากไปจนกระทั่งสูญเสียสภาพเส้นใยไป ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เมื่อนำไปขึ้นแผ่นกระดาษเส้นใยเหล่านี้จะหลุดลอดตะแกรงขึ้นแผ่นออกไปได้อีก ทำให้เส้นใยขนาดเล็กในระบบลดลง การสานตัวแบบชิดของเส้นใยจึงทำได้ไม่ค่อยดีนัก ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระดาษที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าการบดเชื้อในระดับปกตินั่นเอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเชื้อแต่ละภาวะ (เชื้อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าล้วนและเชื้อผสมระหว่างเชื้อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่ากับเยื่อจากแต่ละชนิด) มีค่าเท่ากับ $2.93E-08$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเชื้อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะ (เชื้อผสมระหว่างเชื้อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่ากับเยื่อจากแต่ละชนิด) จะมีค่าเท่ากับ $5.49E-05$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความเรียบ** ทำการวัดความเรียบของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเชื้อผสมและเชื้อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 ความเรียบของกระดาษชนิดต่างๆ

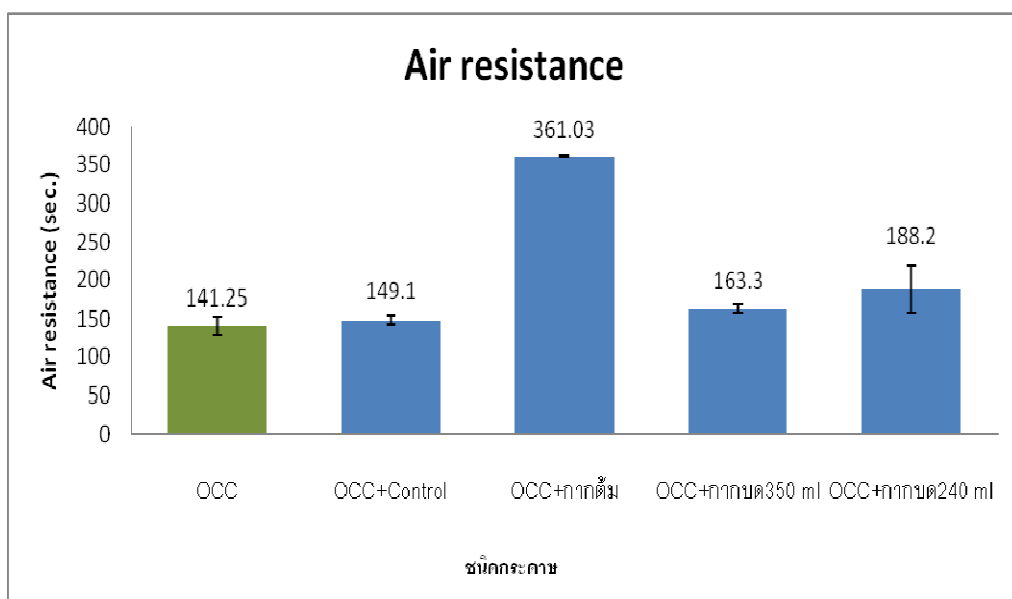
จากภาพที่ 4-21 พบว่าการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาษจะทำให้ความเรียบของกระดาษที่ผลิตได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลมาจากตัวกากมันสำปะหลังเองค่อนข้างมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนมากอยู่ เมื่อเข้าไปเติมในกระดาษจะทำให้เนื้อกระดาษค่อนข้างขรุขระมองเห็นชัดด้วยตาเปล่า แต่หากพิจารณากระดาษที่ผสมกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อแล้วพบว่าได้กระดาษที่มีความเรียบเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระดาษที่ผลิตจากกากต้มจะให้ความเรียบเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัว แสดงว่าการนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีซึ่งมีการใช้ความร้อนและสารเคมีร่วมกัน จะสามารถทำให้เกิดการแยกย่อยของกลุ่มก้อนเส้นใยกากออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้มาก การสานตัวสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยจึงเกิดได้ดี เส้นใยแนบชิดกันมากขึ้น อีกทั้งเส้นใยเดี่ยวๆ ที่เกิดขึ้นนี้จะมีพื้นที่ผิวในการรับแป้งประจุบวกที่เติมเข้าไปในระบบเพื่อเสริมความแข็งแรงของกระดาษได้ดีด้วย ดังนั้นกระดาษที่ผลิตได้มีความเรียบเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนการบดเยื่อที่ระดับ 350 มิลลิลิตร จะให้ความเรียบของกระดาษที่ผลิตได้น้อยกว่ากากมันปกติ แสดงว่าการบดเยื่อระดับนี้ยังไม่สามารถทำให้กลุ่มก้อนเกิดการแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ อีกทั้งการบดเยื่อจะทำให้เส้นใยถูกตัดสั้นลงส่งผลให้เกิดเส้นใยขนาดเล็กๆ จำนวนมาก เมื่อนำไปขึ้นแผ่นกระดาษเส้นใยเหล่านี้จะหลุดลอดตะแกรงขึ้นแผ่นออกไปได้ ทำให้เส้นใยขนาดเล็กในระบบลดลง การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงเกิดได้ไม่ค่อยดีนัก ความเรียบของกระดาษที่ได้จึงลดลง

หากทำการเพิ่มระดับการบดเยื่อให้สูงขึ้นถึง 240 มิลลิลิตร จะพบว่าสามารถเพิ่มความเรียบของกระดาษให้มากขึ้นกว่ากระดาษที่ผลิตจากกากมันปกติได้ระดับหนึ่ง แสดงว่าการ

บดเยื่อระดับนี้สามารถทำให้เกิดการแยกย่อยเส้นใยได้ดีแล้ว การสานตัวสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยจึงเกิดได้มากส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีความเรียบเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความเรียบที่เพิ่มขึ้นนี้จะยังไม่สามารถเทียบเท่ากับความเรียบของแผ่นกระดาษที่ผลิตจากเยือกากที่ผ่านการต้มได้ แสดงว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีสามารถทำให้เกิดการแยกย่อยของเส้นใยได้ดีกว่าการบดเยื่อ ส่งผลให้ได้สมบัติด้านความเรียบของกระดาษที่ดีกว่าการบดเยื่อทั้ง 2 ระดับนั่นเอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ $3.62E-18$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความเรียบของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ $1.32E-11$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความเรียบของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความต้านทานการซึมอากาศ** ทำการวัดความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยือก่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-22



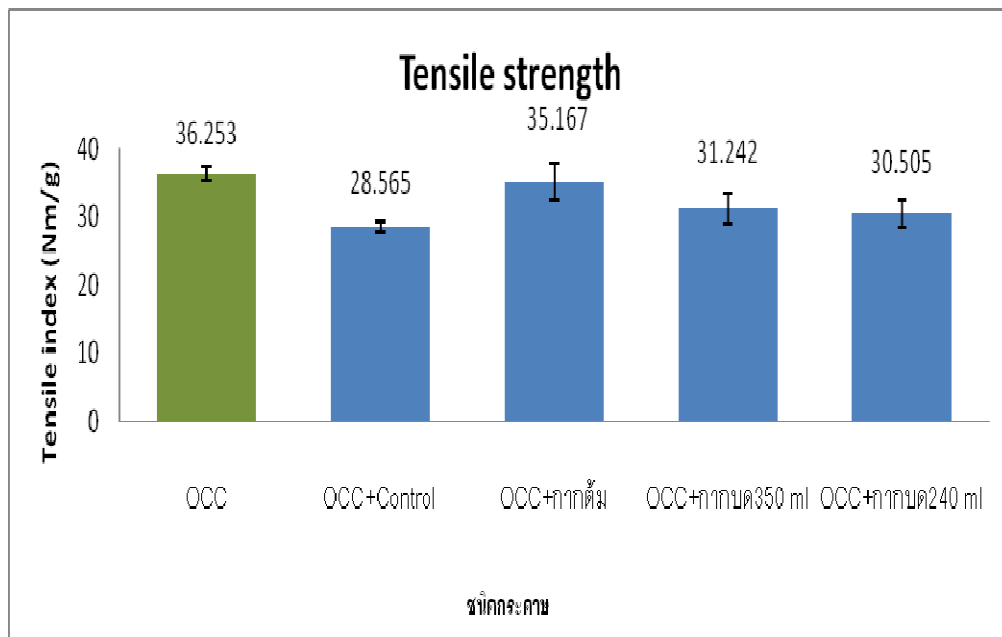
ภาพที่ 4-22 ความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-22 พบว่ากระดาษที่มีการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปจะทำให้ความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยกากมันจะเข้าไปอุดตามรูพรุนของกระดาษได้ดี ส่งผลให้ค่าความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศมีค่ามากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยือก่องกระดาษลูกฟูกเก่า โดยในที่นี้กระดาษที่ผลิตขึ้นจากการผสมด้วยกาก

ต้มจะให้ค่าความต้านทานการซึมอากาศมากที่สุด เนื่องจากในกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะมีการใช้สารเคมีและความร้อนร่วมด้วย ส่งผลให้เส้นใยเกิดการแตกตัวแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้มาก ซึ่งเส้นใยเหล่านี้จะสามารถแนบตัวกันและเข้าไปอุดตามรูพรุนในเนื้อกระดาษได้ดี อีกทั้งเส้นใยเดี่ยวๆ ที่เกิดขึ้นนี้จะมีพื้นที่ผิวในการรับแบ่งประจุบวกและสารกันซึมได้ดี ซึ่งสารเหล่านี้จะมีอนุภาคขนาดเล็กและสามารถเข้าไปอุดตามรูพรุนในเนื้อกระดาษได้ ทำให้ความสามารถในการต้านทานการซึมของอากาศมีค่ามากขึ้น ส่วนการบดเยื่อนั้นจะให้กระดาษที่มีค่าความต้านทานการซึมอากาศเพิ่มขึ้นจากการผสมด้วยกากมันปกติแต่ก็ยังไม่สามารถเทียบเท่าการผสมด้วยกากต้มได้ แสดงว่าการต้มเยื่อนั้นจะช่วยให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีกว่า เพราะโดยส่วนใหญ่แล้วการบดเยื่อนั้นจะไปทำให้เส้นใยถูกตัดสั้นลงด้วย จึงเกิดเส้นใยสั้นๆ จำนวนมาก ซึ่งมีโอกาสหลุดลอยออกไปในกระบวนการขึ้นแผ่นกระดาษได้ ทำให้สูญเสียเส้นใยขนาดเล็กไปจากระบบ การอุดตามรูพรุนของเส้นใยจึงเกิดได้ไม่ดีเท่ากับเส้นใยจากกากที่ผ่านการต้มเยื่อตัวเอง

อย่างไรก็ตามหากทำการเปรียบเทียบในกลุ่มของการบดเยื่อด้วยกันจะพบว่าระดับการบดเยื่อที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยได้ดีขึ้น ส่งผลให้การอุดตามรูพรุนในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น ค่าความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษที่ผลิตได้จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ $5.11E-12$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ $8.9E-10$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความต้านทานการซึมอากาศของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความแข็งแรงต่อแรงดึง** ทำการวัดความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-23 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-23 พบว่าการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาษจะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่วัดได้มีค่าลดลงจากกระดาษที่ผลิตด้วยเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า เนื่องจากเส้นใยกากมันจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จำนวนมาก ดังนั้นแม้ว่าจะมีการเติมแป้งประจุบวกเข้าไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ แต่ด้วยความที่เส้นใยมีพื้นที่ผิวในการรับแป้งได้น้อย ประสิทธิภาพของแป้งจึงส่งผลได้ไม่ค่อยดีนัก ทำให้การสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยเกิดได้ไม่ดี ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยจึงต่ำ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่วัดได้จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่างๆ จะสามารถทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นได้ โดยในที่นี้กระดาษที่ผลิตขึ้นจากการผสมด้วยกากมันที่ผ่านการต้มเยื่อจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าเลยทีเดียว แสดงว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้นจะสามารถทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น กลุ่มก้อนกากมีปริมาณลดลงมาก ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเกิดได้ดี ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นกระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้นตามไปด้วย

