การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังเพื่อการทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

นางสาวนันทพร ตรีภพนาถ

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 CASSAVA RESIDUE FOR SUBSTITUTION OF RECYCLED PULP IN CORRUGATING MEDIUM PRODUCTION

Miss Nuntaporn Tripopnat

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	การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังเพื่อการทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก
โดย	นางสาวนันทพร ตรีภพนาถ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ)

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

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ณัฐิญา ดียิ่ง)

นันทพร ตรีภพนาถ : การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังเพื่อการทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก. (PULPING OF CASSAVA RESIDUE FOR SUBSTITUTION OF RECYCLED PULP IN CORRUGATNG MEDIUM PRODUCTION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ, 92 หน้า.

กากมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz.) เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ยังมีเส้นใยอยู่มาก จากการวิเคราะห์เส้นใยพบว่า กากมันที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรง 50 เมช มีความยาวใกล้เคียงกับเยื่อใยสั้น (hardwood) ในขณะที่กากมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรง 50 เมช มีเส้นใยที่สั้นมาก แต่กลับให้ความแข็งแรงดีกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะกากมันขนาดใหญ่ยังเกาะตัวเป็นกระจุก จึงนำเฉพาะกากมันขนาดใหญ่กว่า 50 เมช มาผลิตเยื่อด้วยวิธีเชิงเคมีและเชิงกลเพื่อแยกเส้นใยออกจากกัน ซึ่งจากการนำกากมันไปผลิตเยื่อด้วยภาวะต่างๆ เพื่อหาวิธีการผลิตเยื่อที่เหมาะสม พบว่า การผลิตเยื่อในทุกภาวะทำให้เส้นใยมีขนาดสั้นลง จำนวนกระจุกเส้นใยลดลง และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น โดยการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของของเหลวทั้งหมด และการบดที่ค่าสภาพระบายได้ 258 มิลลิลิตร ให้สมบัติของกระดาษในด้านต่างๆ ดีที่สุด จึงนำกากที่ผลิตด้วยวิธีดังกล่าวไปทดลองผสมกับเยื่อรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกเก่าในอัตราส่วนต่างๆ กัน ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังในแผ่นกระดาษ ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความแข็งแรงต่อการโค้งงอ และความเรียบส่วนใหญ่ลดลง แต่การต้านอากาศของเยื่อจากการผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟด์และการบดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นภาวะการผลิตเยื่อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกากมันสำปะหลัง เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูง และไม่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากเข้าไปทดแทนเยื่อรีไซเคิล

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต ....

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

5272366123: MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : CASSAVA RESIDUE / SODA PULPING / SULFITE PULPING / RECYCLED PULP / CORRUGATING MEDIUM

NUNTAPORN TRIPOPNAT : PULPING OF CASSAVA RESIDUE FOR SUBSTITUTION OF RECYCLED PULP IN CORRUGATING MEDIUM PRODUCTION. ADVISOR: KUNTINEE SUVARNAKICH, Ph.D., 92 pp.

.

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) residue is an industrial waste from starch production with a large amount of fibers. Fiber analysis showed that the fiber length of the residue which is larger than 50-mesh screen is closs to that of hardwood pulp. Cassava residue that is smaller than 50-mesh screen has very short fibers but better paper properties, possible due to lower shive content. Therefore, the residue larger than 50-mesh screen was further pulped mechanically and chemically to separate the fibers. It was found that every condition of pulping reduced fiber length and shive content, but produced more fines. Pulping using Sodium Hydroxide at 18 % w/w, Sodium bisulfite at 15 % v/lv and beating at freeness 258 ml. gave best result. The cassava residue pulps from these pulping processes were then blended with recycled pulp from Old Corrugated Container (OCC) in various ratios. It was found that an increase in cassava residue quantity lowered tensile index, burst index, tear index, bending stiffness and smoothness, but increased air resistance in the pulp produced by Sodium Hydroxide, Sodium bisulfite and beating. Pulping of cassava residue using Sodium Hydroxide at 18 % w/w was suitable for recycled pulp substitution due to highest tensile index.

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

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทินี สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าการศึกษาจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท เยนเนรัลสตาร์ช จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์กากมันสำปะหลังที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งเครื่องมือบางอย่างในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ณัฐิญา ดียิ่ง กรรมการสอบภายนอกที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็น และช่วยแก้ข้อสงสัยในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สีหนาท ประสงค์สุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิจัยครั้งนี้และทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ อ.สมพร ชัยอารีย์กิจ ที่ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทดลองในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่สมชาย ภวชินวร เพื่อนๆ และพี่ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่คอยเลี้ยงดูผู้วิจัยมาเป็นอย่างดี คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทางด้านการเรียนและการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…………………………………………………………………	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..	จ
กิตติกรรมประกาศ...	ฉ
สารบัญ..	ช
สารบัญตาราง…………………………………………………………………………	ญ
สารบัญภาพ…………………………………………………………………………...	ฎ
บทที่ 1 บทนำ…………………………………………………………………………	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……………………………………..	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……………………………………………………...	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย……………………………………………………………..	2
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย…………………………………………………………….	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ………………………………………………………	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย………………………………………………………………...	3
1.7 เนื้อหาของงานวิจัย..	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง…………………………………………………	
2.1 แนวคิดและทฤษฎี………………………………………………………………..	5
2.1.1 มันสำปะหลัง...…………………………………………………………..	5
2.1.1.1 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง.........………………………	7
2.1.1.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง...………………………	10
2.1.1.3 กากมันสำปะหลัง..	12
2.1.2 กระดาษและองค์ประกอบของกระดาษ.................………………..	12
2.1.2.1 แหล่งเส้นใยในการผลิต.............…………………………	13
2.1.2.2 โครงสร้างของเส้นใย..................................………………	14
2.1.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้.......................................	15

หน้า

2.1.3 กระบวนการผลิตกระดาษ……………………………………………... 19
2.1.3.1 การผลิตเยื่อเชิงกล..........................…………………. 19
2.1.3.2 การผลิตเยื่อเชิงเคมี..........................………………….. 20
2.1.4 ปฏิกิริยาขององค์ประกอบเคมีในเส้นใยการผลิตเยื่อเคมี.................... 21
2.1.4.1 ปฏิกิริยาการผลิตเยื่อแบบกรด.................………………….. 21
2.1.4.2 ปฏิกิริยาการผลิตเยื่อแบบด่าง................…………………. 22
2.1.5 กระดาษลูกฟูก...................................…………………………… 23
2.1.5.1 ชนิดของกระดาษลูกฟูก.....………………………………….. 26
2.1.6 ผลของการรีไซเคิลกระดาษ... 27
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……………………………………………… 25

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย……………………………………………………………. 30
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย...................……………………………… 30
3.2 เครื่องมือใช้ในการวิจัย…………………………………………...…………..… 30
3.3 วิธีการทดลอง.....……………………………………………………………... 33
3.3.1 การหาขนาดกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม..................................... 33
3.3.2 การหาภาวการณ์ผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม……….. 41
3.3.3 การหาอัตราส่วนของเยื่อกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิล................. 44

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล…………………………………………………………….. 47
4.1 ผลการทดลองการหาขนาดของกากมันสำปะหลังที่เหมะสม………………… 47
4.2 ผลการทดลองการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลัง.. 55
4.3 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเยื่อกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิล................. 68

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ…………………………………….. 78
5.1 สรุปผลการวิจัย……………………………………………………………… 78
5.2 ข้อเสนอแนะ……………………………………………………………….... 80

หน้า

รายการอ้างอิง.. 81

ภาคผนวก... 84

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์... 92

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบทางเคมีของกากในสำปะหลังในงานวิจัยต่าง ๆ……………………	9
2-2	ประเภทของลอนลูกฟูก…………………………………………………………	25
3-1	ขนาดต่างๆ ของกากมันสำปะหลัง..	35
4-1	ขนาดต่างๆ ของกากมันสำปะหลัง...	47
4-2	ปริมาณกากมัน และสัณฐานวิทยาของเส้นใยกากมันสำปะหลังในแต่ละส่วนเมื่อเทียบกับเยื่อใยสั้น (ค่าเฉลี่ย±SD)……………………………………………	49
4-3	ผลความยาวเส้นใย จำนวนกระจุกเส้นใย และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของกากมันสำปะหลังหลังการผลิตเยื่อด้วยวิธีต่างๆเทียบกับกากควบคุมและเยื่อใยสั้น (ค่าเฉลี่ย±SD)...	58
4-4	ผลความกว้างของเส้นใย ดัชนีความโค้งงอ และดัชนีความหักงอของเส้นใยกากมันสำปะหลังหลังการผลิตเยื่อด้วยวิธีต่างๆเทียบกับกากควบคุมและเยื่อใยสั้น (ค่าเฉลี่ย±SD)..	59
4-5	ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อกากมันสำปะหลัง...	69
4-6	ผลผลิตที่ได้ และปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง..	70

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ผลผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย................	5
2-2	ต้นมันสำปะหลัง...	6
2-3	กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง...	10
2-4	โครงสร้างของเส้นใย..	14
2-5	โครงสร้างของเซลลูโลสและเส้นใยขนาดเล็ก ส่วนผลึกและอสัณฐาน...............	16
2-6	โครงสร้างโมเลกุลน้ำตาล..	17
2-7	โครงสร้างของลิกนินบางส่วนของต้น Beech..	18
2-8	โมโนเมอร์พื้นฐานของลิกนิน...	18
2-9	พันธะระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต	21
2-10	ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินในการผลิตเยื่อแบบกรด..................................	22
2-11	ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินในการผลิตเยื่อแบบด่าง.......................................	23
2-12	ส่วนประกอบของกระดาษลูกฟูก..	23
2-13	ขนาดลอนของกระดาษลูกฟูก..	24
2-14	ชนิดของกระดาษลูกฟูก..	26
2-15	ความสัมพันธ์ของจำนวนการรีไซเคิลต่อสมบัติต่างๆ	27
3-1	เครื่องบดเยื่อ (Valley beater)	34
3-2	เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้..	34
3-3	เครื่องวิเคราะห์เส้นใย..	35
3-4	เครื่องขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ..	36
3-5	เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง..	37
3-6	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ..	38
3-7	เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก..	39
3-8	เครื่องวัดความเรียบ..	39
3-9	เครื่องทดสอบการซึมผ่านลม..	40
3-10	แผนการทดลอง...	41
3-11	บอมบ์สำหรับบรรจุกากมันสำปะหลังและเครื่องต้มเยื่อ..........................	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-11	เครื่องตีกระจายเยื่อ…………………………………………………………	45
3-12	เครื่องทดสอบความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้ง................................	46
4-1	การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังส่วนต่างๆ และเยื่อใยสั้น………………………………………………………………………..	48
4-2	ความหนาแน่นปรากฏของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น..........	50
4-3	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น..	51
4-4	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น…………………………………………………………………………	52
4-5	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น..	53
4-6	ความเรียบของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น………………….	54
4-7	การต้านอากาศของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น..................	55
4-8	ร้อยละผลผลิตของการผลิตเยื่อด้วยภาวะต่างๆ..	56
4-9	การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์..	60
4-10	การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์..	60
4-11	การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยแอซีติก..	61
4-12	การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยเอทานอล..	61
4-13	การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยบด..	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-14	ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น.	63
4-15	ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น	64
4-16	ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น…………………………………………………………………………	65
4-17	ความเรียบของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น.............	66
4-18	การต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น.........	67
4-19	ความหนาแน่นของแผ่นชิ้นทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง..	70
4-20	ความแข็งแรงต่อแรงดึงเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง.....	71
4-21	ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง..	72
4-22	ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง.......	74
4-23	ความแข็งแรงต่อการโค้งงอเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง...	75
4-24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับความแข็งแรงต่อการโค้งงอ......................	75
4-25	ความเรียบของแผ่นชิ้นทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันปะหลัง...	76
4-26	การต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันปะหลัง..	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยปลูกมันสำปะหลังมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากประเทศไนจีเรีย โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 12 ของการผลิตทั่วโลก โดยมีพื้นที่ในการปลูกมันสำปะหลังประมาณ 8 ล้านไร่ใน 45 จังหวัด นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังมากที่สุดในโลก ผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังได้แก่ มันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งส่งออกไปยังประเทศต่างๆ มากกว่า 100 ประเทศทั่วโลก ครองส่วนแบ่งตลาดมากกว่าร้อยละ 80 ของทั่วโลก โดยอุตสาหกรรมที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

กากมันสำปะหลังเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งใช้หัวมันสำปะหลังสดในการผลิตแป้งมันสำปะหลังมากถึงประมาณ 12-15 ล้านตันต่อปี โดยปกตินิยมนำกากมันสำปะหลังมาผลิตเป็นอาหารสัตว์ และผลิตเอทานอลเป็นเชื้อเพลิง แต่ปัจจุบันการเพิ่มมูลค่าของกากมันสำปะหลังยังไม่แพร่หลาย จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังพบว่ามีส่วนของเส้นใยประมาณร้อยละ 15-50 ดังนั้นเพื่อเพิ่มมูลค่าทางการค้าของกากมันสำปะหลังจึงนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทดแทนเยื่อรีไซเคิลในกระดาษลอนลูกฟูก โดยอุตสาหกรรมกระดาษลูกฟูกขยายตัวตามเศรษฐกิจที่เติบโตขึ้น เนื่องจากนิยมผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในสินค้าอุปโภคบริโภค กระดาษลูกฟูกที่ผลิตในประเทศไทยใช้เยื่อรีไซเคิลเป็นวัตถุดิบหลักและมีความจำเป็นต้องนำเข้ากระดาษรีไซเคิลจากต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ยุโรป เป็นต้น ซึ่งราคาต้นทุนได้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้เยื่อรีไซเคิลซึ่งเป็นเยื่อที่นำมาใช้จะมีสมบัติทางความแข็งแรงที่ลดลงหลังจากการรีไซเคิลแต่ละรอบ ทำให้การสร้างพันธะของเส้นใยลดลง ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ