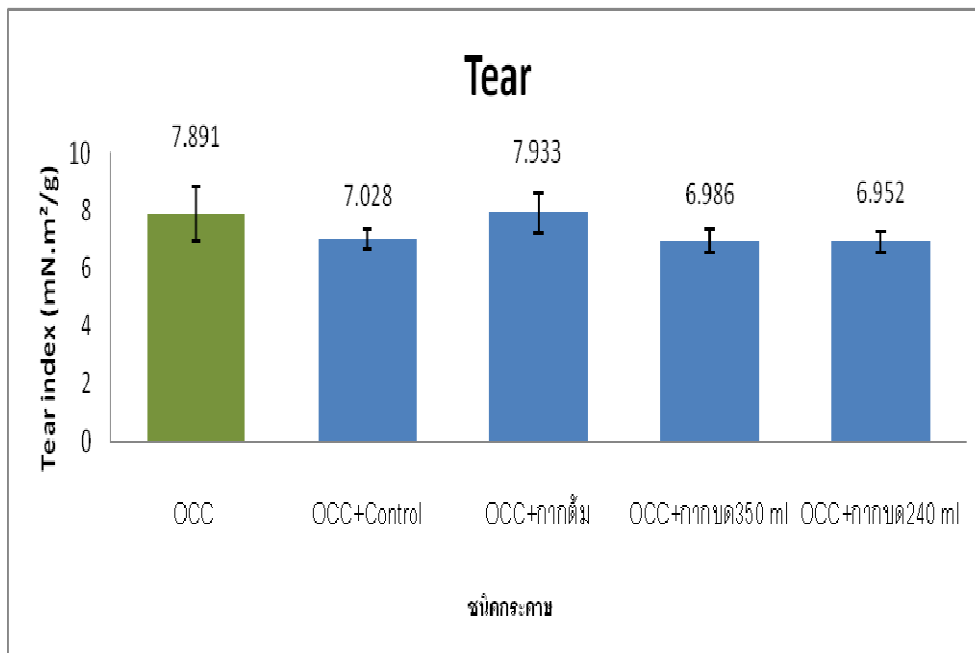
ในส่วนของการบดเยื่อนั้นจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่มีการผสมด้วยกากมันปกติ แต่ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับกระดาษที่ผลิตได้จากกากต้มอยู่ดี ทั้งนี้เป็นเพราะการบดเยื่อนั้นจะเป็นกระบวนการแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ โดยการที่ใช้ขีดเสียดสีทำให้เกิดการหลุดลอกของผนังเส้นใยขึ้น นอกจากนี้เส้นใยบางส่วนจะถูกขีดตัดให้มีขนาดสั้นลง

ด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ดังนั้นแม้ว่าจะมีการเติมแป้งเข้าไปช่วยในระบบ แต่ตัวเส้นใยเองจะยังไม่สามารถมีพื้นที่ผิวในการรับสารเทียบเท่ากับกรณีของกากต้มได้ ดังนั้นการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงเกิดได้ไม่ค่อยดีนัก ส่วนการต้มเยื่อนั้นจะเป็นการใช้สารเคมีและความร้อนร่วมกัน โดยสารเคมีจะดูดซึมเข้าไปในเส้นใยทำให้เกิดการบวมตัวและเกิดการแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ซึ่งในที่นี้ความร้อนที่ให้เข้าไปนอกจากจะช่วยทำให้เส้นใยเกิดการอ่อนนิ่มจนสามารถแยกย่อยเส้นใยออกมาได้ง่ายแล้ว ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสารเคมีให้ทำงานได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถทำการแยกย่อยเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีกว่าการบดเยื่อนั่นเอง

หากพิจารณาการบดเยื่อ 2 ระดับ จะพบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตเยื่อประเภทเดียวกัน โดยในที่นี้การบดเยื่อระดับปกติ คือที่ 350 มิลลิลิตรนั้นจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมากกว่าการบดเยื่อที่ระดับ 240 มิลลิลิตร ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะการบดเยื่อในระดับที่สูงขึ้นไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดการแยกย่อยของเส้นใยได้มากเท่านั้น หากแต่จะมีเส้นใยบางส่วนถูกตัดให้สั้นลงด้วย พื้นที่ผิวในการสร้างพันธะของเส้นใยแต่ละเส้นจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่วัดได้มีค่าลดลงตามไปด้วย

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ $9.43E-06$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.000926 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความต้านทานแรงฉีก** ทำการวัดความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษถูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-24



ภาพที่ 4-24 ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษชนิดต่างๆ

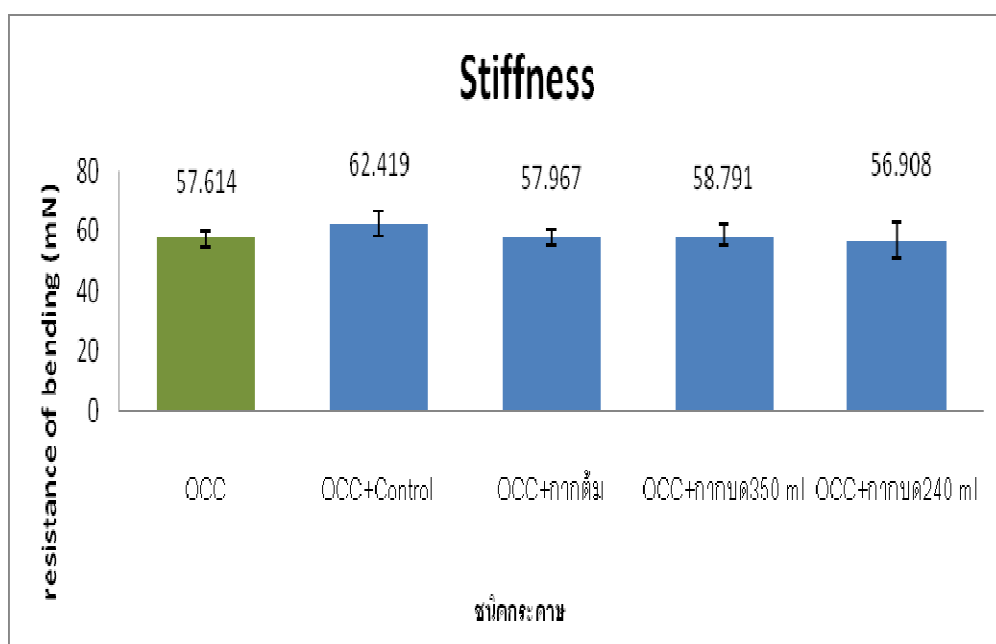
จากภาพที่ 4-24 จะเห็นได้ว่าการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาษจะทำให้ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษลดลง เนื่องจากเส้นใยกากมันสำปะหลังจะมีสภาพเป็นกระจุกเส้นใยอยู่มาก จึงกระจายแรงฉีกได้ไม่ค่อยดีนัก ส่งผลให้ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่วัดได้มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้อีกว่าเส้นใยที่ได้จากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าน่าจะมีความแข็งแรงมากพอสมควร จึงส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเส้นใยกากมันปกติ ทั้งที่ตัวของเส้นใยกากมันเองนั้นก็มีความแข็งแรงอยู่ระดับหนึ่งเช่นกัน แต่เมื่อนำกากมันสำปะหลังไปผ่านการต้มเยื่อจะทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงฉีกของแผ่นกระดาษสูงขึ้นและสูงมากกว่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าอีกด้วย แสดงว่าการนำกากมันไปผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะทำให้ได้เส้นใยที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการต้มเยื่อจะทำให้กลุ่มก้อนกากมันเกิดการแยกย่อยเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น จึงเป็นการช่วยกระจายแรงฉีกได้มาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกซึ่งขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย และด้วยเหตุที่ตัวเส้นใยกากมันนั้นค่อนข้างมีความแข็งแรงพอสมควร จึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความต้านทานแรงฉีกสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่านั่นเอง

สำหรับการบดเยื่อทั้ง 2 ระดับนั้นจะให้ค่าความต้านทานแรงฉีกต่ำกว่ากระดาษชนิดอื่นๆ เนื่องจากการบดเยื่อนั้นจะเป็นการใช้ซี่บดเสียดสีเส้นใยทำให้เกิดการหลุดลอกของผนังเส้นใยขึ้น อีกทั้งเส้นใยจะถูกซี่บดตัดให้สั้นลง ส่งผลให้ความแข็งแรงและความยาวของเส้นใยที่ได้

ลดต่ำลง ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าต่ำกว่าตัวอื่น นอกจากนี้การบิดเยื่อ ทั้ง 2 ระดับจะให้ค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ใกล้เคียงกันมากเนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตเยื่อประเภทเดียวกัน เส้นใยที่ได้จึงมีสภาพไม่แตกต่างกันมาก

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ 0.021327 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.009861 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความแข็งตึง** ทำการวัดความแข็งตึงของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-25 ความแข็งตึง (Stiffness) ของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-25 จะเห็นได้ว่าการผสมกากมันสำปะหลังเข้าไปในกระดาษจะทำให้ได้ค่าความแข็งตึงของกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวเส้นใยกากมันเองนั้นจะมีความแข็งอยู่พอสมควร ทำให้เมื่อเติมเข้าไปในกระดาษจะไปเพิ่มสมบัติทางด้านความแข็งตึงของกระดาษมากขึ้น

เมื่อพิจารณาในส่วนของการกักมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมี จะพบว่ามีความแข็งแรงดึงของกระดาษลดต่ำลงจากกักมันปกติ เนื่องจากในกระบวนการต้มเยื่อนั้นจะมีการใช้ความร้อนและสารเคมีร่วมกัน โดยที่ความร้อนและด่างจะไปมีผลให้เส้นใยเกิดการบวมตัวและอ่อนนิ่มขึ้น อีกทั้งยังแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้โดยง่าย ปริมาณกระจุกเส้นใยมีน้อยกว่ากักมันปกติ ดังนั้นสภาพเส้นใยภายหลังการผลิตเยื่อจึงมีความแข็งแรงน้อยลง กระดาษที่ผลิตได้จึงให้ค่าความแข็งแรงน้อยกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากกักมันปกติ อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้จากกักมันนั้นจะให้ค่าที่มากกว่าความแข็งแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าอยู่ดี แสดงว่าเส้นใยกักมันยังคงมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่ได้จากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่านั่นเอง