การนำกากมันสำปะหลังมาใช้เพื่อทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการทำกระดาษลอนลูกฟูกนั้นต้องทำการผลิตเยื่อเพื่อกำจัดลิกนินและกระจุกเส้นใยออก เพื่อเพิ่มสมบัติความแข็งแรงของกากมันสำปะหลัง แต่กระบวนการผลิตอาจส่งผลให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงได้ ในงานวิจัยนี้จึงจะทดลองใช้วิธีการผลิตเยื่อทั้งเชิงกลและเคมีเพื่อปรับปรุงสมบัติของกากมันสำปะหลัง และหา

อัตราส่วนในการทดแทนเยื่อรีไซเคิลด้วยเยื่อจากกากมันสำปะหลังในการทำกระดาษลอนลูกฟูก เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปทดแทนเยื่อรีไซเคิลสำหรับการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษากากมันสำปะหลังจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ได้ในขั้นตอนการสกัดแป้งในรูปของกากหมาดความชื้นประมาณร้อยละ 80±10 การวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ดังนี้คือ

1.3.1 การหาขนาดของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตเยื่อในขั้นต่อไป โดยการคัดขนาดออกเป็น 3 ส่วนคือ ขนาดใหญ่กว่าตะแกรง 25 เมช ขนาดระหว่างตะแกรง 25-50 เมช และขนาดเล็กกว่าตะแกรง 50 เมช โดยใช้น้ำช่วยในการคัดขนาด จากนั้นนำกากมันสำปะหลังที่คัดขนาดในแต่ละส่วนมาทดสอบสมบัติของเยื่อด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใยตามมาตรฐาน ISO และขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้นจากต้นยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอก คือ 5:95 และ 10:90 และนำไปวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความเรียบ และการซึมผ่านลม แล้วเลือกขนาดของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเยื่อในขั้นต่อไป

1.3.2 การหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังทั้งเชิงเคมีและเชิงกล โดยใช้สารเคมี ดังนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มร้อยละ 18, 21, 24 ต่อน้ำหนักแห้ง โซเดิมไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15, 18, 21 ของปริมาตรทั้งหมด แอซีติก (Acetic) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 ของปริมาตรทั้งหมด และ เอทานอล (Ethanol) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 ของปริมาตรทั้งหมด ในการผลิตเยื่อเชิงกลด้วยการบดด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ซึ่งใช้เยื่อที่บดได้ค่าสภาพระบายได้ 2 ระดับ คือ 250±20 และ 500±20 จากนั้นนำกากมันสำปะหลังที่คัดขนาดในแต่ละส่วนมาทดสอบสมบัติของเยื่อด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใยตามมาตรฐาน ISO และขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้

อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้นจากต้นยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอกที่ 10:90 และนำไปวัดสมบัติต่างๆ ตามข้างต้น

1.3.3 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเติมกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อต่อเยื่อรีไซเคิลในการทำกระดาษลอนลูกฟูก โดยใช้อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิลจากกระดาษกล่องลูกฟูกเก่า (OCC) ที่อัตราส่วน 5:95 10:90 และ 20:80 จากนั้นขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร นำไปวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความเรียบ การซึมผ่านลม และความแข็งต่อการโค้งงอ

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

คุณภาพของกากมันสำปะหลังที่ได้จากโรงงานแป้งมันสำปะหลังไม่คงที่ เนื่องจากความไม่คงที่ของวัตถุดิบ ทำให้ปริมาณเส้นใย และปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลังในแต่ละรอบไม่เท่ากัน ส่งผลต่อผลผลิตในขั้นตอนต่อไป เช่น การคัดขนาด และการผลิตเยื่อ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่เยื่อรีไซเคิลด้วยกากมันสำปะหลังในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.2 ศึกษาและทำการทดลองเบื้องต้น และเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

1.6.3 ดำเนินการทดลองโดยคัดแยกขนาดกากมันสำปะหลังและผสมเยื่อใยสั้น แล้วขึ้นแผ่นทดสอบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสม

1.6.4 ดำเนินการทดลองการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังและผสมเยื่อใยสั้น แล้วขึ้นแผ่นทดสอบ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อ

1.6.5 ดำเนินการทดลองหาอัตราส่วนในการผสมเยื่อรีไซเคิล แล้วขึ้นแผ่นทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของการเติมเยื่อกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

1.6.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.6.7 เรียบเรียงข้อมูลเพื่อเขียนวิทยานิพนธ์และการเผยแพร่

1.7 เนื้อหาของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 5 บท คือ บทนำ ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผล และสรุปผล บทที่ 1 เป็นบทนำของวิทยานิพนธ์ บทที่ 2 เป็นส่วนทฤษฎีเกี่ยวกับมันสำปะหลัง กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ กระดาษลูกฟูก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 ประกอบด้วยรายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยและวิธีการทดลอง บทที่ 4 เป็นการแสดงผลการทดลองพร้อมอภิปรายการทดลองที่ได้ และบทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

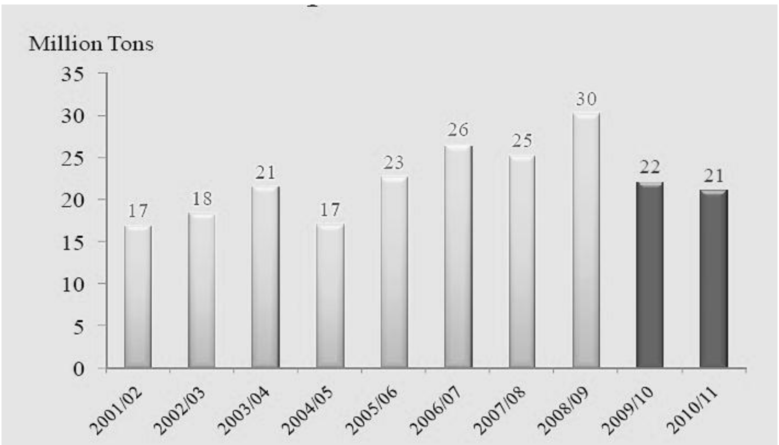
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 มันสำปะหลัง

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตมันสำปะหลังมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากไนจีเรีย และถือเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลก คิดเป็นประมาณร้อยละ 12 ของการผลิตทั่วโลก ผลผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทยมีประมาณ 17-30 ล้านตันต่อปีดังแสดงในภาพที่ 2-1 ดังนั้นมันสำปะหลังจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยเป็นผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังที่ใหญ่สุดในโลก ในปี 2552-2553 มีการส่งออกแป้งมันสำปะหลังประมาณ 2.6 ล้านตัน ซึ่งอุตสาหกรรมที่ใช้แป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร กระดาษ สิ่งทอ สารให้ความหวาน ยา อาหารสัตว์ และพลังงาน [1]



- **ภาพที่ 2- 1** ข้อมูลผลผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย [1]

ลักษณะของมันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้น สูงประมาณ 170-220 เซนติเมตร ใบมีลักษณะเป็นแฉกๆ ตั้งแต่ 5-9 แฉก สีใบเป็นสีเขียวเข้ม รากเป็นรากฝอยซึ่งเป็นที่สะสมอาหาร เรียกว่า “หัว” มีแป้งร้อยละ 14 40 มันสำปะหลังมีสายพันธุ์ประมาณ 150 พันธุ์ ซึ่งแตกต่างกันที่ลักษณะภายนอกและปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก [2] ดังภาพที่ 2-2

ชื่อสามัญภาษาอังกฤษ : Cassava, Tapioca

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Manihot esculenta* Crantz.

วงศ์ : Euphorbiaceae

ภาพที่ 2- 2 ต้นมันสำปะหลัง [2]

มันสำปะหลังมีแหล่งกำเนิดจากแถบที่ลุ่มเขตร้อน ได้แก่ แถบประเทศกัวเตมาลาและเม็กซิโก, ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้, ทางทิศตะวันออกของประเทศโบลิเวียและทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศอาร์เจนตินา และทางทิศตะวันออกของประเทศบราซิล โดยได้มีการนำต้นมันสำปะหลังเข้าประเทศไทย เมื่อประมาณ พ.ศ. 2329-2383 ซึ่งเป็นการปลูกเพื่อการค้าในการทำแป้งและสาคูในภาคใต้ โดยปลูกระหว่างแถวของต้นยางพารา แต่การปลูกมันสำปะหลังในภาคใต้ลดลงเมื่อมีการขยายตัวของการปลูกยางพารา ต่อมามีการปลูกในภาคตะวันออก คือจังหวัดชลบุรี, ระยอง และจังหวัดใกล้เคียง เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ และเมื่อมีการขยายตัวมากขึ้นจึงเพิ่มพื้นที่การปลูกไปสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งปัจจุบันเป็นภาคที่ปลูกมันสำปะหลังมากที่สุด เพราะมีสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การปลูกมันสำปะหลัง ซึ่งมีการพัฒนาพันธุ์มันสำปะหลังโดยมูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลัง ได้แก่ ระยอง

1 ระยอง 2 ระยอง 3 ระยอง 5 ระยอง 60 ระยอง 90 เกษตรศาสตร์ 50 ศรีราชา 1 และพันธุ์ห้านาที [3,4]

2.1.1.1. องค์ประกอบของมันสำปะหลัง

องค์ประกอบของมันสำปะหลังที่สำคัญมีดังนี้ [4]

2.1.1.1.1 แป้ง

แป้งในหัวมันเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดขององค์ประกอบทั้งหมด ปริมาณแป้งในหัวมันสำปะหลังพันธุ์ต่างๆ มีอยู่ประมาณร้อยละ 14-28 โดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น อายุของหัวมัน พันธุ์ และสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณน้ำฝน ช่วงเวลาเก็บเกี่ยว ล้วนมีผลต่อคุณภาพของแป้ง

2.1.1.1.2 ไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารพิษที่พบในพืชมากกว่า 3000 ชนิด โดยการที่พืชปล่อยกรดไฮโดรไซยานิก เรียกว่าไซยาโนเจเนซิส (cyanogenesis) เพื่อเป็นการป้องกันตนเองของพืชจากการถูกทำลายโดยสัตว์และแมลง โดยทั่วไปมันสำปะหลังมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกตั้งแต่ 14-400 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยไม่มีมันสำปะหลังที่ไม่มีกรดไฮโดรไซยานิก ปัจจัยอายุการเก็บเกี่ยวมีผลต่อปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกคือการเก็บเกี่ยวในช่วง 8-10 เดือนจะให้ปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกมากกว่าช่วง 12 เดือน นอกจากนี้สภาพแวดล้อมก็มีผลเช่นกันคือ สภาวะแล้งจะให้ปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกที่มากกว่าสภาวะที่มีน้ำเพียงพอ ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มตามปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกได้ 3 กลุ่ม คือ

- กลุ่มไม่มีพิษ คือ หัวมันที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัมหัวมันที่ปอกเปลือก
- กลุ่มมีพิษปานกลาง คือ หัวมันที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกตั้งแต่ 50-100 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัมหัวมันที่ปอกเปลือก
- กลุ่มมีพิษอันตราย คือ หัวมันที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัมหัวมันที่ปอกเปลือก

2.1.1.1.3 เปลือก (เยื่อใย)

ความหนาของเปลือกมีประโยชน์ต่อการขนส่ง และทนทานต่อการสูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยว แต่การมีเปลือกหรือกากมัน (pulp) เป็นข้อเสียในการสกัดแป้งของอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง เพราะเป็นการเพิ่มภาระในการสกัด ลดประสิทธิภาพการสกัดลง

2.1.1.1.4 สารประกอบที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแป้ง

สีเนื้อของมันสำปะหลังแตกต่างกันไปตามพันธุ์ โดยทั่วไปมีตั้งแต่สีขาวนวลจนถึงสีเหลือง ซึ่งยังไม่มีการวิเคราะห์หาสารประกอบสีหรือการสร้างและการเปลี่ยนแปลงตามอายุของหัวมันต่างๆ แต่การเปลี่ยนแปลงของสีหลังเก็บเกี่ยวเกิดชัดเจนที่พาเรงคิมา (parenchyma) พบสารประกอบพวกฟีนอลิก (phenolic), leucoanthocynin และ cathechin ซึ่งจะกลายเป็นสีน้ำเงินและดำ โดยรายละเอียดขององค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 2-1