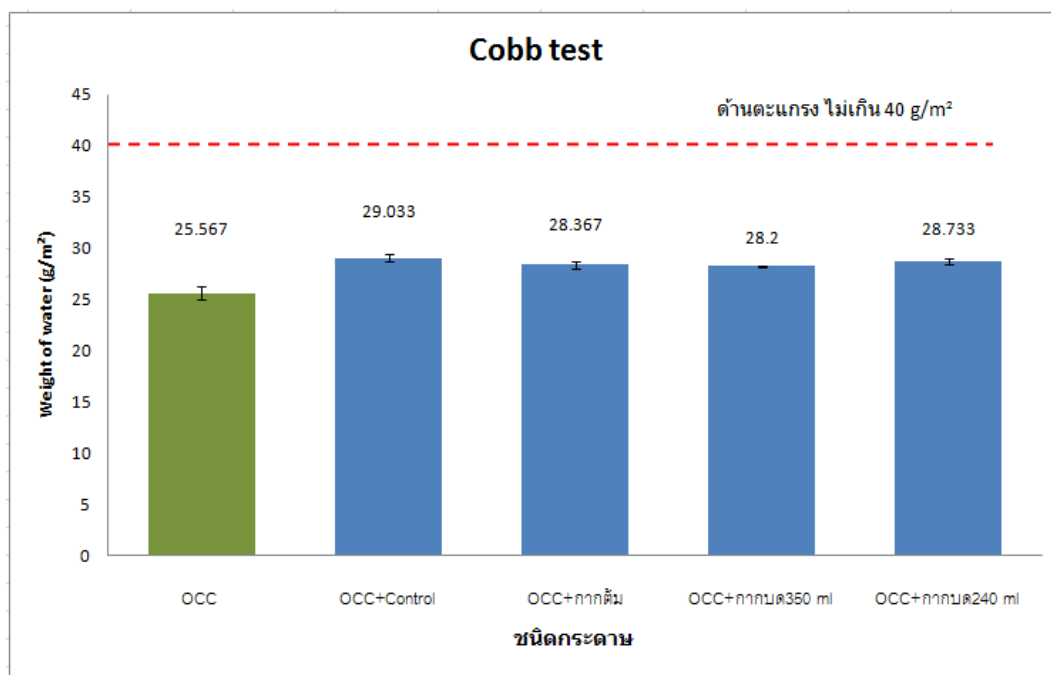
สำหรับการบดเยื่อ 2 ระดับนั้นจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยกักมันที่ผ่านการบดเยื่อที่ระดับ 350 มิลลิลิตรจะให้ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาษที่มากกว่ากระดาษที่ผลิตจากกักมัน เนื่องจากการบดเยื่อนั้นจะไม่มีการใช้ความร้อนและสารเคมีเข้ามาช่วยในกระบวนการด้วย มีเพียงการเสียดสีกันระหว่างซิปดกับเส้นใยและระหว่างเส้นใยด้วยกันเองเท่านั้น ดังนั้นเส้นใยกักมันจะแค่เพียงเกิดการหลุดลอกของผนังเส้นใยและถูกตัดให้สั้นลง แต่จะไม่เกิดการบวมตัวหรืออ่อนนิ่มลงเท่าไรนัก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงในระดับที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากกักมันต้มมันเอง โดยค่าความแข็งแรงที่วัดได้นี้จะมีค่าอยู่ระหว่างความแข็งแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากกักมันปกติและกระดาษที่มาจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า

ส่วนการบดเยื่อกักมันที่ระดับ 240 มิลลิลิตร จะพบว่าได้ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาษต่ำสุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการบดเยื่อที่มากขึ้นจะทำให้เส้นใยถูกเสียดสีได้มาก ผนังเส้นใยเกิดการหลุดลอกออกเยอะ ความแข็งแรงของเส้นใยจึงมีค่าลดต่ำลงมาก ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความแข็งแรงดึงของกระดาษต่ำกว่ากระดาษชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาษที่วัดได้จากกักมันที่ผ่านการผลิตเยื่อทั้ง 3 ชนิดนั้นจะให้ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาษที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าไม่ว่าจะนำกักมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบใดก็ตาม จะไม่ค่อยส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้เท่าใดนัก

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ 0.229515 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกักมันแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.214861 แสดงว่าการเปลี่ยน

ชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษก็จะไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงตึงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใดเช่นกัน

- การดูดซึมน้ำ ทำการวัดค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-26 โดยมีเส้นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำกับอยู่



ภาพที่ 4-26 การดูดซึมน้ำ (Cobb test) ของกระดาษชนิดต่างๆ

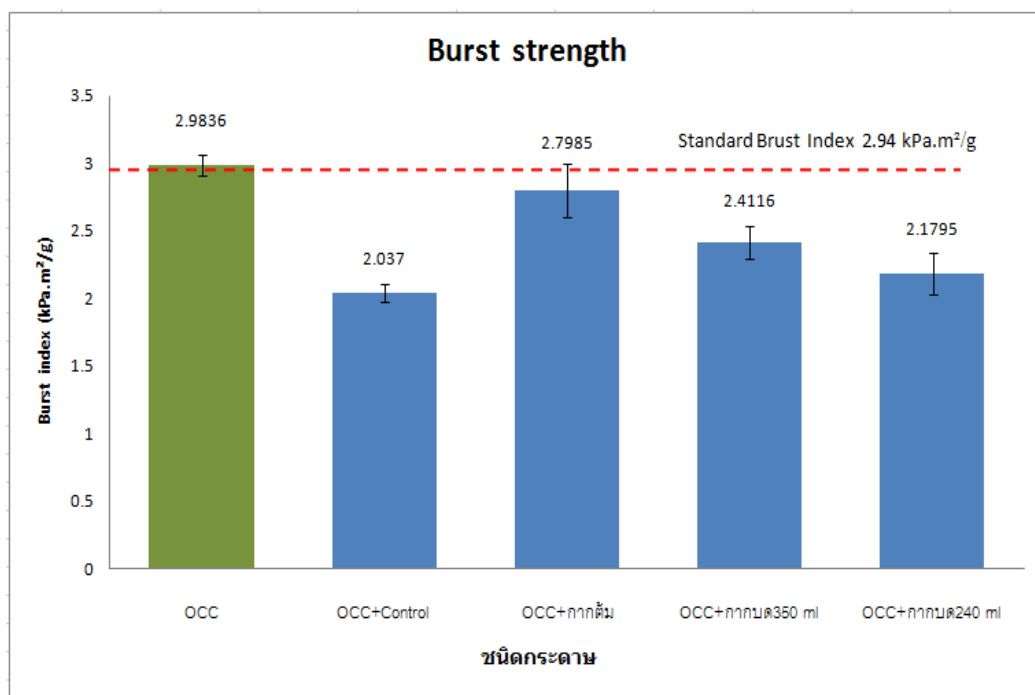
จากภาพที่ 4-26 พบว่าเมื่อเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปในกระดาษจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าเส้นใยกากมันสำปะหลังมีความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ในเส้นใยได้มาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยควรมีสสมบัติการดูดซึมน้ำไว้ได้แค่ระดับหนึ่งเท่านั้น หากเส้นใยดูดน้ำมากเกินไป จะทำให้กระดาษดูดซึมน้ำมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาด้านการใช้งานในแง่ต่างๆ อาทิเช่น การรับหมึก กระดาษที่มีการดูดซึมน้ำมากเกินไป เมื่อนำไปพิมพ์จะทำให้สีของงานพิมพ์ซีดจาง เนื่องจากหมึกเกิดการดูดซึมลงเนื้อกระดาษมากเกินไป นอกจากนี้หากพิจารณาในแง่ของบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษลูกฟูก พบว่ากล่องกระดาษควรมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมขณะขนส่ง เช่น การเปียกฝน เป็นต้น อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของกระดาษเมื่อนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ นั่นคือถ้ากระดาษดูดซึมน้ำไว้มาก ความแข็งแรงของกล่องกระดาษจะลดลง จึงไม่เหมาะที่จะนำไปบรรจุอาหารแช่แข็ง ผัก หรือผลไม้ต่างๆ ได้นั่นเอง [77]

เมื่อนำกากมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่างๆ จะพบว่าให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษลดลงจากกากมันปกติเล็กน้อยแต่ยังคงมีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าอยู่ดี แสดงว่าตัวเส้นใยกากมันยังมีสมบัติการดูดซึมน้ำไว้ได้มาก แม้ว่าจะนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแล้วก็ตาม โดยในที่นี้การบดเยื่อระดับ 350 มิลลิลิตรจะให้ค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดในบรรดากากมันทุกชนิด รองลงมาคือ กากต้ม และกากบดระดับ 240 มิลลิลิตร ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการบดเยื่อนั้นจะเป็นการเสียดสีทำให้เกิดการหลุดลอกออกของผนังเส้นใย ทำให้ได้เส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ อีกทั้งยังเป็นการตัดเส้นใยให้สั้นลงด้วย ด้วยเหตุนี้เส้นใยที่ได้จากการบดเยื่อจึงมีพื้นที่ผิวในการรับสารกันซึมได้ดี ส่งผลให้สมบัติการดูดซึมน้ำของกระดาษทำได้ลดลง สามารถกันซึมน้ำได้ดีขึ้น แต่หากนำกากมันไปทำการบดเยื่อในระดับที่สูงขึ้น จะเกิดเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจำนวนมาก ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้มีความสามารถในการอุ้มน้ำมากกว่าเส้นใยมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษที่วัดได้จึงสูงกว่าเมื่อบดเยื่อที่ระดับต่ำกว่า

ส่วนกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้นจะให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษที่มากกว่ากระดาษที่ผลิตจากกากมันที่ผ่านการบดเยื่อระดับ 350 มิลลิลิตรเล็กน้อยและต่ำกว่ากระดาษจากกากมันที่บด 240 มิลลิลิตรเล็กน้อย เนื่องจากการนำกากมันสำปะหลังไปผ่านการต้มเยื่อนั้นจะทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดี อดตามรพูนในเนื้อกระดาษได้มาก กระดาษเนื้อแน่น รพูนน้อย ความสามารถในการต้านทานการซึมอากาศมีค่าสูง ส่งผลให้การดูดซึมน้ำเกิดได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการดูดซึมน้ำของแผ่นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อจากกากมันปกติ และเยื่อบด 240 มิลลิลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการดูดซึมน้ำที่อุตสาหกรรมกำหนดพบว่ากระดาษทุกชนิดจะมีค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด จึงสามารถนำไปใช้งานได้

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ $6.99E-06$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญและเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.044049 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญด้วย

- ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ทำการวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-27 โดยมีเส้นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำกับอยู่



ภาพที่ 4-27 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) ของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-27 พบว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกับสมบัติของกระดาษในแง่ของความแข็งแรงต่อแรงดึงที่แสดงในภาพที่ 4-23 เนื่องจากความแข็งแรงทั้ง 2 ชนิดนี้จะขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก ดังนั้นแนวโน้มของกราฟที่ได้จึงเป็นไปในทางเดียวกัน โดยเมื่อทำการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปในกระดาษจะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า เนื่องจากเส้นใยกากมันจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จำนวนมาก ทำให้การสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยเกิดได้ไม่ดี ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยที่ได้จึงต่ำ

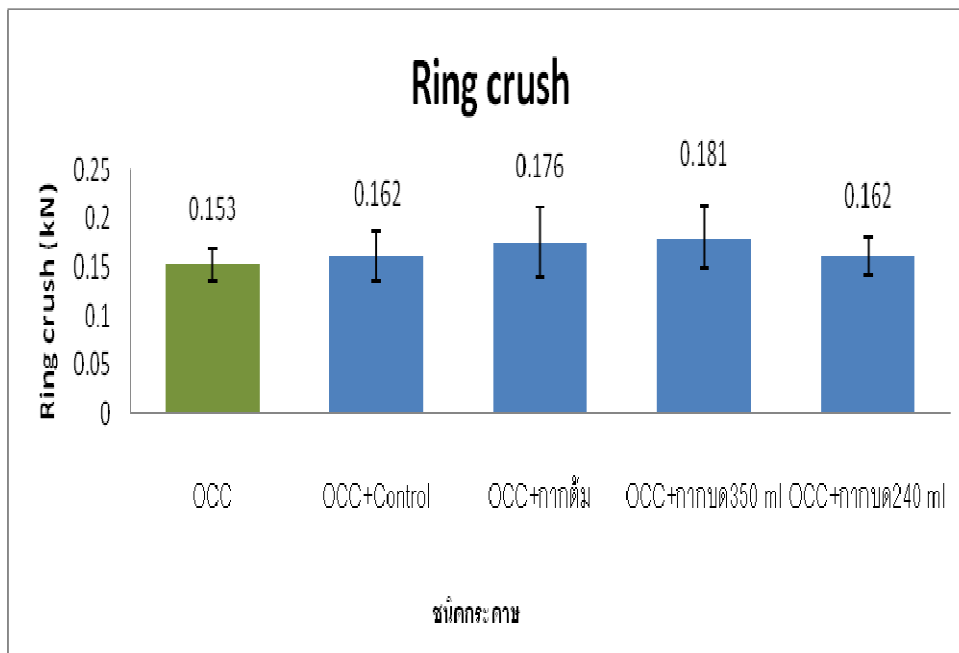
เมื่อทำการพิจารณากากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่างๆ พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ผลิตจากกากมันปกติ โดยกากมันที่ผ่านการต้มเยื่อจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตขึ้นมากที่สุด ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงมาตรฐานความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่อุตสาหกรรมกำหนดและใกล้เคียงกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าเลยทีเดียว แสดงว่าการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้นจะสามารถทำให้เส้นใยกากมันเกิดการแยกย่อยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น ส่งผลให้