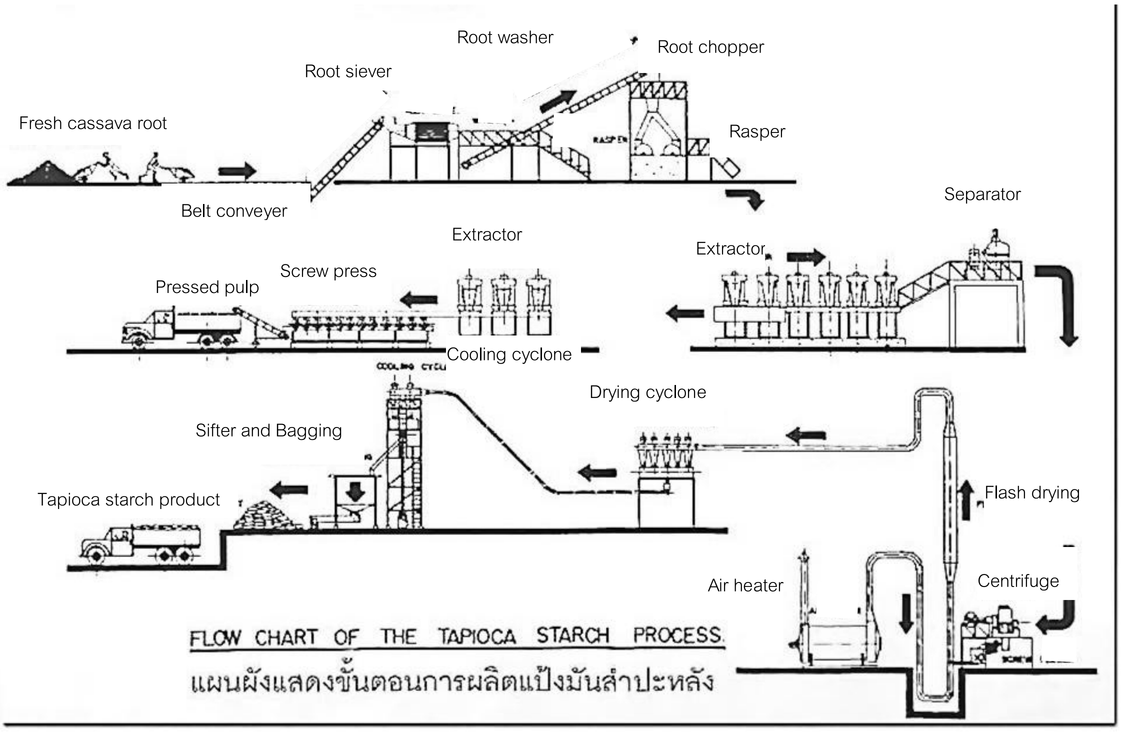
ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของกากในสำปะหลังในงานวิจัยต่าง ๆ [4]

	เจริญศักดิ์ (1989)	Balagopalan และคณะ (1988)	Beynum และ Roles (1985)	Grace (1977)	Gomez และคณะ (1985)	Shipman (1967)	Sriroth และคณะ (1998)
ความชื้น (%)	62.28	59.40	66.00	70.25	*	70.00	53.02
คาร์โบไฮเดรต (%)	29.73	38.10	26.00	26.58	*	24.00	25.00
โปรตีน (%)	1.18	0.70	1.00	1.12	1-2	1.00	2.18
ไขมัน (%)	0.08	0.20	0.30	0.41	0.2-0.5	3.00**	*
เถ้า (%)	0.85	1.00	*	0.54	1-2	*	1.71
เยื่อใย (%)	0.99	0.60	1.00	1.11	1.5-2	2.00	*
กรดไฮโดรไซยานิก (ppm)	173	15-400	*	*	*	*	110.40

*ไม่มีรายงาน ** รวมเกลือแร่และน้ำตาล

2.1.1.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดังแสดงในภาพที่ 2-3 ซึ่งแจกแจงได้ดังนี้ [4]



ภาพที่ 2- 3 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง [1]

2.1.1.2.1 การเตรียมมันสำปะหลัง

ทางโรงงานจะสุ่มตัวอย่างเพื่อหาความหนาแน่น และปริมาณของแข็ง (เชื้ อแป้ง) เพื่อตกลงราคาซื้อขาย แล้วนำไปเทบนลาน จากนั้นจะลำเลียงขึ้นสู่สายพานเข้าเครื่องร่อนทราย (root siever) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังตะแกรงกลมที่หมุนตามแนวนอนด้วยความเร็ว 10-15 รอบต่อนาที ทำให้ทรายและเศษเปลือกที่ปนมาหล่นตามช่องตะแกรง

2.1.1.2.2 การล้างหัวมัน

เมื่อหัวมันสำปะหลังออกจากเครื่องร่อนทรายจะส่งผ่านไปยังเครื่องล้างหัวมัน (root washer) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกผ่าครึ่งตามแนวนอนกั้นเป็นช่องๆ ภายในมีใบพัดหมุนกวนหัวมันและตักหัวมันจากช่องหนึ่งไปยังช่องถัดไป เพื่อล้างเอาเศษดินทรายที่ยังคง

ติดอยู่ที่หัวมันออก ซึ่งสามารถหมุนเวียนน้ำในส่วนนี้ได้ โดยใช้น้ำจากขั้นตอนการแยกแป้ง และใช้น้ำดีล้างหัวมันในช่องสุดท้าย

2.1.1.2.3 การโม่หัวมันสำปะหลัง

สายพานจะนำหัวมันเข้าสู่เครื่องสับหัวมัน (root chopper) โดยสับหัวมันออกเป็นชิ้นเล็กลง ก่อนนำเข้าสู่เครื่องลักษณะเป็นรูปขากางเกงก่อนเข้าสู่เครื่องโม่ (rasper) ซึ่งมีลักษณะเป็นลูกกลิ้ง (drum) ประกอบใบเลื่อยหลายใบขนาดยาว 30 ซม. โดยมีการเติมน้ำเข้าระหว่างการโม่เพื่อให้โม่หัวมันได้ง่ายขึ้น และส่วนมากมีการหมุนเวียนน้ำเพื่อความประหยัดและลดการเสียแป้งไปกับน้ำทิ้ง ในขั้นตอนนี้จะได้ของเหลวข้น (middle fresh pulp) ซึ่งมีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมัน และสิ่งเจือปนต่างๆ

2.1.1.2.4 การสกัดแป้ง

การสกัดแป้งเป็นการแยกแป้งออกจากเส้นใยและกากประกอบด้วย 2 ชุด คือ การสกัดหยาบ (coarse extractor) และ การสกัดละเอียด (fine extractor) โดยน้ำแป้งจะผ่านการสกัดหยาบก่อน เพื่อแยกกากหยาบออกแล้วจึงเข้าสู่ชุดสกัดละเอียด จากนั้นกากจะเข้าเครื่องสกัดกาก (pulp extractor) และเข้าสู่เครื่องอัดกากต่อไป

2.1.1.2.5 การแยกแป้ง

น้ำแป้งจากเครื่องสกัดละเอียดเข้าสู่เครื่องแยกแป้ง (separator) โดยจะแยกแป้งซึ่งอยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์ออกจากน้ำแป้ง ทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นน้ำแป้งเข้มข้นโดยใช้หลักแรงหนีศูนย์กลาง

2.1.1.2.6 การสลัดแห้ง

จากน้ำแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงเข้าสู่การสลัดแห้ง (dewatering) โดยใช้แรงเหวี่ยงจะผลักน้ำในน้ำแป้งข้นให้ซึมผ่านผ้ากรอง จนได้แป้งหมาด (starch cake) มีความชื้นประมาณร้อยละ 35-40

2.1.1.2.7 การอบแห้ง

จากแป้งหมาดถูกเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส ผ่านปล่องอบแห้ง (flash dryer) แล้วตกลงเข้าสู่ไซโคลนร้อน (drying cyclone) ระเหยความชื้นออกไปบางส่วน ซึ่งมีการตรวจสอบความชื้นของแป้ง จากนั้นจะดูดเข้าสู่ไซโคลนเย็น (cooling cyclone) แล้วเข้าเครื่องร่อนแป้ง

2.1.1.2.8 การบรรจุ

แป้งจากการอบแห้งจะมีความชื้นร้อยละ 9-11 ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้ฟุ้งกระจายระหว่างการบรรจุ จึงมีการปรับความชื้นให้ใกล้สมดุลกับบรรยากาศมากขึ้นก่อนการบรรจุ

2.1.1.3 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณกากประมาณร้อยละ 10-15 ของน้ำหนักหัวมันเริ่มต้น [4] ซึ่งมีลักษณะที่ละเอียด สีขาว และมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 75 ในกากมันสำปะหลังยังคงมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตอยู่ร้อยละ 55-56 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีแป้งอยู่ประมาณร้อยละ 50-60 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งแป้งในส่วนนี้จะอยู่ในลิกโนเซลลูโลส และมีเส้นใยอยู่ร้อยละ 10-15 นอกจากนี้ยังมีโปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุ [5] เพราะฉะนั้นกากมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การผลิตอาหารสัตว์ การผลิตก๊าซชีวภาพ และการผลิตเอทานอล

2.1.2. กระดาษและองค์ประกอบของกระดาษ

กระดาษหมายถึง เส้นใยที่มีการเรียงตัวเป็นชั้นแบบสุ่มและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการขึ้นรูปกระดาษ โดยแรงแคปิลารี (capillary)จะดึงเส้นใยให้ใกล้ชิดกัน และสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ ดังนั้นกระดาษจะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อเปียก เฮมิเซลลูโลสเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ ในขณะที่ลิกนินบนผิวของเส้นใยไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน และลดความแข็งแรงของกระดาษ [6, 7]

โดยทั่วไปการผลิตกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานตั้งแต่ 35-225 กรัมต่อตารางเมตร และกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานตั้งแต่ 225 กรัมต่อตารางเมตรขึ้นไปเรียกว่ากระดาษแข็ง

2.1.2.1. แหล่งเส้นใยในการผลิต

เส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ [6,8]

2.1.2.1.1 เส้นใยจากเนื้อไม้ (wood fiber)

สามารถแบ่งตามลักษณะเส้นใยได้ 2 แบบ คือ

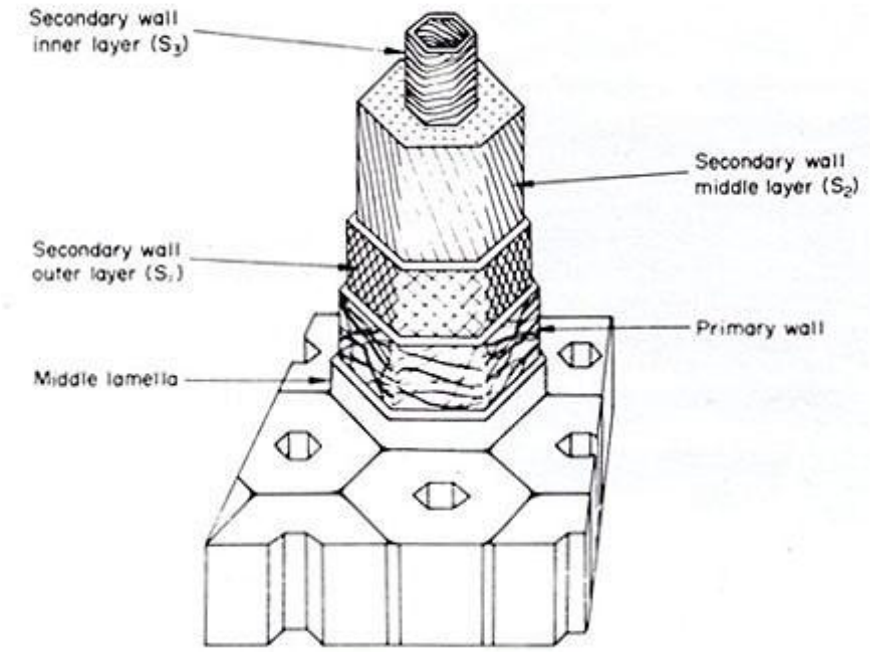
– ไม้เนื้ออ่อน (softwood) เป็นไม้จำพวกตระกูลสน ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชนิด ได้แก่ เทรคีด (tracheid) ประมาณร้อยละ 90-95 มีหน้าที่ให้ความแข็งแรงของต้นไม้ และใช้ลำเลียงน้ำผ่านเทรคีดที่ผนังบาง ซึ่งมีช่องว่างมาก มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 2-4 มิลลิเมตร มีความกว้างประมาณ 2-8 ไมโครเมตร และเรย์เซลล์ (ray cell) ประมาณร้อยละ 5-10 ซึ่งของเหลวไหลผ่านจากเทรคีดไปเรย์เซลล์ เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่สม่ำเสมอ เซลล์ในเนื้อไม้โดยภาพรวมส่วนใหญ่จะมีลักษณะของเซลล์ยาว ตรง ทำให้ขั้นตอนหรือกระบวนการจัดการต่างๆ เกี่ยวกับเนื้อไม้ทำได้ง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

– ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) เป็นไม้จำพวกไม้ผลัดใบ ประกอบด้วยเซลล์หลายชนิด และมีหน้าที่ต่างกัน ได้แก่ เซลล์ที่ให้ความแข็งแรงของต้นไม้ คือลิบริฟอร์มไฟเบอร์ (libriform fiber) และไฟเบอร์เทรคีด (fiber tracheid) เซลล์ที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำคือเซลล์เวสเซล (vessel element) ซึ่งมีช่องว่างขนาดใหญ่ เซลล์ที่เก็บอาการ คือเรย์พาเรนไคมาเซลล์ (ray parenchyma cell) เส้นใยของไม้เนื้อแข็งจะมีความยาวประมาณ 1.1-1.2 มิลลิเมตร มีความกว้างประมาณ 14-40 ไมโครเมตร ส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้จากไม้เนื้อแข็งมีความแข็งแรงต่ำกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่จะมีความเรียบเนียนมากกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน

2.1.2.1.2 เส้นใยที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (non-wood fiber) หมายถึงเส้นใยที่ได้จากพืชชนิดอื่นๆ ซึ่งได้จากส่วนเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย พืชตระกูลหญ้า เช่น ไม้ไผ่ และพืชเส้นใยต่างๆ เช่น ปอ ฝ้าย เป็นต้น

2.1.2.2 โครงสร้างของเส้นใย

ผนังของเส้นใยประกอบด้วย 3 ชั้นหลัก ๆ [6, 9] ดังแสดงในภาพที่ 2-4 ดังนี้



ภาพที่ 2- 4 โครงสร้างของเส้นใย [10]