กลุ่มก้อนกากมีปริมาณลดลงมาก การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงเกิดได้ดีขึ้น ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยที่ได้จะมีค่ามาก ทำให้กระดาษที่ผลิตขึ้นมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงตามไปด้วย

สำหรับการบดเยื่อนั้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ได้เพิ่มขึ้นจากการผสมด้วยกากมันปกติ แต่ยังไม่สามารถเทียบเท่ากระดาษที่ผลิตได้จากกากมันลำปะหลังที่นำไปผ่านกระบวนการต้มเยื่ออยู่ดี ทั้งนี้เป็นเพราะในกระบวนการบดเยื่อนั้นจะเป็นการใช้ชีบดทำให้เกิดการเสียดสีจนผนังเส้นใยหลุดลอกออกมาได้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ และยังทำให้เกิดการตัดเส้นใยให้มีขนาดสั้นลงซึ่งเป็นผลจากการใช้ชีบดอีกด้วย เมื่อเส้นใยมีขนาดสั้นทำให้พื้นที่ผิวของเส้นใยแต่ละเส้นในการสร้างพันธะลดลงไปด้วย ดังจะเห็นได้ว่าการบดเยื่อที่ระดับสูงกว่า คือ ที่ค่าสภาพระบายได้ 240 มิลลิลิตร ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่ต่ำกว่าเพราะยิ่งบดมากเส้นใยยิ่งสั้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่อุตสาหกรรมกำหนดจะพบว่า กากมันที่บดเยื่อระดับ 350 มิลลิลิตรจะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดไม่มากนัก แต่สำหรับกากมันบดที่ระดับ 240 มิลลิลิตรนั้นจะต่ำกว่าเกณฑ์ค่อนข้างมาก ดังนั้นในการเลือกใช้ชนิดกากมันจะขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่ใช้เป็นหลักว่าต้องการความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุระดับไหน

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ $8.51E-10$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ $1.66E-06$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความต้านทานแรงกดวงแหวน** ทำการวัดความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-28



ภาพที่ 4-28 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring crush) ของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-28 พบว่าความต้านทานแรงกดวงแหวนที่วัดได้จากกระดาษทุกชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยการเติมกากมันเข้าไปในกระดาษจะทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้น และยังนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเพื่อปรับสภาพกากมันให้มีความเหมาะสมต่อการนำมาผลิตกระดาษมากขึ้นแล้ว จะยังเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษให้มากยิ่งขึ้นไปอีก แสดงว่ากากมันลำปะหลังจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษในการทนรับแรงกดในแนวตั้งได้ดีขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากลักษณะของตัวกากมันลำปะหลังเองที่มีความแข็งแรงอยู่พอสมควรและมีกลุ่มก้อนกากจำนวนมาก ทำให้สามารถรับแรงกระทำในแนวตั้งได้ และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อจะเกิดการแยกย่อยเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ได้มาก ซึ่งถือเป็นตัวช่วยกระจายแรงกดทับในแนวตั้ง ทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นนั่นเอง

โดยเมื่อนำกากมันไปผ่านการผลิตเยื่อแบบต่างๆ จะพบว่า กากที่ผ่านการบดเยื่อที่ระดับ 350 มิลลิเมตร จะให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมากที่สุด รองลงมาคือกากต้มและกากบด 240 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการบดเยื่อนั้นจะทำให้เกิดการแยกย่อยของเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนเข้าร่วมในระบบ ส่งผลให้เส้นใยยังคงสภาพความแข็งแรงไว้ได้ระดับหนึ่งและมีเส้นใยขนาดเล็กในการช่วยกระจายแรงกดทับในแนวตั้งได้ ต่างจากกระบวนการต้มเยื่อที่ในระบบจะมีการใช้ความร้อนและสารเคมีร่วมด้วย ทำให้เส้นใยเกิดการอ่อนนิ่มลงไปมาก การรับแรงกดในแนวตั้งจึงทำได้ไม่ดีเท่าเส้นใยที่เกิดจากการบดเยื่อที่ระดับ

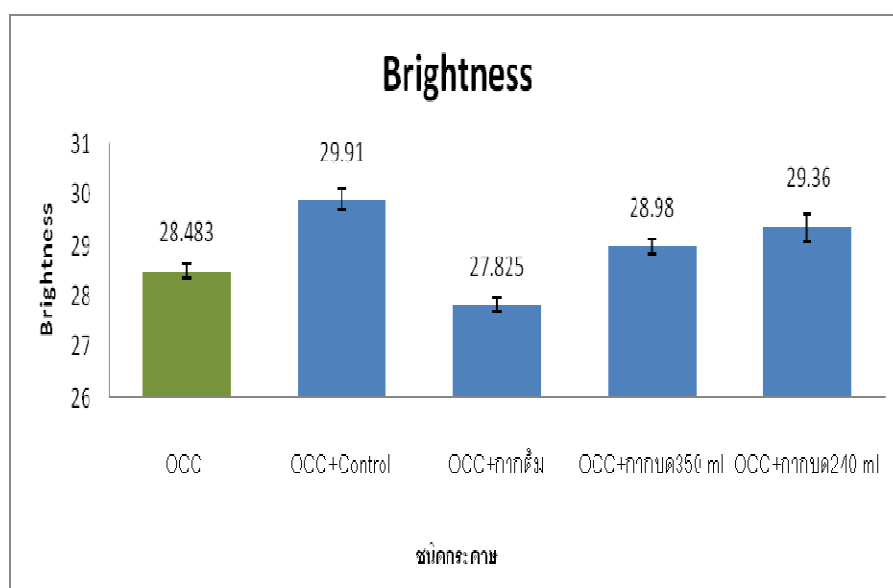
350 มิลลิลิตร อีกทั้งพื้นที่ผิวที่เกิดจากการบดเยื่อจะส่งผลให้การยึดติดของแป้งประจุบวกเกิดได้ดี ความแข็งแรงของกระดาษที่ได้จึงเพิ่มขึ้นอีกด้วย

แต่เมื่อนำไปทำการบดเยื่อที่ระดับ 240 มิลลิลิตร จะพบว่าค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนจะมีค่าเท่ากับกากมันปกติเลย นั่นแสดงว่าการบดเยื่อระดับนี้ไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษในการทนรับแรงกดในแนวตั้งได้ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากระดับการบดเยื่อที่สูงมากเกินไปจนทำให้เส้นใยสูญเสียสภาพไปและจะมีเส้นใยบางส่วนถูกตัดให้สั้นลงมาก นอกจากนี้ผนังเส้นใยจะถูกแยกย่อยออกมากจนทำให้ความแข็งแรงของตัวเส้นใยลดลง ทำให้ความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษมีค่าน้อยนั่นเอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ 0.479402 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.64355 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญแต่ประการใด

4.3.3.2 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ ได้แก่

- **ความขาวสว่าง** ทำการวัดค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-29

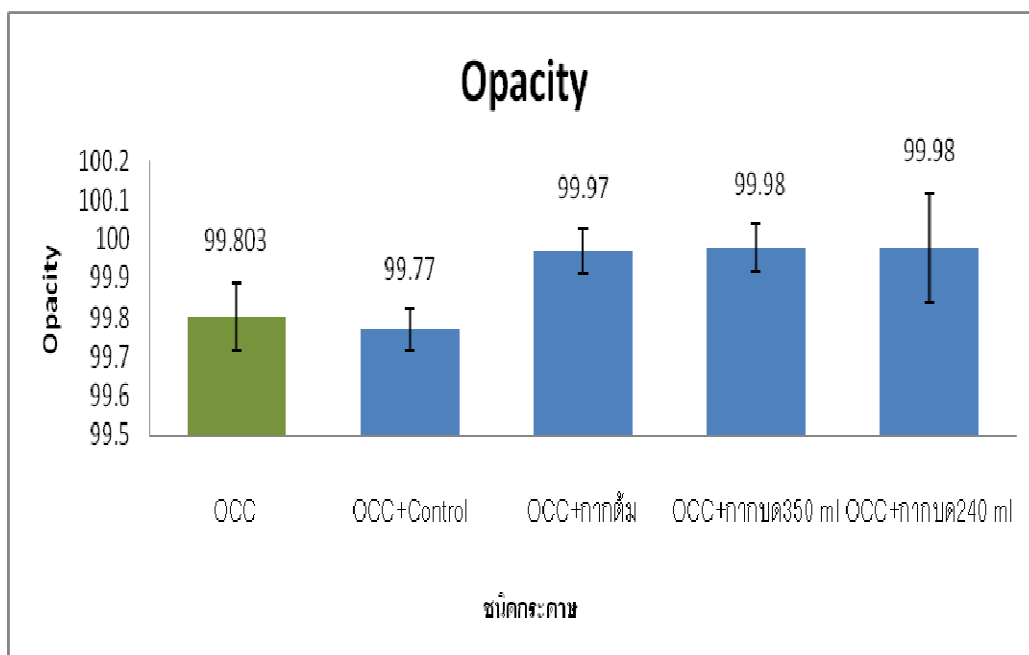


ภาพที่ 4-29 ความขาวสว่าง (Brightness) ของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-29 พบว่าการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปในกระดาศจะช่วยเพิ่มความขาวสว่างของกระดาศให้มากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเยื่อกล่องกระดาศถูกฟูกเก่าจะมีสีออกน้ำตาลเข้ม ซึ่งสีตามธรรมชาติของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการจัดแบ่งแล้วจะให้สีออกไปทางน้ำตาลอ่อน ดังนั้นเมื่อทำการเติมกากมันเข้าไปผสมในกระดาศ จึงให้ค่าความขาวสว่างของกระดาศที่มากกว่าเยื่อกล่องกระดาศถูกฟูกเก่า แต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อจะทำให้กระดาศที่ผลิตได้มีความขาวสว่างลดลง ที่เห็นได้ชัดเจนคือกากที่ผ่านการต้มเยื่อซึ่งในกระบวนการจะมีการใช้ต่างร่วมด้วย ดังนั้นกากมันที่ได้จึงมีสีเข้มขึ้นพอสมควรจากปฏิกิริยา Alkaline darkening ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับเยื่อไม้ได้ฟอกในช่วงที่มีการกำจัดลิกนินออกโดยใช้สภาวะที่มีด่างมากเกินไปทำให้เยื่อกลับมามีสีคล้ำ [45] ส่วนการบดเยื่อทั้ง 2 ระดับจะให้ค่าความขาวสว่างของกระดาศที่มากกว่าในกรณีของกากต้มและใกล้เคียงกับกากมันปกติมากกว่า นอกจากนี้การบดเยื่อจะเป็นการแยกย่อยเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ได้ดี และมีเส้นใยขนาดเล็กๆ เกิดขึ้นด้วย โดยเส้นใยเหล่านี้จะมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปบนแผ่นกระดาศ ทำให้สีของเส้นใยกากมันที่ปรากฏกลมกลืนไปกับสีของแผ่นกระดาศมากขึ้น เมื่อทำการสุ่มวัดค่าความขาวสว่างของแผ่นกระดาศในแต่ละจุด จึงได้ค่าที่ต่ำกว่ากระดาศที่ผลิตจากกากมันปกติและมีค่าใกล้เคียงกับกระดาศที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาศถูกฟูกเก่า แต่เมื่อทำการเพิ่มระดับการบดมากขึ้นจะมีเส้นใยขนาดเล็กๆ สูญหายไปบางส่วน จึงหลงเหลือเส้นใยขนาดใหญ่อยู่มากกว่ากระจายตัวอยู่ทั่วไปในแผ่นกระดาศ ส่งผลให้เมื่อทำการสุ่มวัดค่าความขาวสว่างของกระดาศ จึงได้ค่าที่ใกล้เคียงกับกากมันปกตินั่นเอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ $1.83E-12$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาศจะส่งผลต่อความขาวสว่างของกระดาศที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ $1.47E-10$ แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาศจะส่งผลต่อความขาวสว่างของกระดาศอย่างมีนัยสำคัญ