2.1.2.2.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella, M) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างเซลล์ ทำหน้าที่ยึดให้เซลล์อยู่ด้วยกัน ช่วงแรก ๆ ของการเจริญเติบโตประกอบด้วยเพกติน (pectin) หลังจากนั้นลิกนินจะเพิ่มปริมาณสูงขึ้น โดยความหนาของชั้นนี้ประมาณ 0.2-1.0 ไมโครเมตร

2.1.2.2.2 ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall, P) เป็นชั้นบางมีความหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมโครเมตร ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกติน โปรตีน และลิกนิน ในชั้นนี้เส้นใยขนาดย่อยของเซลลูโลสเป็นโครงข่ายที่ไม่เป็นระเบียบ และมีปริมาณลิกนินสูงถึงร้อยละ 20-25 ของลิกนินทั้งหมด

2.1.2.2.3 ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall, S) ประกอบด้วยชั้นของเส้นใยขนาดย่อยที่เรียงตัวขนานกัน ซึ่งมีลิกนินและเฮมิเซลลูโลสอยู่ด้วย แบ่งเป็นชั้นย่อย 3 ชั้น คือ ชั้น S_1 ชั้น S_2 และ ชั้น S_3 ตามการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย โดยชั้น S_1 มีขนาดบาง

ประมาณ 0.2-0.3 ไมโครเมตร ชั้น S_2 มีขนาดหนาที่สุดประมาณ 1-5 ไมโครเมตร เป็นส่วนหลักของผนังเซลล์ และชั้น S_3 เป็นชั้นบางประมาณ 0.1 ไมโครเมตร

2.1.2.2.4 ลูเมน (lumen)

มีลักษณะเป็นท่ออยู่ใจกลางของเส้นใย อยู่ถัดจากผนังเซลล์เส้นใยชั้นที่ 2 หรือ 3 เข้าไป ลูเมนจะเป็นบริเวณที่ให้สารเคมีในกระบวนการต้มเยื่อซึมเข้ามา

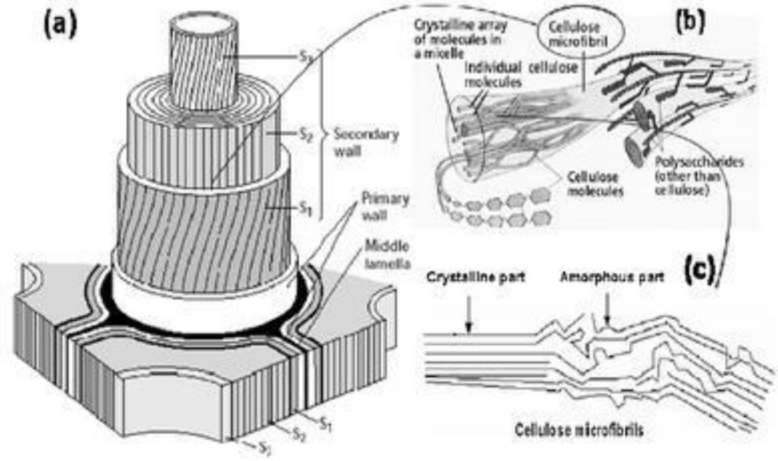
2.1.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้

องค์ประกอบหลักของพืช ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกดังรายละเอียดดังนี้ [6,11]

2.1.2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงของแอนไฮโดร-ดี-กลูโคส ซึ่งต่อกันด้วยพันธะเบต้า-(1,4) ไกลโคซิดิก โดยความยาวของสายโซ่เซลลูโลส (degree of polymerization, DP) คือ จำนวนหน่วยกลูโคสที่มาเชื่อมกันเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งในเนื้อไม้จะมี DP อยู่ระหว่าง 10,000-15,000 ขึ้นกับแหล่งของเซลลูโลส เซลลูโลสประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนผลึก (crystalline region) คือบริเวณที่โมเลกุลที่เรียงตัวอย่างหนาแน่น เป็นระเบียบ จึงมีความแข็งแรงสูง สามารถต้านทานต่อตัวทำละลายหรือสารเคมี มีประมาณร้อยละ 50-70 ของเซลลูโลสในเนื้อไม้ซึ่งเป็นแกนหลัก และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) คือบริเวณที่มีการจัดเรียงอย่างหลวม ๆ มีความหนาแน่นต่ำ รับน้ำและความชื้นได้ดี ส่งผลให้เกิดการซึมของตัวทำละลายหรือสารเคมีได้ง่าย และเป็นบริเวณที่ไม่แข็งแรง มีความยืดหยุ่น ตามภาพที่ 2-5

โมเลกุลของเซลลูโลสจะมีการเรียงตัวรวมกันเป็นเส้นใยขนาดย่อย (microfibril) คล้ายเส้นด้ายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.5 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน

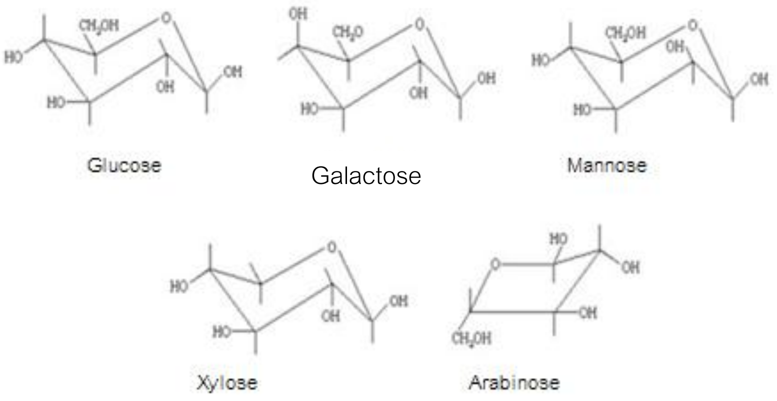


ภาพที่ 2- 5 โครงสร้างของเซลลูโลสและเส้นใยขนาดเล็กและส่วนของเส้นใย

ส่วนผลึกและอสันฐาน [12]

2.1.2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรค์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม คือ กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) กาแลกโตส (galactose) และน้ำตาล 5 อะตอม คือ ไซโลส (xylose) อะราบิโนส (arabinose) ดังแสดงในภาพที่ 2-6 มีความยาวของสายโซ่ประมาณ 150-200 หน่วย เฮมิเซลลูโลสมีปริมาณร้อยละ 20 – 30 ของน้ำหนักแห้งของเนื้อไม้ เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งก้านไม่เหมือนกับเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง มีการเรียงตัวเป็นแบบผลึก (crystalline) น้อยส่วนมากจะมีการเรียงตัวเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous)

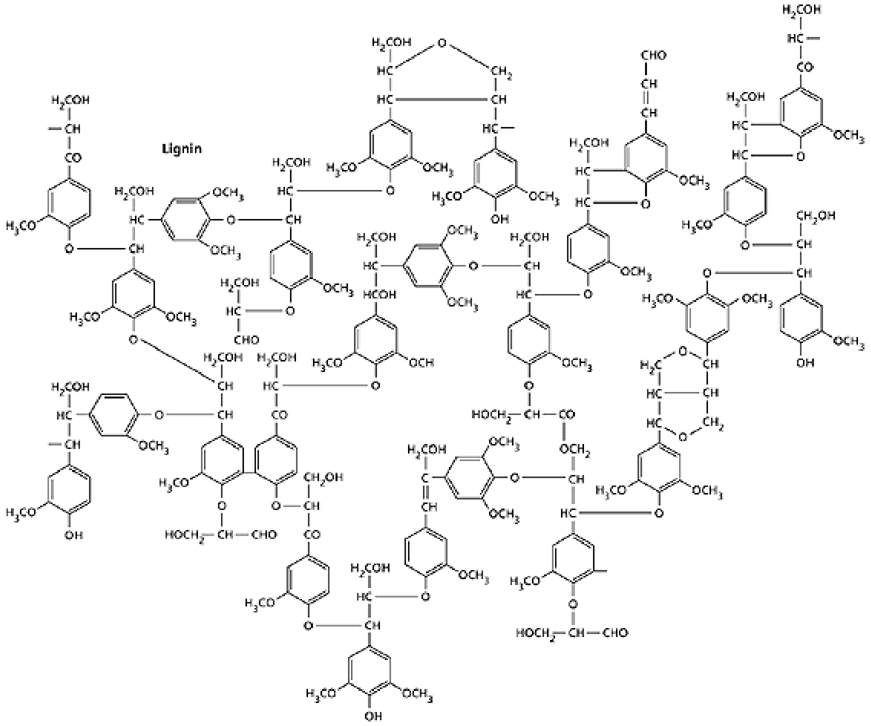


ภาพที่ 2- 6 โครงสร้างของโมเลกุลน้ำตาล [13]

เฮมิเซลลูโลสถูกละลายและเปลี่ยนรูปได้ง่าย คือมีความไวต่อการถูกทำลายมากกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะสามารถละลายในสารละลายด่างเจือจางที่อุณหภูมิสูง เช่น การผลิตเยื่อแบบคราฟท์ ข้อดีของเฮมิเซลลูโลส คือ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ โดยเฉพาะความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และการหักพับของกระดาษ เพราะเป็นตัวช่วยการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย โดยธรรมชาติของเฮมิเซลลูโลสมีความชอบน้ำและโครงสร้างไม่เป็นผลึก ส่งผลให้เส้นใยบวมน้ำง่าย และช่วยในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยในการขึ้นแผ่นกระดาษ

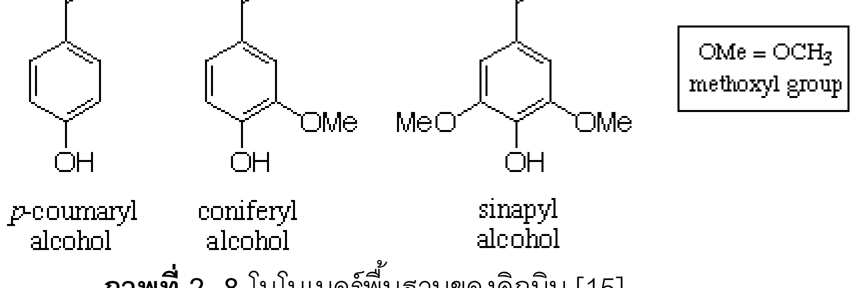
2.1.2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วย หน่วยเฟนิลโพรเพน (phenylpropane unit) และมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน เป็นโครงสร้างสามมิติ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและยากต่อการวัด ดังภาพที่ 2-7 ลิกนินทำหน้าที่เป็นกาวหรือตัวยึดในเนื้อไม้เพื่อยึดเส้นใยให้อยู่ด้วยกัน พบลิกนินมากในชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella) มีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature) ที่ประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2- 7 โครงสร้างของลิกนินบางส่วนของต้น Beech [14]

ลิกนินมีโมโนเมอร์พื้นฐานอยู่ 3 รูปแบบ คือ คือ แบบ p-coumaryl alcohol แบบ coniferyl alcohol และแบบ sinapyl alcohol ดังแสดงในภาพที่ 2-8 โดยพวกหญ้าหรือลำต้นของพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ (non wood plant) จะพบโมโนเมอร์ทั้งสามแบบ ส่วนในไม้เนื้อแข็ง (hard wood) จะพบโมโนเมอร์แบบ coniferyl alcohol ร้อยละ 50-75 และแบบ sinapyl alcohol ร้อยละ 25-50 ส่วนไม้เนื้ออ่อนจะพบแบบ coniferyl alcohol เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 2- 8 โมโนเมอร์พื้นฐานของลิกนิน [15]

2.1.2.3.4 สารแทรก (extractives)

ในเนื้อไม้มีสารแทรกอยู่ปริมาณน้อย ประมาณร้อยละ 5 ซึ่งสามารถสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์หรือน้ำ สารแทรกเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสี กลิ่น รส และเป็นสารต้านการเสื่อมสภาพของไม้ สารแทรกเป็นสารที่มีความหลากหลายขึ้นกับชนิดของไม้ ถึงแม้ว่าสารแทรกถูกกำจัดออกในกระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมี แต่บางทีก็ยังคงเหลือในกระบวนการผลิตกระดาษ ซึ่งปริมาณสารแทรกที่หลงเหลือในระบบขึ้นกับกระบวนการผลิตเยื่อ โดยสารแทรกที่เป็นกรด เช่น เรซิน และกรดไขมัน จะถูกกำจัดได้ง่ายด้วยด่าง สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ สารแทรกอาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษได้ เช่น ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อมากขึ้น อาจทำให้เกิดตะกรันตามท่อหรืออุปกรณ์ในระบบการผลิต เกิดฟองมากขึ้นในระหว่างการล้างเยื่อทำให้เยื่อล้างสะอาดยากขึ้น และอาจทำให้เกิดพวกยางเหนียว (stickies) ทำให้กระดาษขาด รบกวนการเดินกระดาษและทำให้กระดาษเสียหายได้

2.1.3. กระบวนการผลิตกระดาษ

การผลิตเยื่อ คือ กระบวนการที่ทำให้เส้นใยถูกแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยการแยกเส้นใยนั้นมีกำจัดลิกนินออกจากชิ้นไม้หรือทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง เพื่อนำเส้นใยไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ [6,11,16]

2.1.3.1 การผลิตเยื่อเชิงกล

เยื่อเชิงกลเป็นเยื่อที่ผลิตโดยอาศัยแรงกลอย่างเดียว ไม่ใช่สารเคมีในการผลิต โดยมักใช้กับไม้เนื้ออ่อนที่มีสีอ่อนและไม่มีเรซิน และไม้เนื้อแข็งบางชนิด ซึ่งให้ผลผลิตประมาณร้อยละ 90-98 โดยที่ลิกนินยังคงอยู่ในเยื่อ เยื่อเชิงกลเป็นเยื่อที่ฟ่าม แข็ง และให้ความทึบแสงของกระดาษสูง แต่ให้ความแข็งแรงของกระดาษต่ำเนื่องจากยังคงมีลิกนินอยู่ ทำให้การสร้างพันธะไฮโดรเจนไม่ดี และยังเป็นสาเหตุให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเจอแสงและอากาศ การใช้เยื่อเชิงกลจึงนำไปใช้กับกระดาษไม่เก็บถาวร เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ นอกจากนี้การผลิตเยื่อเชิงกลต้องใช้พลังงานมากในการผลิต

2.1.3.2 การผลิตเยื่อเชิงเคมี

การผลิตเยื่อเชิงเคมีเป็นการทำลายโครงสร้างทางเคมีของลิกนินละลายออกมากับของเหลว โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า Delignification แต่อย่างไรก็ตามสารเคมีไม่ได้ละลายลิกนินเพียงอย่างเดียว เพราะสารเคมีอาจละลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสออกมาด้วย ดังนั้นการผลิตเยื่อเชิงเคมีได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 40-50 [11,16]

2.1.3.2.1 การผลิตเยื่อเชิงเคมีแบบด่าง (alkaline process)

การผลิตเยื่อเชิงเคมีแบบโซดา โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และการผลิตเยื่อแบบคราฟท์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซัลไฟด์ (NaS_2) เพื่อไปตัดโมเลกุลของลิกนินเป็นโมเลกุลเล็กกลายเป็นเกลือโซเดียมและละลายออกมา วิธีการผลิตเยื่อแบบคราฟท์ได้ประยุกต์จากกระบวนการผลิตแบบโซดา คือการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ข้อดีคือ เยื่อมีความแข็งแรง สามารถนำสามารถเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ใช้ได้กับไม้หลายชนิด และสามารถใช้กับส่วนของเปลือกได้ แต่ข้อเสียคือ เยื่อมีสีน้ำตาลเข้ม

2.1.3.2.2 การผลิตเยื่อเชิงเคมีแบบกรด (sulfite process)

เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบกรดโดยใช้สารเคมี 2 ชนิดคือ กรดซัลฟิวรัส (H_2SO_3) และไบซัลไฟต์ไอออน (HSO_3^-) เพื่อเข้าไปทำลายและละลายลิกนินออก โดยซัลไฟต์จะเข้าไปจับกับลิกนินให้อยู่ในรูปเกลือของกรดลิกโนซัลฟอนิก โดยไอออนที่มาจับกับไบซัลไฟต์ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และแอมโมเนีย เยื่อจากกระบวนการแบบกรดจะได้สีอ่อนกว่าเยื่อคราฟท์ สามารถนำไปฟอกต่อได้ง่ายกว่า และได้ผลผลิตของการฟอกมากกว่า แต่เยื่อก็จะไม่แข็งแรงเท่าเยื่อคราฟท์ จึงทำให้กระดาษมีความแข็งแรงน้อยกว่ากระดาษจากเยื่อคราฟท์ และสารเคมีจากการผลิตเยื่อยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่

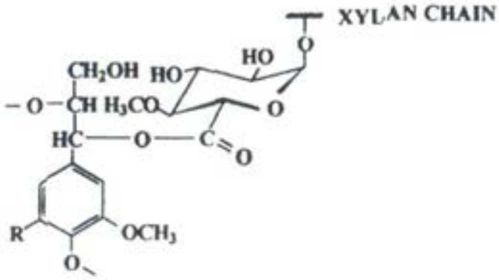
2.1.3.2.3 การผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารละลายอินทรีย์

เป็นกระบวนการกำจัดลิกนินด้วยสารละลายอินทรีย์ละลายเอาลิกนินออกมา โดยการใช้ความร้อนเพื่อให้กลุ่มอะซิติลแตกตัว และเกิดการรวมตัวของกรดแอซีติกอิสระซึ่งเกิดจากการกำจัดลิกนินออก และนำสารที่ได้กลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นข้อดีการผลิตเยื่อด้วยสารละลายอินทรีย์ เนื่องจากใช้พลังงานน้อยในการนำสารกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ข้อดีอื่นๆ ได้แก่ การผลิตเยื่อด้วยสารละลายอินทรีย์ไม่ทำลายเซลลูโลส

และเฮมิเซลลูโลส และเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบคราฟท์ พบว่า กระบวนการนี้ให้ผลผลิตมากกว่าและความสามารถในการฟอกเยื่อสูงกว่า [11,17]

2.1.4. ปฏิกิริยาขององค์ประกอบเคมีในเส้นใยในการผลิตเยื่อเคมี

โมเลกุลลิกนินกับคาร์โบไฮเดรตในไม้เชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยลิกนินเชื่อมติดกับสายไซแลนที่หมู่เอสเตอร์กับ 4-O-methyl-D-glucuronic acid ดังภาพที่ 2-9 โดยปกติลิกนิน มีสมบัติไม่ละลายน้ำ (insoluble) เนื่องจากมีหมู่ที่ชอบน้ำเพียงเล็กน้อย กระบวนการผลิตเยื่อเชิงเคมีทั้งภาวะด่าง กรด และกลางนั้น เป็นการเพิ่มความสามารถในละลายของลิกนิน และ/หรือ ลดความยาวของสายโซ่ (degree of polymerization) นอกจากนี้ในการผลิตเยื่อจะมีส่วนของคาร์โบไฮเดรตถูกทำลายทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ความแข็งแรงลดลง และผลผลิตของเยื่อก็ลดลงด้วยจากการถูกทำลาย [11,16]

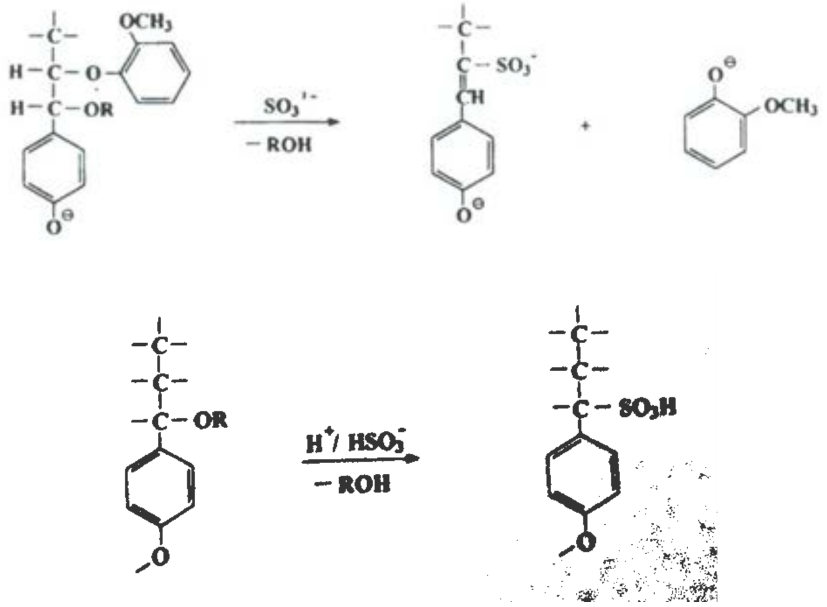


ภาพที่ 2- 9 พันธะระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต [11]

2.1.4.1 ปฏิกิริยาในการผลิตเยื่อแบบกรด

การผลิตเยื่อแบบกรด หรือซัลไฟต์โดยใช้ กรดซัลฟิวรัสอิสระ (H_2SO_3) และไบซัลไฟต์ไอออน (HSO_3^-) ซึ่งไบซัลไฟต์ไอออนจะจับกับเบส 4 ตัวได้แก่ แคลเซียมจากหินปูนเป็นแคลเซียมไบซัลไฟต์ แมกนีเซียมจากแมกนีเซียได้ แมกนีเซียมไบซัลไฟต์ โซเดียมจากโซดาไฟเป็นโซเดียมไบซัลไฟต์ และแอมโนเนียมจากแอมโมเนียกลายเป็นแอมโมเนียมไบซัลไฟต์ ซึ่งเบสแต่ละตัวจะให้ค่าความเป็นกรดด่างต่างกัน การกำจัดลิกนินด้วยปฏิกิริยา sulfonation ดังแสดงในภาพที่ 2-10 คือ กรดซัลฟิวรัสอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับบริเวณแอลฟาและบีต้าคาร์บอนของลิกนินเกิดเป็นกรดลิกโนซัลโฟนิกซึ่งไม่ละลายน้ำ จากนั้นเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเบสเพื่อให้เกิดเกลือของกรดซัลโฟนิกที่มีความชอบน้ำ เกิดเป็นซัลโฟเนตลิกนินที่เป็นการแตกตัวให้มีขนาดโมเลกุลที่ลดลงและละลายน้ำมากขึ้น โดยเกิดร่วมกับปฏิกิริยาการสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ในการแตกพันธะเพื่อลดน้ำหนักโมเลกุล โดยอาจเข้าไปทำลายเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อลดลง ซึ่งอัตราการ

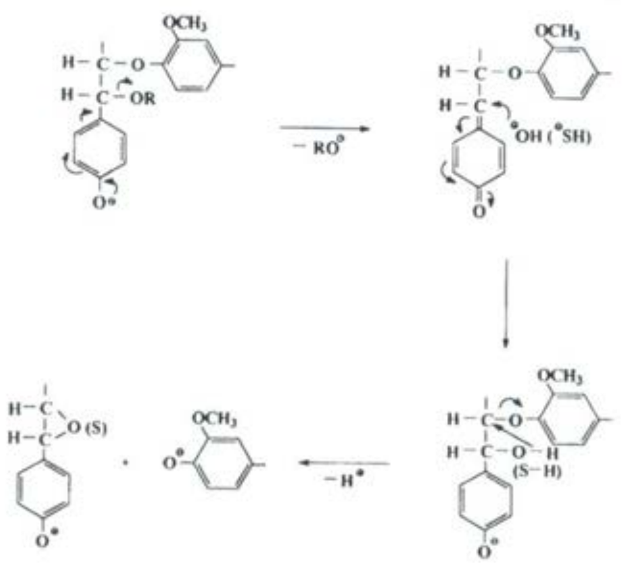
ซึมของสารเคมีเข้าในส่วนที่เกิดปฏิกิริยานั้นเป็นอีกปัจจัยสำคัญต่ออัตราการกำจัดลิกนิน เพราะลิกนินมีน้ำหนักโมเลกุลมาก จึงยากที่สารเคมีจะผ่านผนังเซลล์ของเส้นใย



ภาพที่ 2- 10 ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินในการผลิตเยื่อแบบกรด [11]

2.1.4.2 ปฏิกิริยาในการผลิตเยื่อแบบด่าง

การกำจัดลิกนินในกระบวนการผลิตเยื่อแบบด่างมี 2 แบบคือ การผลิตเยื่อแบบโซดาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และการผลิตเยื่อแบบคราฟท์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) การใช้โซเดียมซัลไฟด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิต ซึ่งเกิดปฏิกิริยาของการผลิตเยื่อแบบด่างมีความซับซ้อนมากกว่าการผลิตเยื่อแบบกรด กลไกการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในภาพที่ 2-11 คือ หมู่ phenolic hydroxyl เกิดเป็นไอออน phenoxide ซึ่งสามารถกำจัดหมู่ alkoxy ออกได้และไอออน OH- หรือ SH- สามารถเข้าแทนที่ และตัดที่จุด ß-aryl ether จึงเกิดเป็นหมู่ phenolic อิสระที่เพิ่มความสามารถในการละลาย ในส่วนของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกทำลายและละลายออกมาบางส่วน ในการผลิตเยื่อลิกนินถูกละลายออกประมาณร้อยละ 80 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 50 และเซลลูโลสประมาณร้อยละ 10



ภาพที่ 2- 11 ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินในการผลิตเยื่อแบบด่าง [11]

2.1.5. **กระดาษลูกฟูก** (corrugated board)

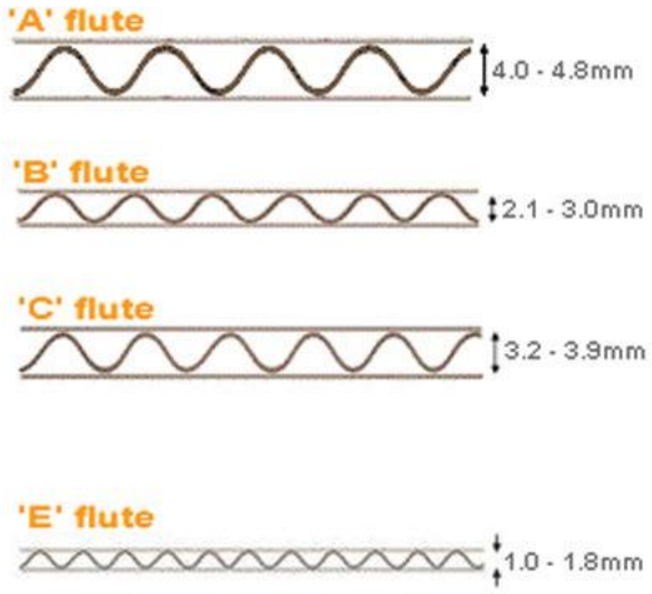
กระดาษลูกฟูก มีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ กระดาษผิวกล่อง (Liner board) และกระดาษลอนลูกฟูก (Corrugated Medium) ดังแสดงในภาพที่ 2-12 โดยทั่วไปใช้เพื่อบรรจุสินค้าเพื่อการขนส่ง เยื่อกระดาษที่ใช้ในการผลิตกระดาษลูกฟูกนั้น ใช้ทั้งเยื่อบริสุทธิ์และเยื่อรีไซเคิล โดยทั่วไปเยื่อใยยาวให้ความแข็งแรงที่มากกว่าเยื่อใยสั้น จึงเหมาะกับการใช้ทำเป็นกระดาษผิวกล่อง ส่วนกระดาษลอนลูกฟูกใช้เยื่อใยสั้นกึ่งเคมี ซึ่งเยื่อใยสั้นมีราคาถูกกว่าและให้แรงต้านในแนวตั้งฉากกับลอนดี เยื่อใยสั้นมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าเยื่อใยยาว และให้โครงสร้างที่แข็งแรงกว่า [15, 19]