- **ความทึบแสง** ทำการวัดค่าความทึบแสงของกระดาศที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาศถูกฟูกเก่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-30 ความทึบแสง (Opacity) ของกระดาษชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4-30 พบว่าการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในเนื้อกระดาษจะทำให้กระดาษมีความทึบแสงลดลง เนื่องจากลักษณะของกากมันจะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จำนวนมาก ทำให้การกระเจิงแสงเกิดได้ไม่ดีเท่าเส้นใยจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าที่เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ และมีพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงมากกว่า ค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้จากกากมันจึงมีค่าต่ำกว่า โดยเมื่อนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่างๆ แล้วจะพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความทึบแสงให้เพิ่มสูงขึ้นได้หมด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการกระบวนการผลิตเยื่อจะทำให้เกิดการแยกย่อยเส้นใยออกมาเป็นเส้นเดี่ยวๆ ได้มาก จึงมีพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงเพิ่มขึ้นจากเดิม ส่งผลให้ค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้มากกว่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากกากมันปกตินั่นเอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความทึบแสงที่ได้จากกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อแต่ละแบบจะพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการต้มเยื่อจะสามารถทำให้เส้นใยแยกย่อยออกมาได้มาก เพิ่มพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงได้มาก ค่าความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าสูงในส่วนของกระดาษบดเยื่อนั้นแม้ว่าจะมีความสามารถในการแยกย่อยเส้นใยได้ไม่เท่ากับการต้มเยื่อ แต่ในกระบวนการบดนั้นจะทำให้เกิดเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นกระดาษบดเยื่อระดับใดก็ตาม ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ค่าความทึบแสงของกระดาษที่วัดได้จากกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีความใกล้เคียงกัน

ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ 0.000582 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.001942 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะส่งผลต่อความทึบแสงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

4.3.3.3 สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษ ได้แก่

- **ความดำ** ทำการวัดค่าความดำเฉลี่ยบริเวณพื้นตายของงานพิมพ์บนกระดาษที่ผลิตขึ้นจากเยื่อผสมและเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่า โดยกำหนดภาวะการพิมพ์ภาพบริเวณพื้นตายด้วยความละเอียดของลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์ (Ink anilox resolution) ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 140 l/cm (เส้นต่อเซนติเมตร) 100 l/cm 80 l/cm และ 60 l/cm ตามลำดับ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ค่าความดำ (Print density) เฉลี่ยบริเวณพื้นตายของงานพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยความละเอียดของลูกกลิ้งแอนนิลอกซ์ (Ink anilox resolution) 4 ระดับ บนกระดาษที่ผลิตขึ้น

ชนิดกระดาษ	ค่าเฉลี่ยความดำบริเวณพื้นตาย (Average print density of solid area)			
	Ink resolution 140 l/cm	Ink resolution 100 l/cm	Ink resolution 80 l/cm	Ink resolution 60 l/cm
OCC	1.168±0.014	1.384±0.018	1.475±0.003	1.520±0.007
OCC+Control	1.143±0.004	1.356±0.010	1.463±0.006	1.513±0.014
OCC+กากต้ม	1.127±0.016	1.357±0.005	1.462±0.010	1.513±0.007
OCC+กากบด 350 ml	1.128±0.021	1.340±0.014	1.459±0.006	1.496±0.011
OCC+กากบด 240 ml	1.118±0.017	1.353±0.010	1.452±0.007	1.498±0.008

จากตารางที่ 4-6 จะสังเกตเห็นว่าความละเอียดของแอนนิลอกซ์ที่ใช้จะบ่งบอกถึงระดับความดำของงานพิมพ์ โดยแอนนิลอกซ์ที่มีความละเอียดมากจะมีปริมาตรหมึกลงบนกระดาษน้อย ค่าความดำที่วัดได้จากงานพิมพ์จึงน้อยตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความดำเฉลี่ยที่วัดได้จากบริเวณพื้นตายบนกระดาษพิมพ์แต่ละชนิดพบว่า

- ที่ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ 140 l/cm ซึ่งมีปริมาตรหมึกน้อยที่สุด เมื่อทำการวัดค่าความดำจากกระดาษพิมพ์แต่ละชนิดพบว่า ความดำจากแผ่นพิมพ์ที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าจะให้ค่าความดำมากที่สุด เนื่องจากกระดาษมีความเรียบสูงและมีการดูดซึมน้ำได้น้อย ทำให้เกิดการรับหมึกได้ดี หมึกกองเป็นชั้นฟิล์มอยู่บนผิวกระดาษไม่ค่อยซึมลงไป ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนหมึกได้อย่างสมบูรณ์ ค่าความดำของแผ่นพิมพ์ที่วัดได้จึงมีค่ามาก เมื่อมีการเติมกากมันเข้าไปในกระดาษจะทำให้ความดำของแผ่นพิมพ์ลดลงเนื่องจากกากมันสำปะหลังจะมีสมบัติการดูดซึมน้ำได้มาก หมึกจึงซึมเข้าสู่เนื้อกระดาษเยื่อ ทำให้งานพิมพ์ที่ได้มีสีซีดจางกว่า อีกทั้งความเรียบของกระดาษที่ได้จะมีค่าน้อยเนื่องจากกลุ่มก้อนกากมัน ทำให้การรับหมึกหรือการถ่ายโอนหมึกเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นค่าความดำของงานพิมพ์ที่วัดได้จึงมีค่าต่ำลง โดยเมื่อนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อจะให้ค่าความดำที่ลดลงจากกากมันปกติทั้งที่ตัวกากมันหลังผ่านการผลิตเยื่อแล้วจะให้ค่าความเรียบของกระดาษที่ดีขึ้นและค่าการดูดซึมน้ำลดลง ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะส่งผลให้ได้ค่าความดำของงานพิมพ์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการวัดความดำแล้วกลับพบว่าได้ผลตรงกันข้าม ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากสมบัติกระดาษในด้านความหนา ซึ่งตามหลักการแล้วกระดาษที่มีความหนามากจะทำให้แรงกดพิมพ์สูง หมึกถ่ายโอนได้ดี ค่าความดำที่วัดได้จะมีค่าสูง ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้กระดาษที่ผลิตจากกากมันปกติให้ค่าความดำที่มากกว่ากระดาษที่ผลิตจากกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อเพราะยังมีปริมาณก้อนกากมันอยู่มากทำให้ได้กระดาษที่มีความหนามากกว่านั่นเอง เมื่อพิจารณาในส่วนของกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อแต่ละแบบพบว่าค่าความหนาของแผ่นกระดาษค่อนข้างใกล้เคียงกันเนื่องจากก้อนกากมันเริ่มแยกย่อยเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ค่อนข้างมากแล้ว ดังนั้นสมบัติทางด้านความหนาจึงไม่ค่อยส่งผลในส่วนนี้ โดยเมื่อทำการวัดค่าความดำของแผ่นพิมพ์ที่ได้พบว่ากระดาษที่ผลิตจากกากบด 350 มิลลิเมตรจะให้ค่าความดำมากที่สุด รองลงมาคือกากต้มและกากบด 240 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นกระดาษ ซึ่งกากบด 240 มิลลิเมตรจะให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษมากที่สุด หมึกจึงซึมลงสู่กระดาษได้มาก สีที่ปรากฏบนแผ่นกระดาษจึงซีดจางกว่าปกติ ค่าความดำที่วัดได้จึงน้อยที่สุด ส่วนกากต้มและกากบด 350 มิลลิเมตรจะให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกันมาก จึงส่งผลให้ค่าความดำบนงานพิมพ์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน

- ที่ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ 100 l/cm พบว่าปริมาตรหมึกที่ลงบนกระดาษพิมพ์จะมีมากขึ้น ค่าความดำที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อสังเกตจากแนวโน้มของค่าความดำที่ปรากฏบนแผ่นพิมพ์แล้วน่าจะเป็นผลมาจากสมบัติทางด้านความเรียบของกระดาษเป็นสำคัญ ซึ่งกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าจะให้ค่าความดำมากที่สุด รองลงมาคือกากต้ม กากมันปกติ กากบด 240 มิลลิเมตรและกากบด 350 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่

การที่กระดาษซึ่งผลิตจากกากมันปอกติมีค่าความดำมากกว่ากากมันที่ผ่านการผลิตตัวอื่นๆ น่าจะเป็นผลมาจากความหนาของแผ่นกระดาษที่เกิดจากกลุ่มก้อนกากมันที่ยังมีอยู่ในปริมาณมาก ทำให้ค่าความดำของแผ่นกระดาษที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

- ที่ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลลอร์ท 80 l/cm พบว่าค่าความดำที่วัดได้จากแผ่นพิมพ์ที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าจะมีค่าสูงสุด รองลงมาจะเป็นกระดาษพิมพ์ในกลุ่มที่เติมกากมันสำปะหลังแบบต่างๆ ลงไป ซึ่งในที่นี้จะให้ค่าความดำบนงานพิมพ์ที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าเมื่อทำการพิมพ์ด้วยปริมาตรหมึกพิมพ์ที่สูงถึงระดับหนึ่งแล้ว หมึกพิมพ์จะสามารถซึมเข้าสู่เนื้อกระดาษได้อย่างเต็มที่และความหนาของชั้นฟิล์มหมึกที่กองอยู่บนผิวหน้ากระดาษมีความหนาจนปิดผิวกระดาษได้สนิทไม่สามารถมองเห็นทะลุเนื้อกระดาษลงไปได้แล้ว ความหนาของชั้นฟิล์มหมึกจะไม่มีผลต่อค่าความดำอีกต่อไป ค่าความดำที่วัดได้จะคงที่ถือเป็นค่าความดำสูงสุดของหมึกพิมพ์นั้นแล้ว

- ที่ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลลอร์ท 60 l/cm พบว่าค่าความดำที่วัดได้จากแผ่นพิมพ์จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับที่ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลลอร์ทที่ 80 l/cm นั่นคือกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าจะมีค่าความดำที่วัดได้สูงสุด รองลงมาจะเป็นกระดาษพิมพ์ที่ทำการเติมด้วยกากมันสำปะหลังในแบบต่างๆ ซึ่งจะให้ค่าความดำบนงานพิมพ์ที่วัดได้ใกล้เคียงกันมาก ด้วยเหตุผลดังที่สรุปมาแล้วในข้างต้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของเยื่อแต่ละภาวะมีค่าเท่ากับ 0.998735 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาษจะไม่ส่งผลกระทบต่อความดำบนงานพิมพ์ของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญและเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ค่า P-value ของกากแต่ละภาวะจะมีค่าเท่ากับ 0.999257 แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดกากที่ใช้ผลิตกระดาษจะไม่ส่งผลกระทบต่อความดำบนงานพิมพ์ของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

4.3.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยดูได้จากค่า P-value เป็นหลัก หากค่านี้ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยที่กำลังพิจารณาส่งผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยและสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งค่าที่ได้ต่ำกว่า 0.05 มากๆ แสดงว่าปัจจัยนั้นจะยิ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญมากยิ่งขึ้น แต่หากพบว่าค่า P-value ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า

ปัจจัยนั้นไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ที่กำลังพิจารณาอยู่อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติของการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาศและการเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาศต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยและสมบัติของกระดาศ จะแสดงดังตารางที่ 4-7 และ 4-8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาศและการเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาศต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยโดยวิธี ANOVA แบบ single factor

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย	การเปลี่ยนชนิดเยื่อ	การเปลี่ยนชนิดกาก
	P-value	P-value
1.ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.000472*	0.001511*
2.ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	0.000193*	0.000731*
3.ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.000115*	0.88584
4.ดัชนีความหักงอของเส้นใย	0.000734*	0.034625*
5.ปริมาณกระจุกเส้นใย	1.64E-06*	0.002083*
6.ความกว้างของเส้นใย	5.99E-07*	0.111847

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$)

ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการเติมกากมันสำปะหลังเข้าไปผสมในกระดาศและการเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาศต่อสมบัติกระดาศที่ผลิตขึ้นโดยวิธี ANOVA แบบ single factor