ภาพที่ 2- 12 ส่วนประกอบของกระดาษลูกฟูก [20]

- กระดาษผิวกล่อง ที่ทำมาจากเยื่อบริสุทธิ์ล้วนเรียกว่า Kraftliner ผลิตจากเยื่อเคมีด้วยกระบวนการคราฟท์ หรือเยื่อกึ่งเคมี โดยมีเยื่อใยยาวบริสุทธิ์เป็นหลักเพราะต้องการความแข็งแรง แต่ถ้าผสมเยื่อใยสั้นหรือเยื่อรีไซเคิล ซึ่งจะผสมอยู่ประมาณร้อยละ 20 จะ

เรียกว่า testliner ลักษณะของกระดาษผิวกล่องเป็นแผ่นเรียบ มีน้ำหนักมาตรฐานอยู่ระหว่าง 125-350 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้ประกบลอนลูกฟูกที่อยู่ด้านบนและล่าง

- กระดาษลอนลูกฟูก (corrugated medium) ทำมาจากเยื่อกึ่งเคมี และใช้เยื่อใยสั้นเพราะต้องการความแกร่งมากกว่าความแข็งแรง มีน้ำหนักมาตรฐานระหว่าง 112-180 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งกระดาษนำมาขึ้นเป็นลอนอยู่ระหว่างกระดาษผิวกล่อง เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการโค้งงอและแรงกดได้จากทุกทิศทาง ลอนลูกฟูกมีหลายแบบ ซึ่งจะแตกต่างที่ขนาดความสูงของลอนและลักษณะการใช้งานตามภาพที่ 2-13 และตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2- 13 ขนาดลอนของกระดาษลูกฟูก [21]

ตารางที่ 2-2 ประเภทของลอนลูกฟูก [19]

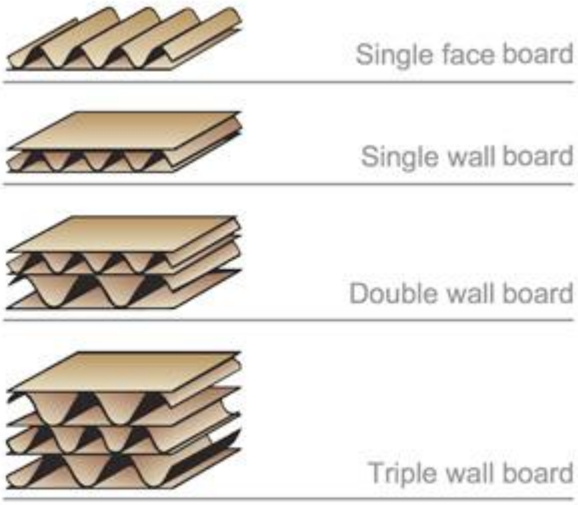
ชนิด	ความสูงของลอน (มิลลิเมตร)	จำนวนลอน/ เมตร	คุณสมบัติ
ลอน A	4.0-4.8	105-125	เหมาะกับสินค้าที่ต้องการรับน้ำหนักการเรียงซ้อนมาก และไม่เน้นการพิมพ์
ลอน B	2.1 - 3.0	150-185	เหมาะกับสินค้าที่รับน้ำหนักได้ด้วยตัวมันเอง เช่น กระป๋องเหล็ก
ลอน C	3.2 - 3.9	120-145	เป็นที่นิยมใช้กันมาก เหมาะกับสินค้าทั่วๆไปที่รับน้ำหนัก ได้ปานกลาง
ลอน E	1.0 - 1.8	290-320	รองรับการพิมพ์ได้ดีที่สุด เหมาะกับกล่องไดคัทขนาดเล็ก หรือ กล่องออฟเซ็ท

2.1.5.1 ชนิดของกระดาษลูกฟูก

ชนิดของกระดาษลูกฟูกแบ่งตามชั้นของกระดาษได้ตามภาพที่ 2-9 มีรายละเอียดดังนี้ [7,18]

2.1.5.1.1 กระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (Single face) ประกอบด้วยกระดาษลอนลูกฟูก 1 ชั้นและกระดาษผิวกล่อง 1 ชั้น เหมาะกับการใช้กันกระแทก

2.1.5.1.2 กระดาษลูกฟูก 3 ชั้น (Single wall) ประกอบด้วยกระดาษผิวกล่องด้านหน้าและหลัง โดยตรงกลางเป็นกระดาษลอนลูกฟูก เหมาะกับสินค้าที่มีน้ำหนักปานกลาง หรือไม่เน้นความแข็งแรงมาก



ภาพที่ 2- 14 ชนิดของกระดาษลูกฟูก [22]

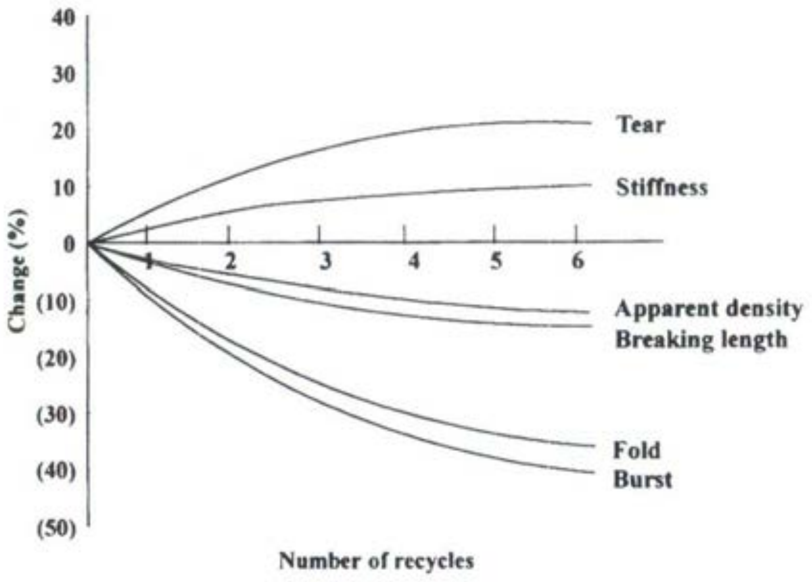
2.1.5.1.3 กระดาษลูกฟูก 5 ชั้น (Double wall) ประกอบด้วยกระดาษผิวกล่อง 3 แผ่นและกระดาษลอนลูกฟูก 2 แผ่น โดยกระดาษลอนลูกฟูกที่อยู่ติดกับผิวกล่องด้านนอกจะเป็นลอน B เพื่อประโยชน์แก่การพิมพ์ และกระดาษลอนลูกฟูกที่อยู่ด้านในจะเป็นลอน C เพื่อประโยชน์ทางด้านรับแรงกระแทก เหมาะกับสินค้าที่ต้องการการป้องกันสูง หรือมีน้ำหนักมาก

2.1.5.1.4 กระดาษลูกฟูก 7 ชั้น (Triple wall) ประกอบด้วยกระดาษผิวกล่อง 4 ชั้นและกระดาษลอนลูกฟูก 3 ชั้น เหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมหนัก ต้องรับน้ำหนักบรรจุเป็นปริมาณมาก

2.1.6 ผลของการรีไซเคิลกระดาษ

เยื่อรีไซเคิลเป็นแหล่งเส้นใยหลักในการผลิตกระดาษ ซึ่งมาจากกระดาษที่ใช้จากภายนอกโรงงาน โดยมากจากกล่องกระดาษเก่า กระดาษหนังสือพิมพ์ และส่วนใหญ่เป็นเยื่อเก่าที่ผ่านใช้งานมาหลายครั้ง ทำให้ผ่านการตีกระจายและการอบมาหลายครั้ง เหมือนกับผลของพอลิแซ็กคอไรด์ตัวอื่น โดยเฉพาะแป้ง จะเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อนโดยไม่สามารถกลับสภาพเดิม การรีไซเคิลเป็นสาเหตุหลักในการลดความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อการโค้งงอ และความหนาแน่นปรากฏ แต่เพิ่มความแข็งของกระดาษ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก และการผ่านของอากาศ ซึ่งเป็นผลของการเกิด Hornification คือเมื่อที่ผ่านการ

อบแห้ง ทำให้ช่องว่างในผนังเซลล์ที่การหดตัวที่ไม่สามารถกลับมาได้ ส่งผลต่อการสูญเสียการบวมตัวของเส้นใย เส้นใยไม่แนบตัวและทำให้เส้นใยแข็งมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-15 [11]



ภาพที่ 2- 15 ความสัมพันธ์ของจำนวนการรีไซเคิลต่อสมบัติต่างๆ [11]

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศุภลักษณ์ โอสถานนท์. [24] ศึกษาการนำกากมันสำปะหลังมาทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก โดยมีการคัดขนาดกากมันสำปะหลังเพื่อหาขนาดที่เหมาะสม จากนั้นนำไปผลิตเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการต้มพบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุด ซึ่งความร้อนที่เกินระดับนี้อาจทำให้แป้งในกากมันสำปะหลังสุกได้ เพราะอุณหภูมิที่ทำให้แป้งสุกคือ 65 องศาเซลเซียส และการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้แป้งบวมตัวและเส้นใยนิ่มตัวมากขึ้น ทำให้เส้นใยกากมันสำปะหลังแนบตัวกับเส้นใยรีไซเคิลมากขึ้น และจากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 15 ต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้งให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกสูงที่สุด

สาวิตรี พิสุทธิ์พิเชฎฐ์ [25] ศึกษาการใช้กากมันสำปะหลังเพื่อทดแทนเยื่อกระดาษจากกล่องกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้วเพื่อผลิตกระดาษลอนลูกฟูก พบว่าก่อนการผลิตกระดาษต้องคัดขนาดกากก่อน เนื่องจากกากมีลักษณะเป็นมัดเส้นใยมากกว่าอยู่เป็นเส้นใยเดี่ยว ทำให้การสานตัวกันไม่ดีส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ และเมื่อนำกากมาบดด้วยเครื่อง PFI mill ทำให้ความแข็งของกระดาษเพิ่มขึ้น การบดมีผลต่อการระบายน้ำออกจากแผ่นเยื่อ เพราะว่ากากมันสำปะหลังมีการระบายน้ำช้ามาก สัดส่วนการผสมกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิลจากกระดาษกล่องลูกฟูกเก่า (OCC) ไม่ควรเกิน 20:80 (กากมันสำปะหลัง:เยื่อรีไซเคิล) เพื่อทำให้ค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างจากกระดาษจากเยื่อรีไซเคิล

LÓpez และคณะ [26] เปรียบเทียบกระดาษจากต้นมะกอกจากการผลิตที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือวิธีโซดาความเข้มข้นร้อยละ 8 ที่อุณหภูมิ 174 องศาเซลเซียส นาน 45 นาที ซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 12.5 ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที และคราฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที พบว่า เยื่อคราฟต์ให้โฮโลเซลลูโลสและผลผลิตที่ได้มากที่สุด ส่วนเยื่อซัลไฟต์ให้ความขาวสว่างสูงสุด ค่าความยาวเมื่อขาดและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของเยื่อโซดาและซัลไฟต์มีค่าใกล้เคียงกัน และความแข็งแรงต่อแรงฉีกของเยื่อซัลไฟต์มีค่าสูงสุด

CaparrÓs และคณะ [27] ศึกษาการผลิตเยื่อจากก้านทานตะวันโดยใช้เอทานอล โดยเปรียบเทียบ 2 ภาวะคือ ภาวะอ่อนโยนด้วยความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที และภาวะรุนแรงด้วยความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 70 ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที พบว่า ผลผลิตที่ได้ เฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลงเมื่อใช้สภาวะที่รุนแรง แต่ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สมบัติกระดาษทางกายภาพคือ ความยาวเมื่อขาด ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้นด้วย

Ligero และคณะ [28] ศึกษาการผลิตเยื่อจากก้านต้น cardoon ด้วยกรดแอซีติก โดยเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ 60-180 นาที ความเข้มข้นของกรดแอซีติกระหว่างร้อยละ 60-90 และความเข้นข้นของกรดไฮโดรคลอริกระหว่างร้อยละ 0.20-0.80 พบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการคำนวณคือ เวลาการผลิตเยื่อที่ 180 นาที ความเข้มข้นของแอซีติกมากกว่าร้อยละ 71.3 และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่มากกว่าร้อยละ 0.40 ที่ทำให้ค่าเลขคัปปาน้อยกว่า 25 และได้ผลผลิตของเยื่อมากที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. กากมันสำปะหลัง จากบริษัท เยนเนรัลสตาร์ช จำกัด
2. เยื่อใยสั้น (เยื่อยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอก เกรดการค้า) จากบริษัท ฟินิคซ พัลพแอนด์ เพเพอร์ จำกัด (มหาชน)
3. กระดาษกล่องลูกฟูกเก่าแบบกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น(OCC)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดห้องปฏิบัติการ, ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 บริษัท Merck, Germany
5. โซเดียมไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) เกรดห้องปฏิบัติการ,ความบริสุทธิ์ร้อยละ 40 บริษัท Sigma Aldrich, Germany
6. เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 บริษัทศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
7. แอซีติก ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100 บริษัท Merck, Germany
8. กระดาษกรองเบอร์ 4 จากบริษัท Whatman International Ltd., England

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องขึ้นแผ่น (sheet former) รุ่น Rapid KÖthen Blattbildner, PTI Laboratory Equipment, Austria
2. เครื่องบดเยื่อ (Valley beater) รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporation, India
3. เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester) Universal Engineering, India
4. เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); Adirondack Machine Corporation, USA

5. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (0.1-21 kg) รุ่น GX-20K, AND, Japan
6. เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง (0.005-4000 g) รุ่น TB-4002, Denver Instrument, Germeny
7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (0.1-1010 g) รุ่น PG1003-S, Mettler Toledo,
8. เครื่องวัดความชื้น (Moisture Determination Balance) รุ่น KettFD-600, Kett Electric Laboratory, USA
9. เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Analysis Quality)Optest, Canada
10. เครื่องกวนน้ำเยื่อ รุ่น HT120DX, Daihan Scientific, Korea
11. ตู้อบ (Hot air oven) รุ่น Venticell, Germeny
12. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) รุ่น N-193VT, AMC, USA
13. เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness Tester) รุ่น LTDA, Regmed, Brazil
14. เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength Tester) รุ่น Strograph E-S, ToyoseikiSeisaku-SHO Ltd., Japan
15. เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Elmendrof Tearing Resistance Tester) รุ่น Protear, Thwing-albert Instrument, USA
16. เครื่องตัดกระดาษเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก รุ่น Saltarapur, Universal Engineering Corporation, India
17. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength tester); รุ่น 002P Lorentzen & Wettre, Sweden
18. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength tester); รุ่น GT-7013-A1, Gotech testing machines, Taiwan
19. เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester)รุ่น Digi-bekk, Toyoseiki, Japan

20. เครื่องทดสอบการซึมผ่านลม (Gurley Air Permeability Tester)รุ่น No.158 Toyoseiki, Japan
21. เครื่องทดสอบความแข็งของกระดาษต่อการโค้งงอ (Bending Stiffness Tester) รุ่น 150-B, Taber, USA
22. ตะแกรงขนาด 25 เมซ
23. ตะแกรงขนาด 50 เมซ
24. กระบอกตวง ขนาด 25, 100, 1000 มิลลิลิตร
25. บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 100, 1000 มิลลิลิตร
26. แท่งแก้วคนสาร
27. เทอร์โมมิเตอร์

3.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกากมันสำปะหลังและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปทดแทนเยื่อรีไซเคิลสำหรับการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนที่ 1 การหาขนาดกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อ ขั้นตอนที่ 2 นำกากมันสำปะหลังจากขั้นตอนที่ 1 มาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลัง และขั้นตอนที่ 3 คือการนำกากมันสำปะหลังที่ผลิตเยื่อในภาวะที่เหมาะสมมาหาอัตราส่วนการทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก ดังแสดงในขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.1 การหาขนาดกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม

การหาขนาดกากมันสำปะหลังโดยการคัดขนาดผ่านตะแกรง นำขนาดกากมันสำปะหลังแต่ละส่วนมาวิเคราะห์เส้นใยและผสมเยื่อใยสั้นทางการค้าในอัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้น 5:95 และ 10:90 เพื่อทดสอบสมบัติกระดาษ ตามขั้นตอนดังนี้

3.3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.3.1.1.1 การเตรียมเยื่อใยสั้น

นำเยื่อยูคาลิปตัสฟอกขาวมาหาความชื้นเพื่อหาน้ำหนักแห้งให้ได้ 360 กรัม จากนั้นฉีกเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปแช่น้ำ 5 ลิตรเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมงก่อนจะนำมาบดด้วยเครื่องบดเยื่อ (valley beater) ดังภาพที่ 3-1 ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [29] เพราะฉะนั้นต้องเติมน้ำให้ให้ปริมาตรรวมได้ 23 ลิตร โดยความเข้มข้นของเยื่อจะเท่ากับร้อยละ 1.57 ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก เปิดเครื่องเพื่อตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 5 นาที หยุดเครื่องเพื่อวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเริ่มต้นตามมาตรฐาน TAPPI T 227om-99 [29] ด้วยเครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ดังภาพที่ 3-2 จากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักและจับเวลาเพื่อเริ่มการบด ให้ค่าสภาพระบายได้ประมาณ 350±20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเก็บไว้เพื่อผสมกากมันสำปะหลังและตัวอย่างควบคุมในการขึ้นแผ่นทดสอบ

ภาพที่ 3- 1 เครื่องบดเยื่อ (Valley beater) **ภาพที่** 3- 2 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้

นำกากมันสำปะหลังที่ได้จากโรงงานแป้งมันสำปะหลังจากขั้นตอนการสกัดแป้ง นำมาหาความชื้นของกากมันสำปะหลัง เพื่อคำนวณน้ำหนักแห้งก่อนการคัดขนาด

3.3.1.2 การคัดขนาดกากมันสำปะหลัง

นำกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมาคัดขนาดออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้ตะแกรงขนาด 25 เมช (ขนาดรูเปิด 0.707 มิลลิเมตร) และ 50 เมช (ขนาดรูเปิด 0.297 มิลลิเมตร) โดยจะร่อนผ่านน้ำซึ่งจะเป็นตัวพาเส้นใยกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงลงโดยแสดงตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ขนาดต่างๆ ของกากมันสำปะหลัง

ตัวอย่าง	ขนาดกากมันสำปะหลัง
A	เส้นใยกากมันสำปะหลังที่มีใหญ่กว่า 50 เมช
B	เส้นใยกากมันสำปะหลังขนาดระหว่าง 25-50 เมช
C	เส้นใยกากมันสำปะหลังขนาดเล็กกว่า 50 เมช

3.3.1.3 การวิเคราะห์คุณภาพกากมันสำปะหลัง

3.3.1.3.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใย

กากมันสำปะหลังที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรง 3 ส่วน แบ่งตัวอย่างเส้นใยกากมันสำปะหลังออกมาเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของเส้นใย โดยวัดความยาวของเส้นใย และกระจุกเส้นใยของกากมันสำปะหลังตามมาตรฐาน ISO 16065 [30] โดยทำการวัดเส้นใยแต่ละครั้งเป็นจำนวน 5000 เส้นและทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละตัวอย่างเพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยในแต่ละสัดส่วนด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใยดังแสดงในภาพที่ 3-3 จากนั้นวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเยื่อต่อไป

ภาพที่ 3- 3 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย

3.3.1.3.2 การวิเคราะห์สมบัติกระดาษ

- การเตรียมน้ำเยื่อและการขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบ

นำกากมันสำปะหลังจากข้อ 3.3.1.2 ซึ่งจะได้กากมันสำปะหลัง 3 ส่วน คือ A, B และ C มาผสมเยื่อใยสั้นในอัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้น ดังนี้ 5:95 และ 10:90 โดยปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อเป็นร้อยละ 0.3 เพื่อขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบที่น้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร การขึ้นแผ่นกระดาษใช้มาตรฐาน ISO 5269-2 [30] โดยเครื่อง Rapid-Köthen ดังแสดงในภาพที่ 3-4 ซึ่งเป็นเครื่องที่มี 2 ส่วน คือ ส่วนขึ้นแผ่นกระดาษเป็นการเทน้ำเยื่อที่ได้เตรียมไว้ และทำการกระจายเยื่อให้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จากนั้นดึงน้ำออกจนได้

แผ่นกระดาษที่หมาดขนาด 20 เซนติเมตร และส่วนอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 นาที

ภาพที่ 3- 4 เครื่องขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ

- การทดสอบสมบัติของแผ่นชิ้นทดสอบ

นำแผ่นชิ้นทดสอบทั้งหมดมาปรับสภาพในห้องควบคุมภาวะหลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นชิ้นทดสอบโดยไม่ทำลายแผ่นชิ้นทดสอบก่อน คือ สมบัติทั่วไปของกระดาษ เช่น น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ความหนา (thickness) ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) และความเรียบ (smoothness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 479 cm-99 [29] จากนั้นทำการทดสอบสมบัติที่ทำให้เกิดความเสียหายของแผ่นชิ้นทดสอบต่อมา คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 [29] ความแรงต่อแรงฉีก (tear strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [29] ความต้านแรงดันทะลุ (burst resistant) ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 [29] ดังนี้

– น้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ โดยมากมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรือแกรม ทำการวัดโดยชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นทดสอบแล้วหารด้วยพื้นที่ของแผ่นชิ้นทดสอบ

– ความหนา คือ ระยะในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้า 2 ด้านของแผ่นชิ้นทดสอบภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา ซึ่งทีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

– ความหนาแน่นปรากฏ เป็นค่าที่คำนวณได้จากน้ำหนักมาตรฐานจากข้อ 2.1.4.1.1 มาหารด้วยความหนาจากข้อ 2.1.4.1.2 ของแผ่นชิ้นทดสอบ

– ความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงสูงสุดที่แผ่นชิ้นทดสอบจะทนได้ก่อนที่แผ่นชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ทำการวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง แสดงในภาพที่ 3-5 ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 โดยทดสอบแผ่นชิ้นงาน 5 แผ่นละ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

ภาพที่ 3- 5 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

— ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ คือ ความต้านทานต่อแรงที่กระทำกับพื้นที่ของกระดาษในแนวตั้งฉากก่อนที่จะเกิดการขาดทะลุจากลูกยางที่พองตัวขึ้น ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 โดยใช้แผ่นชิ้นทดสอบ 5 แผ่นและวัดแผ่นละ 2 จุด มีหน่วยเป็นกิโลปาสคาล (kPa) จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานได้เป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ดังภาพที่ 3-6

ภาพที่ 3- 6 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

— ความต้านทานแรงฉีก คือ ความสามารถของแผ่นชิ้นทดสอบที่จะต้านแรงที่ใช้ฉีกต่อแนวตัดเริ่มต้น ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีกดังแสดงในภาพที่ 3-7 โดยใช้แผ่นชิ้นทดสอบ 5 แผ่นและฉีก 2 ครั้ง มีหน่วยเป็นมิลลินิวตัน (mN)จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

ภาพที่ 3- 7 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก

— ความเรียบ คือ ความเรียบของผิวแผ่นชิ้นทดสอบภายใต้ความดันประมาณ 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรด้วยเครื่องวัดความเรียบดังแสดงในภาพที่3-8 โดยใช้แผ่นชิ้นทดสอบ 5 แผ่นและวัดด้านละ 3 จุดต่อแผ่น โดยด้านที่วัดคือด้านตะแกงลวดขึ้นแผ่น (wire side) อีกจุดหนึ่งทำการวัดด้านผ้าสักหลาด (felt side) มีหน่วยเป็นวินาที

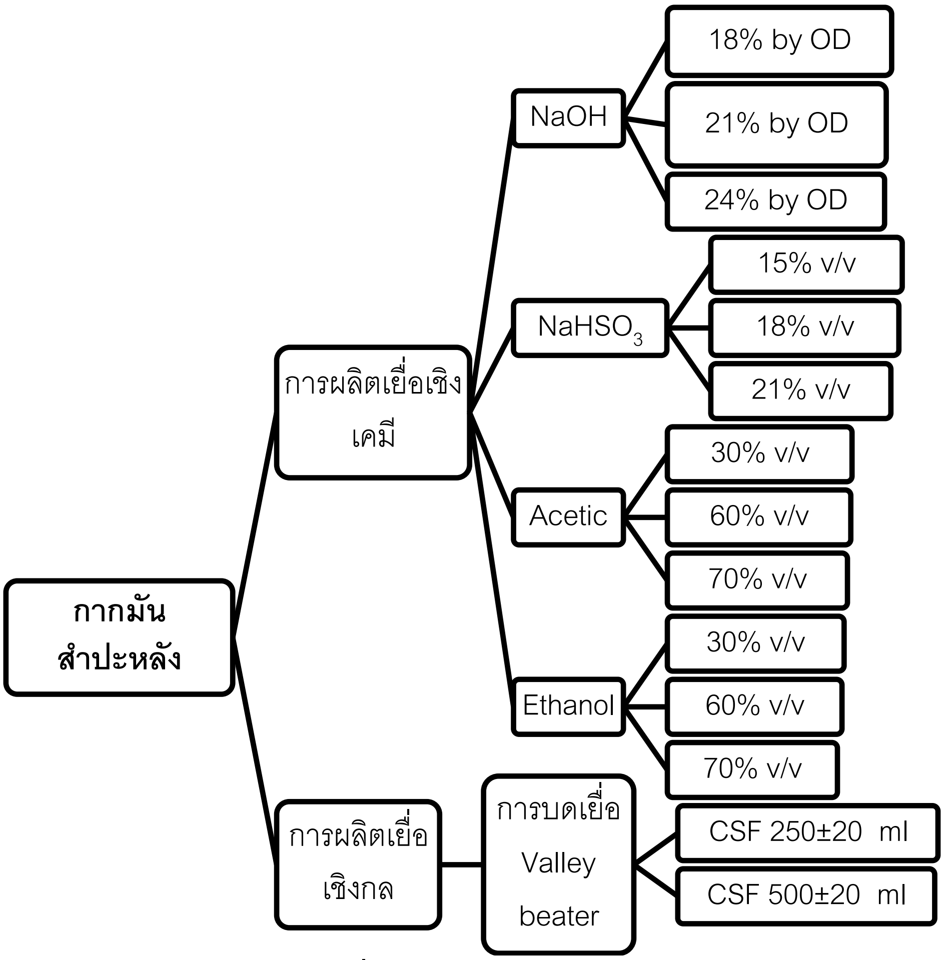
ภาพที่ 3- 8 เครื่องวัดความเรียบ

— การซึมผ่านลม (ความต้านอากาศ) คือ การวัดรูพรุนของแผ่นชิ้นทดสอบที่ยอมให้อากาศผ่านด้วยความดันและปริมาณที่คงที่ โดยรูพรุนขึ้นกับขนาด จำนวน และรูปร่างของรูพรุน โดยส่งผลต่อการดูดซึมของของเหลว ตามมาตรฐาน TAPPI T 460 om-02 [29] ด้วยเครื่องวัดการซึมผ่านลม โดยใช้แผ่นชิ้นทดสอบ 5 แผ่นและวัดแผ่นละ 2 จุด มีหน่วยเป็นวินาที แสดงในภาพที่ 3-9