สมบัติของกระดาศ	การเปลี่ยนชนิดเยื่อ	การเปลี่ยนชนิดกาก
	P-value	P-value
1. ความหนาแน่น	2.93E-08*	5.49E-05*
2. ความเรียบ	3.62E-18*	1.32E-11*
3. ความต้านทานการซึมอากาศ	5.11E-12*	8.9E-10*
4. ความแข็งแรงต่อแรงดึง	9.43E-06*	0.000926*
5. ความต้านทานแรงฉีก	0.021327*	0.009861*
6. ความแข็งตึง	0.229515	0.214861
7. การดูดซึมน้ำ	6.99E-06*	0.044049*
8 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	8.51E-10*	1.66E-06*
9. ความต้านทานแรงกดวงแหวน	0.479402	0.64355
10.ความขาวสว่าง	1.83E-12*	1.47E-10*
11.ความทึบแสง	0.000582*	0.001942*
12.ความดำของงานพิมพ์	0.998735	0.999257

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$)

จากรายการที่ 4-7 และ 4-8 สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนชนิดเยื่อที่ใช้ผลิตกระดาศจะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยและสมบัติกระดาศโดยตรง มีเพียงความแข็งตึงของกระดาศ ความต้านทานแรงกดวงแหวนและค่าความดำของงานพิมพ์บนกระดาศเท่านั้นที่ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาศจะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยเกือบทุกอย่าง ยกเว้นดัชนีความโค้งงอและความกว้างของเส้นใย อีกทั้งยังส่งผลต่อสมบัติกระดาศเกือบทุกแง่ มีเพียงความแข็งตึงของกระดาศ ความต้านทานแรงกดวงแหวนและค่าความดำของงานพิมพ์บนกระดาศเท่านั้นที่ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่ของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยใน ส่วนของเยื่อเชิงเคมีและเยื่อเชิงกลที่ผลิตได้เปรียบเทียบกันพบว่า เส้นใยที่ได้จากกากมันสำปะหลัง ที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะสามารถลดปริมาณกระจุกเส้นใยซึ่งเป็นปัญหาหลักใน งานวิจัยนี้ไปได้มากกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล นอกจากนี้จะมีผลทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะ ความกว้าง ความยาวและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่มากกว่าการผลิตเยื่อเชิงกลอีกด้วย และเมื่อ พิจารณาในแง่ของสมบัติต่างๆ พบว่าเยื่อเชิงเคมีโดยส่วนใหญ่แล้วจะให้สมบัติทางกายภาพของ กระดาษที่ดีกว่าเยื่อเชิงกล แต่ในส่วนของสมบัติเชิงแสงของกระดาษนั้นเยื่อเชิงเคมีจะยังไม่ สามารถเทียบเท่าเยื่อเชิงกลได้ เนื่องจากในกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะมีการใช้ต่าง เป็นเหตุให้ เยื่อกากมันที่ผลิตได้มีสีค่อนข้างคล้ำ ดังนั้นกระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าความขาวสว่างต่ำ อีกทั้งใน กระบวนการผลิตเส้นใยจะไม่มีโอกาสถูกตัดให้สั้นลงเหมือนในกรณีของเยื่อเชิงกล ดังนั้นสมบัติ ทางด้านความทึบแสงที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าเยื่อเชิงกลที่มีปริมาณเส้นใยสั้นอยู่เยอะ พื้นที่ผิวในการ กระเจิงแสงจึงมีมากกว่านั่นเอง นอกจากนี้เมื่อสังเกตุดูค่าความดำของงานพิมพ์ที่วัดได้บน แผ่นกระดาษจะพบว่าหากนำกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อเชิงเคมีไปผสมในกระดาษแล้วนำไปพิมพ์ จะทำให้ได้งานพิมพ์ที่มีค่าความดำสูงกว่าแผ่นพิมพ์ที่ผสมด้วยเยื่อเชิงกล ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าว มาแล้วในข้างต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการหาชนิดสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ขจัดแป้งออก

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยแต่ละส่วน พบว่ากากส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 25 เมช และส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 50 เมช เส้นใยจะยังคงเกาะกันเป็นแผงและมีกลุ่มก้อนเส้นใยอยู่จำนวนมาก ส่วนกากมันที่ลอดผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช จะมีลักษณะเส้นใยที่เล็กและละเอียด มีพารามิเตอร์กระจายอยู่ทั่วไป ทั้งนี้ยังพบลักษณะของเม็ดแป้งอยู่ภายในกากมันแต่ละส่วนอีกด้วย โดยภายหลังจากการนำไปวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีของเส้นใยกากมันสำปะหลังที่ผ่านขั้นตอนการขจัดแป้งแล้วพบว่าไม่ส่งผลต่อเส้นใยแต่อย่างใด

การเติมกากมันเข้าไปผสมในกระดาศจะทำให้สมบัติกระดาศที่ได้แย่งลงและยังทำการเพิ่มสัดส่วนกากมากขึ้นสมบัติกระดาศที่ได้จะยิ่งลดลงมากขึ้น แต่เมื่อนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเชิงเคมีแล้วจะทำให้สมบัติทางกายภาพของกระดาศต่างๆ มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากมันที่ผ่านการผลิตเชื้อเชิงเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้สมบัติทางกายภาพของกระดาศที่ดีที่สุด

5.1.2 ผลการหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อด้วยวิธีเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการขจัดแป้ง

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยและสมบัติทางกายภาพของกระดาศที่ผลิตขึ้น สรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชื้อคือภาวะที่ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากให้ผลผลิตเชื้อที่ได้มีค่าสูงโดยที่ยังสามารถผลิตกระดาศที่ให้ความต้านทานการซึมอากาศ ความต้านทานแรงฉีก ความหนาแน่น ความเรียบและเหนือสิ่งอื่นใดจะให้กระดาศที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุด ทั้งนี้ค่าความแข็งแรงที่ได้ยังสามารถสูงเทียบเคียงกระดาศที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นอีกด้วย โดยสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญอย่างมากต่อการผลิตกระดาศแข็งประกอบลูกฟูกที่ต้องการความแข็งแรงมากพอในการทำเป็นบรรจุภัณฑ์

เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตเยื่อต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยรวมถึงสมบัติเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยกากมันสำปะหลังพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่างๆ มากที่สุด คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อเนื่องจากความร้อนจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อและการอ่อนตัวของเส้นใย ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจะไม่ส่งผลต่อความยาวเส้นใย และอาจส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อดัชนีความโค้งงอและดัชนีความหักงอของเส้นใยที่เกิดขึ้นในระบบ

ส่วนความเข้มข้นจะส่งผลต่อสมบัติเยื่อและกระดาษแค่บางประการเท่านั้น ที่เห็นได้ชัดคือ ปริมาณต่างที่ตกค้างในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อที่จะใช้เป็นตัวกำหนดปริมาณที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ความกว้างของเส้นใยที่เป็นผลมาจากการดูดซึมต่างเข้าไปทำให้เกิดการบวมตัวขึ้น เกิดการดูดตามรุกรุนกระดาษได้ดี ส่งผลต่อสมบัติด้านความต้านทานการซึมอากาศ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อปริมาณระจุกเส้นใยที่สามารถลดลงเนื่องจากการใช้ต่างจะช่วยแยกย่อยเส้นใยได้ดีขึ้น ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในระบบมีจำนวนมาก ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่มากขึ้นนั่นเอง

เมื่อพิจารณาในแง่ของเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะพบว่าแทบไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติเยื่อและกระดาษรวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยแต่ประการใด นอกจากนี้หากพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 3 ตัวแล้วจะพบว่าไม่ค่อยส่งผลต่อสมบัติเยื่อและสัณฐานวิทยาของเส้นใยเท่าไรนัก

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบการผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลของกากมันสำปะหลังที่จัดแบ่งแล้ว

จากการพิจารณาในแง่ของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพบว่า เส้นใยกากมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีจะสามารถลดปริมาณระจุกเส้นใยซึ่งเป็นปัญหาหลักในงานวิจัยนี้ไปได้มากกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล อีกทั้งความกว้าง ความยาว และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ได้จะมีมากกว่าการผลิตเยื่อเชิงกลอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อมองในภาพรวมจะพบว่าเยื่อเชิงเคมีจะให้สมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ดีกว่าเยื่อเชิงกล ในส่วนของสมบัติเชิงแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงเคมีนั้นยังไม่สามารถเทียบเท่าเยื่อเชิงกลได้ เนื่องจากเยื่อกากมันที่ผลิตได้จะมีสีค่อนข้างคล้ำ ซึ่งเป็นผลจากการใช้ต่างในกระบวนการผลิตเยื่อ ดังนั้นกระดาษที่ผลิตได้จึงมีค่าความขาวสว่างต่ำ ส่วนสมบัติทางด้านความทึบแสงที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าเยื่อเชิงกล

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่าความต่ำจากงานพิมพ์บนแผ่นกระดาษที่ผลิตได้จากการใช้ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ทั้ง 4 ระดับพบว่า หากใช้ความละเอียดลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์สูงๆ ปริมาตรหมึกที่ลงบนงานพิมพ์จะยิ่งน้อย และเมื่อมองในภาพรวมจะสังเกตเห็นว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าโดยไม่ผสมกากจะให้ค่าความต่ำมากที่สุด แต่เมื่อทำการเติมกากมันเข้าไปในกระดาษจะเป็นผลให้ค่าความต่ำของแผ่นพิมพ์ที่วัดได้มีค่าลดลง

เมื่อนำกากมันไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อจะให้ค่าความต่ำที่ลดลงจากกากมันปกติซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติกระดาษในด้านความหนา ยิ่งกระดาษหนามาก ค่าความต่ำที่วัดได้จะมีค่าสูง ส่วนกากมันที่ผ่านการผลิตเยื่อแต่ละแบบพบว่าค่าความต่ำบนงานพิมพ์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความหนา ความเรียบและค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ค่าความต่ำที่วัดได้แทบไม่แตกต่างกันนั่นเอง ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น นำไปสู่บทสรุปที่ว่าเยื่อเชิงเคมีจะมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานสำหรับการปรับสภาพกากมันสำหรับเพื่อผลิตแผ่นกระดาษมากกว่าเยื่อเชิงกล

ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า การเติมกากมันสำหรับเพื่อเข้าไปผสมในกระดาษและการเปลี่ยนชนิดกากมันในกระดาษจะส่งผลต่อลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเส้นใยและสมบัติกระดาษที่ผลิตได้โดยตรง มีเพียงความแข็งตึงของกระดาษ ความต้านทานแรงกดวงแหวนและค่าความต่ำของงานพิมพ์บนกระดาษเท่านั้นที่ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การขจัดแป้งช่วยให้คุณภาพกระดาษดีขึ้น แต่ผลผลิตที่ได้หายไปพอสมควร นอกจากนี้ในกระบวนการขจัดแป้งนั้นมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้มาก เนื่องจากการตรวจสอบปริมาณแป้งที่เหลืออยู่ในกากด้วยไอโอดีนจะทำได้แค่เพียงสุ่มกากที่ขจัดแป้งแล้วบางส่วนมาทำการตรวจสอบเท่านั้น ซึ่งอาจจะมีบางจุดที่ยังสกัดไม่หมด แต่ไม่ได้ทำการสุ่มออกมาจึงอาจส่งผลให้หลงเหลือแป้งอยู่ในกากจนไปมีผลต่อกระบวนการผลิตเยื่อได้ ดังนั้นควรหาวิธีการตรวจสอบแป้งที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพกว่านี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง แม่นยำและเชื่อถือได้สำหรับงานวิจัยต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว, **มันสำปะหลัง**, [ออนไลน์], 2523, แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK5/chapter4/t5-4-m.htm> [2554, มิถุนายน, 20]
- [2] **Cassava** [online], Available from: <http://cassava.thport.com/> [2011, June 22]
- [3] ศูนย์รวมข้อมูลอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย, **การแปรรูป และการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง**, [ออนไลน์], 2538, แหล่งที่มา: <http://www.thailandtapiocastarch.net/download/download-th-17.pdf> [2554, มิถุนายน 23]
- [4] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, **เทคโนโลยีของแป้ง**, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [5] **Cassava tuber cross-section** [online], 2011, Available from: http://www.uq.edu.au/_School_Science_Lessons/64.7.1.GIF [2011, June 24]
- [6] Grace, M. R., "Cassava Starch and its Use", In **Cassava Processing**, Rome: FAO Consultant, 1977.
- [7] สาวิตร ตระกูลนำเลื่อมใส, **การเลี้ยงเชื้อ Rhodopseudomonas gelatinosa จากกากมันสำปะหลังเพื่อเป็นอาหารปลาและเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงและคุณค่าทางโภชนาการโดยเลี้ยงผสมกับเชื้อ Rhodopseudomonas sphaeroides**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2530.
- [8] ศูนย์รวมข้อมูลอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย, **การบำบัด และใช้ประโยชน์จากรากเหง้า กากมัน**, [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/2/1/> [2554, มิถุนายน 29]
- [9] Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., Soccol, V. T., Vandenberghe, L. P. S.,

- and Mohan, R., "Biotechnological potential of agro-industrial residue II: Cassava Bagasse", **Bioresource Technology**, 74 (2000): 81-87.
- [10] Seymour, R. B., **Introduction to Polymer Chemistry**, New York: McGraw-Hill Kogakusha, 1971.
- [11] Dziedzic, S. Z., and Kearsley M. W., **Glucose syrups: Science and technology**, New York: Elsevier Science, 1984.
- [12] สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, **การสกัดแป้งจากหัวมันสำปะหลัง**, [ออนไลน์], 2542, แหล่งที่มา: <http://www.kmutt.ac.th/rippc/prog17t.htm> [2554, มิถุนายน 30]
- [13] **Cassava Starch Granule SEM** [online], Available from: http://www.visualphotos.com/image/1x8467162/cassava_starch_granules_sem [2011, June 30]
- [14] Paul, P. C., and Palmer, H. H., "Starch and Polysaccharides", **Food Theory and Applications**, New York: John Wiley & Sons, 1972.
- [15] **Amylose** [online], Available from: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html> [2011, June 30]
- [16] Atkinson, B., and Mavituna, F., **Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook**, 2nd ed, New York: M stock Press, 1991.
- [17] Kerr, R. W., **Chemistry and Industrial of Starch**, 2nd ed, New York: Academic Press, 1950.
- [18] **Amylopectin** [online], Available from: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_1.html [2011, June 30]
- [19] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), **กระบวนการผลิตเอทานอล**, [ออนไลน์], 2553, แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?passTo=9c0fff4473cb4c1fbb608682c402f670&pageid=5&bookID=1619&read=true&count=true [2554, มิถุนายน 30]
- [20] Adam, M., "Amylase: their kinds and properties and factors which influence

their activity”, *Food technology*, 7 (1953): 35-38.

- [21] Reed, G., and Underkofler, L. A., *Enzyme in food processing*, New York: Academic Press, 1966.
- [22] ศูนย์บริการเอกสารการวิจัยแห่งประเทศไทย, **การใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์**, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร, 2526.
- [23] สำนักงานคณะกรรมการกำกับและส่งเสริมการประกอบธุรกิจหลักทรัพย์, **การใช้ประโยชน์และผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง**, [ออนไลน์], 2550, แหล่งที่มา: http://www.aftc.or.th/itc/products_analyze.php?id=81&fgpr_id=6&fmnu_id=28 [2554, มิถุนายน 30]
- [24] Biermann, C.J., *Essential of Pulping and Papermaking*, San Diego: Academic Press, 1993.
- [25] Sjöström, E., and Alén, R., *Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking*, Berlin: Springer-verlag, 1999.
- [26] Roberts, J. C., *The Chemistry of Paper*, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [27] Casey, J. P., *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*, 3rd ed, Vol. I, New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [28] บริษัทสุพรีมพรีนซ์, **องค์ประกอบของกระดาษ**, [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.supremeprint.net/index.php?lay=show&ac=article&id=538770933> [2554, กรกฎาคม 2]
- [29] Marton, J., *Paper chemistry*, 2nd ed, London: Chapman & Hall, 1997.
- [30] Hubbe, M. A., *Emerging technologies in wet-end chemistry*, Leatherhead: Pira International, 2005.
- [31] Maurer, H. W., *Starch and starch products in surface sizing and paper coating*, p. 170, Atlanta: TAPPI Press, 2001.
- [32] Hubbard, E. D., Liberty, W., Harty, D. R., and Hogen, L. M., *Starch phosphate and amphoteric starch phosphate*, **U.S patent: US 4 5669 10**, 1986.
- [33] Kline, J. E., *Paper and paperboard manufacturing and converting fundamentals*, 2nd ed, San Francisco: Miller Freeman Publications, 1991.

- [34] Gullichsen, J., and Paulapuro, H., **Papermaking Science and Technology: Chemical Pulping Book 6A**, Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.
- [35] Hari G., MS, P. Eng., **Fiber Internal Structure** [online], 1999, Available from: <http://www.paperonweb.com/dict11.htm> [2011, July 2]
- [36] Smook, G. A., **Handbook for Pulp & Paper technologists**, 2nd ed., Vancouver: Angus Wilde, 1994.
- [37] Sjöström, E., **Wood Chemistry: Fundamentals and Applications**, London: Academic Press, 1992.
- [38] McGinnis, G. D., "Cellulose and Hemicellulose", In J. P. Casey ed., **Pulp And Paper Chemistry and Chemical Technology**, New York: Wiley-Interscience, 1980.
- [39] Museum of Fine Arts, Boston, **Cellulose** [online], 2009, Available from: <http://cameo.mfa.org/browse/record.asp?subkey=1933> [2011, July 3]
- [40] The Louisiana State University Agricultural Center, **Structure of the Lignin Molecule** [online], 2011, Available from: http://www.lsuagcenter.com/en/our_offices/departments/Audubon_Sugar_Institute/news/potential+market+for+biorefinery+lignin.htm [2011, July 3]
- [41] Sixta, H., **Handbook of Pulp**, Vol. II, Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [42] Biermann, C.J., **Handbook of Pulping and Papermaking**, 2nd ed., New York: Academic Press, 1996.
- [43] Smook, G. A., **Handbook of Pulp & Paper Technologists**, 3rd ed., Vancouver, BC: Angus Wilde Publications, 2002.
- [44] Smook, G. A., **Handbook for Pulp & Paper technologists**, 2nd ed., Vancouver, BC: Angus Wilde Publication, 1996.
- [45] Sjöström, E., **Wood Chemistry: Fundamentals and Applications**, 2nd ed., San Diego, CA: Academic Press, 1993.
- [46] Jonson, G., **Corrugated Board Packaging**, Leatherhead: Pira International, 1991.

- [47] บริษัทที่แอนด์ทีพีเคเค็จ้จั้ง, **กระดาษลูกฟูก**, [ออนไลน์], แหล่งที่มา:
<http://www.thaipaperbox.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=201706> [2554, กรกฎาคม 4]
- [48] Kiviranta, A., "Paper and board grades", **Papermaking science and technology a series of 19 books**, Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.
- [49] Anthony, W., **High quality flexography**, Leatherhead: Pira international, 1992.
- [50] Dykes, Y., **Flexography: Principle and practices**, 5th ed., Ronkonkoma: Foundation of Flexographic Technical Association, 1999.
- [51] Michals, **Everyday Printing Problems and How to Keep Your Press Running**, New York: Foundation of Flexographic Technical Association, 1988.
- [52] อรัญ หาญสืบสาย, **ระบบการพิมพ์แบบต่างๆ และการนำไปใช้**, กรุงเทพมหานคร: เพาเวอร์พริ้นท์, 2545.
- [53] Printers' National Environmental Assistance Center, **Flexographic Printing** [online], 1995, Available from:
<http://www.pneac.org/printprocesses/flexography/> [2011, July 5]
- [54] Eldred, N., **What the Printer Should know about Ink**, Pennsylvania: Graphic art Technical foundation, 1990.
- [55] Roffey, C. G., **Photopolymerization of surface coatings**, New York: Wiley-Interscience, 1982.
- [56] อรัญ หาญสืบสาย และพรทวิ พึ่งรัศมี, **สารความรู้เรื่องกระดาษพิมพ์**, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ด้านสุทธาการพิมพ์, 2537.
- [57] Pirkko, O., and Hannu, S., **Papermaking Science and Technology**, Jyväskylä: Gummerus Oly, 1998.
- [58] Centasia Co., Ltd., **การสื่อสารสีอย่างแม่นยำ การควบคุมสีจากการรับรู้ไปสู่อุปกรณ์การวัดสี**, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ทรีนิตี้, ม.ป.ป.
- [59] อรัญ หาญสืบสาย, **มาตรฐานการพิมพ์ออฟเซต แนวคิดและวิธีการ**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, 2547.
- [60] Kipphan, H., **Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods**, Heidelberg, Germany: Springer, 2001.
- [61] Hearle, J.W.S., **Polymers and their properties**, Vol. 1, Fundamentals of structure

and Mechanics, New York: Ellis Horwood Ltd., 1982.

- [62] IGT Testing Systems, **IGT F1 Printability Tester for Flexo and Gravure Inks** [online], 2002, Available from:
<http://www.igt.nl/gb/awm/bestanden/products/f1-uk.pdf> [2011, July 6]
- [63] Ihara Electronic Industries Co., Ltd., **R730, R730P Color Reflection Densitometers** [online], Available from:
http://www.ihara-us.com/products/prod_densitometer_r730.html [2011, July 7]
- [64] Matsui, K.N., Larotonda, F.D.S., Paes, S.S, Luiz, D.B., Pires, A.T.N., and Laurindo, J.B., "Cassava bagasse–Kraft paper composites: analysis of influence of impregnation with starch acetate on tensile strength and water absorption properties", *Carbohydrate Polymers*, 55 (2004): 237-243.
- [65] สาวิตรี พิสุทธิพิเชษฐ, **การใช้กากมันสำปะหลังทดแทนเยื่อกระดาษจากกล่องกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้วเพื่อผลิตกระดาษลอนลูกฟูก**, รายงานบริการวิชาการ, ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [66] ศุภลักษณ์ ไชยสถานนท์, **การใช้กากมันสำปะหลังเพื่อทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [67] Jiménez, L., Pérez, I., de la Torre, M.J., and García, J.C., "The effect of processing variables on the soda pulping of olive tree wood", *Bioresource Technology*, 69 (1999): 95-102.
- [68] Gümüşkaya, E. and Usta, M., "Dependence of chemical and crystalline structure of alkali sulfite pulp on cooking temperature and time", *Carbohydrate Polymers*, 65 (2006): 461-468.
- [69] Adirondack Machine Corporation, **Laboratory Pulper** [online], Available from:
<http://www.adirondackmachine.com/450hpulp.html> [2011, July 14]
- [70] Browning, B.L. **Methods of Wood Chemistry**, Vol. 2, New York: Wiley-Interscience, 1967.

- [71] Technical Association of the Pulp and Paper Industry, **TAPPI Test Methods**, TAPPI Press, Atlanta, 2002-2003.
- [72] ISO technical committees, **International Organization for Standardization**, Geneva, Switzerland, 2003.
- [73] Scandinavian Pulp, Paper and Board testing committees, **the SCAN test method**, Stockholm, Sweden, 1994.
- [74] Technology Trade Consulting Inc., **Fiber Quality Analysis** [online], 1993, Available from: http://ttcinc.ca/about_us.html [2011, July 16]
- [75] เขมรศมี คงดี และอิงเสียง ยิ้มฤทัย, **การผลิตกระดาษแข็งประเภทลูกฟูกจากเยื่อปาล์มน้ำมัน**, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [76] YMN Technology And Service Co., Ltd., **คุณสมบัติสำหรับกระดาษทำกล่องลูกฟูก**, [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://ymnsupply.com/index.php?option=com_content&view=article&id=104:2011-02-01-02-58-26&catid=41:academic&Itemid=159&lang=en%E0%B8%83 [2554, กรกฎาคม 20]
- [77] พรปนิธานแพ็ค, **การทดสอบกระดาษลูกฟูก**, [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.pt-pack.com/> [2554, กรกฎาคม 22]

ภาคผนวก

การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและการเตรียมเยื่อ

1. วิธีการหาความชื้นของกากมันสำปะหลัง

นำกากมันสำปะหลังมาทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบพร้อมบันทึกค่าไว้จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำกากมันสำปะหลังออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของกากมันสำปะหลัง ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นของกากมันสำปะหลัง (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักกากมันก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกากมันหลังอบ}}{\text{น้ำหนักกากมันก่อนอบ}} \times 100$$

2. วิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ

ยกตัวอย่างของภาวะที่มีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ต้องการกากมันสำปะหลัง 25 กรัมแห้ง โดยมีความชื้นร้อยละ 86.3 และในการต้มเยื่อกำหนดให้มีค่าของเหลวต่อน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (L: W) เป็น 16 ต่อ 1

- หาน้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ต้องชั่ง จากความชื้นร้อยละ 86.3

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง} &= 100 - 86.3 = 13.7 \text{ กรัม} \text{ จะต้องชั่งเยื่อมา } 100 \text{ กรัม} \\ \text{ถ้าน้ำหนักกากมันแห้ง } 25 \text{ กรัม} & \text{ จะต้องชั่งเยื่อมา } (25 \times 100) / 13.7 = 182.48 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

- หาอัตราส่วนปริมาณของเหลวทั้งหมด จากค่า L: W = 16:1

น้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้งที่ต้องการคือ 25 กรัม ดังนั้นปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ $16 \times 25 = 400$ กรัม

- หาปริมาณความชื้นในกากมันสำปะหลัง

$$\begin{aligned} \text{กากมันสำปะหลัง } 100 \text{ กรัม} & \text{ จะมีความชื้นอยู่ } 86.3 \text{ กรัม} \\ \text{ถากากมันหนัก } 182.48 \text{ กรัม} & \text{ จะมีความชื้นอยู่ } (182.48 \times 86.3) / 100 = 157.48 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

- หาปริมาณสารเคมีที่ต้องเติม

โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 18 ของน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง

น้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง 100 กรัม จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 กรัม

ถ้าน้ำหนักกากมันแห้ง 25 กรัม จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ $(25 \times 18) / 100 = 4.5$ กรัม

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม = ปริมาตรของเหลวทั้งหมด-ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์-ปริมาตรความชื้นในกากมันสำปะหลัง

ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม = $400 - 4.5 - 157.48 = 238.02$ มิลลิลิตร

3. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

คำนวณค่าสภาพระบายได้ของเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 ซึ่งจะกำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อที่ร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร โดยจะทำการตวงน้ำเยื่อมาจากเครื่องบดเยื่อซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 1.56 ดังนั้นจะใช้สูตรสำหรับการตวงปริมาตรน้ำเยื่อดังต่อไปนี้ เพื่อใช้ในการปรับความเข้มข้นให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อคือ ร้อยละ 1.56

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นอิสระของเยื่อ คือ 1000 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ

$$0.3 \times 1000 = 1.56 \times V_2$$

$$V_2 = (0.3 \times 1000) / 1.56$$

$$V_2 = 192 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นจะต้องตวงน้ำเยื่อจากเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.56 มา 192 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรรวมเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

4. วิธีการคำนวณเยื่อในการบดเยื่อ

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 กำหนดให้ใช้น้ำหนักเยื่อแห้งในการบดเยื่อ 360 กรัม น้ำหนักแห้ง ในน้ำปริมาตร 23 ลิตร ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 กำหนดให้เยื่อมีความชื้นร้อยละ 80 ดังนั้นถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม คำนวณได้ดังนี้

ความชื้นร้อยละ 80 แสดงว่าเมื่อชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่ 20 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 20 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้นเท่ากับ $(360 \times 100) / 20 = 1800$ กรัม

ดังนั้นต้องชั่งเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 80 มา 1800 กรัม ถึงจะได้เยื่อแห้ง 360 กรัม น้ำหนักแห้ง และพบว่ามือน้ำอยู่ในเยื่อแล้ว $1800 - 360 = 1440$ กรัม ดังนั้นจะต้องเติมน้ำเพิ่มลงไปอีก 21560 กรัม เพื่อที่จะทำให้น้ำเยื่อที่พร้อมก่อนการบดมีความเข้มข้นร้อยละ 1.56

5. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ดังนั้นถ้าจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบให้มือน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับดังนี้

แผ่นขึ้นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 75 กรัม

ถ้าแผ่นขึ้นทดสอบมีขนาด 0.0315 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $75 \times 0.0315 = 2.3625$ กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 2.3625 กรัม ในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร แต่สถานะจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ 10 แผ่น ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $2.3625 \times 10 = 23.625$ กรัม

โดยในการขึ้นแผ่นทดสอบนี้จะมีการผสมกากมันสำปะหลังเข้าไปในสัดส่วน

เยื่อใยสั้น : เยื่อกากมันที่ผ่านการขจัดแป้ง = 90: 10

ดังนั้น น้ำหนักเยื่อใยสั้นที่ต้องซื้อมาเท่ากับ $(90 \times 2.3625)/100 = 2.12625$ กรัม

น้ำหนักกากมันที่ต้องซื้อมาเท่ากับ $(10 \times 2.3625)/100 = 0.23625$ กรัม

โดยกากมันสำปะหลังที่นำมาใช้จะมีความชื้นเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

กากมันสำปะหลังแห้งหนัก $100-80=20$ กรัม ต้องซื้อมากากมันมา 100 กรัม

หากต้องการกากมันแห้งหนัก 0.23625 กรัม จะต้องซื้อมากากมา $(100 \times 0.23625)/20$
= 1.18125 กรัม

น้ำหนักกากที่ต้องซื้อมาขึ้นแผ่น 1 แผ่น มีค่าเท่ากับ 1.18125 กรัม

หากต้องการขึ้นแผ่นกระดาษ 10 แผ่น จะต้องซื้อมากากมาทั้งหมด 1.18125×10
= 11.8125 กรัม

สมมุติเยื่อใยสั้นที่นำมาใช้ขึ้นแผ่นมีความชื้นเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์

เยื่อใยสั้นแห้งหนัก $100-75=25$ กรัม ต้องซื้อมา 100 กรัม

หากต้องการเยื่อแห้งหนัก 2.12625 กรัม ต้องซื้อมา $(100 \times 2.12625)/25$
= 8.505 กรัม

น้ำหนักเยื่อที่ต้องซื้อมาขึ้นแผ่น 1 แผ่น มีค่าเท่ากับ 8.505 กรัม

หากต้องการขึ้นแผ่นกระดาษ 10 แผ่น จะต้องซื้อมากากมาทั้งหมด 8.505×10
= 85.05 กรัม

หรือกากมันแห้งสำหรับขึ้นแผ่นกระดาษ 10 แผ่น จะหนักเท่ากับ 2.12625×10
= 21.2625 กรัมแห้ง

ทำการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องใช้ โดยคิดจากความเข้มข้นของเยื่อที่อยู่ในเครื่องบดเท่ากับ 1,54 เปอร์เซ็นต์

$$\text{จากสูตร } \% \text{ ความเข้มข้นของเยื่อ} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อ (กรัมแห้ง)}}{\text{น้ำหนักเยื่อ (กรัมแห้ง) + น้ำที่เติม}} \times 100$$

$$1.54 = \frac{21.2625}{\text{น้ำหนักเยื่อ (กรัมแห้ง) + น้ำที่เติม}} \times 100$$

ดังนั้นปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องตวงมาเท่ากับ 1380.68 กรัม

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นน้ำหนักกระดาษ 10 แผ่นจะเท่ากับปริมาณเยื่อ + ปริมาณกากที่ต้องใช้ทั้งหมด} \\ = 85.05 + 1380.68 = 1465.73 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากนั้นทำการคำนวณความเข้มข้นของน้ำเยื่อจากแผ่นกระดาษ 10 แผ่นนี้อีกครั้ง โดย

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักเยื่อทั้งหมด 1465.73 กรัม คิดเป็นน้ำหนักกระดาษรวมเท่ากับ 23.625 กรัม} \\ \text{ถ้าน้ำหนักทั้งหมด 100 กรัม คิดเป็น } &= (23.625 \times 100) / 1465.73 \\ &= 1.61 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 1.61 เปอร์เซ็นต์

ทำการปรับความเข้มข้นน้ำเยื่อจาก 1.54% เป็น 0.3% โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ \text{แทนค่า} \quad (1.61)(1465.73) &= (0.3)(V) \\ V &= 7866.08 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องเติมน้ำเพิ่มเท่ากับ $7866.08 - 1465.73 = 6400.35$ กรัม สำหรับกระดาษ 10 แผ่น หากคำนวณแค่เพียง 1 แผ่น จะได้เท่ากับ $6400.35 / 100 = 64.0035$ กรัม

6. คำนวณปริมาณแป้งที่ต้องใช้ในแต่ละภาวะ

โดยกำหนดความเข้มข้นของแป้งที่ใช้เท่ากับร้อยละ 1.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งในที่นี่จะขอกำหนดค่าน้ำหนักเยื่อแห้งไว้ที่ 98.125 กรัม

$$\begin{array}{llll}
 \text{ในน้ำหนักกาก} & 100 \text{ กรัม} & \text{ต้องเติมแป้งไป} & 1.2 \text{ กรัม} \\
 \text{หากกากมันหนัก} & 98.125 \text{ กรัม} & \text{ต้องเติมแป้งเข้าไป} & (98.125 \times 1.2) / 100 \\
 & & & = 1.18 \text{ กรัม}
 \end{array}$$

จากนั้นทำการชั่งแป้งมา 1.18 กรัม ละลายในน้ำปริมาตรประมาณ 23.5 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสารละลายแป้งที่ 5 เปอร์เซ็นต์ นำไปต้มจนอุณหภูมิสูงประมาณ 95°C จากนั้นทำการจับเวลาต่ออีก 20 นาที แล้วจึงมาทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นอยู่ที่ 1% สำหรับนำมาใช้ผสมเยื่อเพื่อขึ้นแผ่นกระดาษ โดยวิธีการข้างต้นนี้เป็นคำแนะนำการใช้งานจากบริษัทเยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ประเทศไทย

7. คำนวณปริมาณสารกันซึม (AKD) ที่ต้องใช้ในแต่ละภาวะ

โดยกำหนดความเข้มข้นของสารกันซึมที่ใช้เท่ากับร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งในที่นี้จะขอกำหนดค่าน้ำหนักเยื่อแห้งไว้ที่ 98.125 กรัม

$$\begin{array}{llll}
 \text{ในน้ำหนักกาก} & 100 \text{ กรัม} & \text{ต้องเติมสารกันซึมไป} & 0.5 \text{ กรัม} \\
 \text{หากกากมันหนัก} & 98.125 \text{ กรัม} & \text{ต้องเติมสารกันซึมเข้าไป} & (98.125 \times 0.5) / 100 \\
 & & & = 0.49 \text{ กรัม}
 \end{array}$$

โดยในที่นี้สารกันซึมจะมีความเข้มข้นของสารละลายอยู่ที่ 12.7%

$$\begin{array}{llll}
 \text{สารกันซึมหนัก} & 12.7 \text{ กรัม} & \text{ต้องเติมสารกันซึมไป} & 100 \text{ กรัม} \\
 \text{ต้องการสารกันซึมหนัก} & 0.49 \text{ กรัม} & \text{ต้องเติมสารกันซึมเข้าไป} & (0.49 \times 100) / 12.7 \\
 & & & = 3.86 \text{ กรัม}
 \end{array}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวธิดารัตน์ กาญจนธนาเลิศ เกิดเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่
จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเซนต์ฟรังซิสซาเวียร์ คอนแวนต์
- ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปี พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิชาการ

- Kanjanathanalert, T., Suvarmakich, K. (2011). Pulping of Starch-removed Cassava Residue. The 1th National / International Silpakorn Graduate Study Conference 2011. 10-11 May 2011. Bangkok, Thailand. pp. 1232-1236.