ภาพที่ 3- 9 เครื่องทดสอบการซึมผ่านลม

3.3.2 การหาภาวะการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม

จากการหาขนาดกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม ในข้อ 3.3.1.2 เพื่อหาภาวะการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังขนาดที่เหมาะสมด้วยภาวะต่าง ๆ ดังนี้ โดยผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยสารเคมีแตกต่างกัน 4 ชนิด และความเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ โดยการผลิตเยื่อเคมีจะผลิตเยื่อด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที และการผลิตเยื่อเชิงกลด้วยการบดเยื่อ 2 ระดับแบ่งด้วยค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ของกากมันสำปะหลังที่ 500±20 และ 250±20 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3-10 หลังจากการผลิตเยื่อด้วยวิธีต่างๆ มาวิเคราะห์คุณภาพของเส้นใยและขึ้นแผ่นทดสอบเพื่อเปรียบเทียบจากสมบัติทางกายภาพที่อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้นคือ 10:90 เพื่อทดสอบทางกายภาพ ตามขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3-10 แผนงานการทดลอง

3.3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.3.1.2.1 การเตรียมเยื่อใยสั้น ตามขั้นตอนในข้อ 3.3.1.1.1

3.3.1.2.2 การเตรียมกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังที่ได้ขนาดที่เหมาะสมจากขั้นตอนในข้อ 3.3.1.2 นำมาหาความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น เพื่อคำนวณหาน้ำหนักแห้ง และเตรียมเข้าสู่การผลิตเยื่อ

3.3.2.2 การผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลัง

3.3.2.2.1 การผลิตเยื่อเชิงกล โดยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 ทำการคำนวณกากมันสำปะหลัง 360 กรัมแห้ง ใส่ลงในเครื่องบดเยื่อโดยเติมน้ำให้ปริมาตรรวมทั้งหมด 23 ลิตร โดยความเข้มข้นของเยื่อจะเท่ากับ 1.57 ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก เปิดเครื่องเพื่อตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 5 นาที หยุดเครื่องเพื่อวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเริ่มต้นตามมาตรฐาน TAPPI T 227om-04 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร ด้วยเครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness tester) โดยที่ค่าสภาพระบายได้บอกถึงการอุ้มน้ำของเยื่อ ซึ่งถ้ามีค่ามากคือเส้นใยอุ้มน้ำได้น้อย จากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักและจับเวลาเพื่อเริ่มการบด ให้ค่าสภาพระบายได้ประมาณ 500±20 และ 250±20 มิลลิลิตร

3.3.2.2.2 การผลิตเยื่อเชิงเคมี โดยใช้สารเคมี 4 ชนิดดังนี้

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 18, 21, 24 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง
- โซเดียมไบซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 15, 18, 21 โดยปริมาตรต่อปริมาตรทั้งหมด
- แอซีติกความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 โดยปริมาตรต่อปริมาตรทั้งหมด
- เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 โดยปริมาตรต่อปริมาตรทั้งหมด

นำกากมันสำปะหลังมาบรรจุลงในบอมบ์ขนาดเล็ก (bomb) ดังแสดงในภาพที่ 3-11 (ด้านซ้าย) ทำการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อและปริมาณน้ำที่เติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์ ทำการปิดฝาบอมบ์ให้แน่นและนำบอมบ์เข้าเครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester) ดังแสดงในภาพที่ 3-11 ด้านขวาเปิดสวิตซ์ทำความร้อนและทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในของหม้อต้มเยื่อเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสจนครบเวลา 120 นาที นำบอมบ์ออกจากเครื่องต้มเยื่อในภาพที่ 3-10 ด้านซ้าย เปิดน้ำหล่อบอมบ์ให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นเปิดฝาบอมบ์เพื่อนำเยื่อกากมันสำปะหลังออก ล้างเยื่อเพื่อเอาน้ำดำ (black liquor) และสารเคมีออกจากเยื่อ แล้วนำเยื่อมาปั่นให้หมาด ชั่งน้ำหนักเยื่อรวมที่ได้ทั้งหมดแล้วแบ่งเยื่อออกมาหาปริมาณความชื้น เพื่อนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อ (% pulp yield) ทำการเก็บเยื่อใส่ถุงและปิดปากถุงแช่ตู้เย็นเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

ภาพที่ 3-11 บอมบ์สำหรับบรรจุกากมันสำปะหลังและเครื่องต้มเยื่อ

3.3.2.3 การวิเคราะห์คุณภาพกากมันสำปะหลัง

3.3.2.3.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใย

การวิเคราะห์เส้นใยที่ได้จากทุกภาวะการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลัง และเยื่อใยสั้น ตามขั้นตอนที่ 3.3.1.3.1

3.3.2.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของกระดาษ

การวิเคราะห์สมบัติของการดาษ ตามขั้นตอนที่ 3.3.1.3.2 โดยอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้น คือ 10:90

3.3.2.3.3 นำค่าสมบัติของแผ่นกระดาษทดสอบมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้เทคนิค Single factor ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าความเข้มข้นของสารเคมีแต่ละภาวะการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลัง มีผลต่อสมบัติของแผ่นกระดาษทดสอบเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

3.3.3 การหาอัตราส่วนของเยื่อกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิล

ในขั้นตอนนี้คือการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก โดยใช้กระดาษรีไซเคิลผสมเยื่อกากมันสำปะหลังจากการผลิตเยื่อที่เหมาะสมจากข้อ 3 ในอัตราส่วนต่อเยื่อรีไซเคิลที่ระดับต่างๆ เพื่อขึ้นแผ่นทดสอบ

3.3.3.1 การเตรียมเยื่อรีไซเคิล

ในการทดลองนี้ใช้เยื่อรีไซเคิลจากกระดาษกล่องลูกฟูกเก่าแบบกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น มีลักษณะเป็นแผ่นใหญ่ มีการพิมพ์ลายและยังไม่ผ่านการใช้งาน มีความชื้นประมาณร้อยละ 10±2 โดยใช้กระดาษ OCC น้ำหนัก 2000 กรัมแห้ง นำกระดาษมาฉีกเป็นแผ่นเล็กๆ แช่ในน้ำ 30 ลิตร อย่างน้อย 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเข้าเครื่องตีกระจายเยื่อ (pulper) ดังแสดงในภาพ 3-12 เพื่อตีเส้นใยให้แยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยตีกระจายด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาทีและใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีแล้วหยุดเพื่อคนเยื่อให้ตีกระจายทั่วถึง ทำซ้ำอีกครั้ง จากนั้นตีกระจายด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วนำไปหาค่าสภาพระบายได้

ภาพที่ 3-12 เครื่องตีกระจายเยื่อ

3.3.3.2 การผสมเยือกากมันสำปะหลังในเยือรีไซเคิลขึนแผ่นกระดาษทดสอบ

ทำการเลือกเยื่อกากมันสำปะหลังที่ดีที่สุดจากการผลิตเยื่อแต่ละวิธีจากข้อ 3 มาผสมกับเยื่อรีไซเคิลด้วยอัตราส่วน 0:100, 5:95, 10:90 และ 20:80 จากนั้นนำไปขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร ตามวิธีข้างต้น และทดสอบสมบัติของกระดาษลูกฟูกทางกายภาพ ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความต้านอากาศ ความเรียบ และความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้งงอ ซึ่งใช้เครื่องทดสอบความแข็งของกระดาษต่อการโค้งงอ (Bending Stiffness Tester) คือ ความสามารถของกระดาษที่ต้านแรงโค้งงอในแนวตั้งฉากต่อปลายด้านที่เป็นอิสระ เพื่อให้กระดาษโค้งด้วยมุมที่เฉพาะเจาะจง แสดงในภาพที่ 3-13 ตามมาตรฐาน TAPPI T 556 wd-01 [29] โดยในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นชิ้นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 1 ครั้ง มีหน่วยเป็นมิลลินิวตัน (mN) โดยไม่ทดสอบสมบัติเชิงแสง เนื่องจากการวิจัยนี้ผลิตกระดาษลอนลูกฟูกซึ่งเป็นชั้นกระดาษที่อยู่ภายใน

ภาพที่ 3- 13 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของกระดาษต่อการโค้ง

3.3.3.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าสมบัติของแผ่นกระดาษทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Single factor ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อัตราส่วนการเติมเยื่อกากมันสำปะหลัง มีผลต่อสมบัติของแผ่นกระดาษทดสอบเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1. ผลการทดลองการหาขนาดของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.1 นี้เป็นผลของการทดลองเบื้องต้นซึ่งเป็นการทดลองหาขนาดที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อ โดยทำการคัดขนาดด้วยตะแกรง 2 ขนาดจะได้กากออกมา 3 ส่วน ตามตารางที่ 4-1 จากนั้นนำกากมันที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใยและทำการขึ้นแผ่นกระดาษโดยมีอัตราส่วนกากมันต่อเยื่อใยสั้น 2 ระดับ คือ 5:95 และ 10:90 เพื่อทดสอบสมบัติของเยื่อที่ขึ้นเป็นแผ่นกระดาษและนำผลมาเปรียบเทียบกับกระดาษจากเยื่อใยสั้น 100% โดยผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

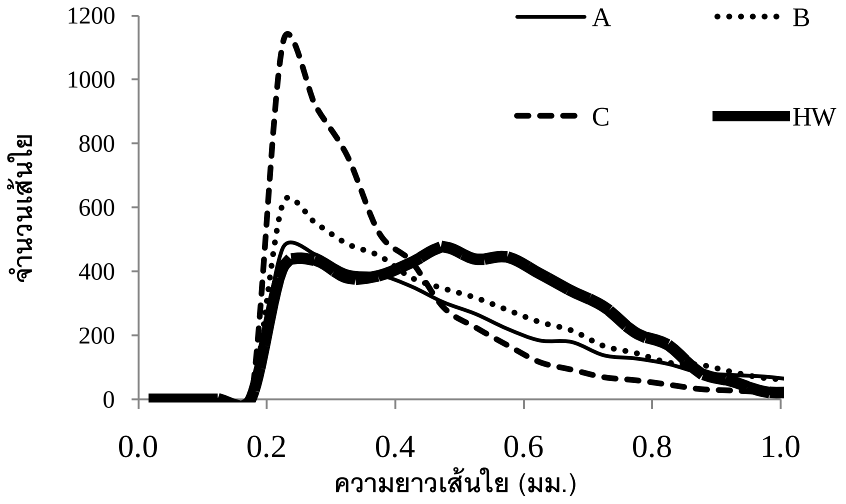
ตารางที่ 4-1 กากมันสำปะหลังขนาดต่างๆ

ตัวอย่าง	ขนาดกากมันสำปะหลัง
A	เส้นใยกากมันสำปะหลังที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 เมช
B	เส้นใยกากมันสำปะหลังขนาดระหว่าง 25-50 เมช
C	เส้นใยกากมันสำปะหลังขนาดเล็กกว่า 50 เมช

4.1.1. ปริมาณกากที่ได้ในแต่ละส่วนและสัณฐานวิทยาของเส้นใย

จากการทดลองหาขนาดกากมันสำปะหลังแต่ละส่วน และนำไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาเพื่อเปรียบเทียบกับเยื่อใยสั้นทางการค้า ได้ผลดังตารางที่ 4.2 พบว่า กากส่วน B มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ส่วน C และ A ตามลำดับ ซึ่งส่วน A ให้ความยาวของเส้นใยมากที่สุด โดยเมื่อเทียบจากความยาวของเยื่อใยสั้น พบว่า กากส่วน A และ B มีขนาดยาวกว่าเยื่อใยสั้น แต่ส่วน C มีความยาวน้อยกว่าเยื่อใยสั้น และเมื่อศึกษาการกระจายตัวของความยาวเส้นใย (Fiber length distribution) ดังแสดงในภาพที่ 4-1 กากมันสำปะหลังในส่วน C มีเส้นใยขนาดสั้นอยู่จำนวนมาก และกากในส่วน A และ B มีเส้นใยขนาดสั้นปริมาณใกล้เคียงกับเยื่อใยสั้น ดังนั้นกากมันในส่วน C ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเยื่อใยสั้น จึงไม่เหมาะแก่การนำมาผ่านกระบวนการผลิตเยื่อ (pulping) ต่อเพราะมีโอกาสที่จะทำให้เส้นใยสั้นลงไปอีก และเส้นใยขนาดเล็กที่มีอยู่ก็ถูกทำลายได้ง่าย

นอกจากนี้กระจุกเส้นใยในส่วนนี้ก็มีจำนวนน้อยอยู่แล้ว ซึ่งไม่จำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการเพื่อแยกเส้นใยออกจากกันอีก ส่วนกากมันในส่วน Aและ B มีความยาวมากกว่าเยื่อใยสั้น และมีจำนวนกระจุกเส้นใยค่อนข้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกากมันสำปะหลังส่วน A จึงควรนำมาผ่านกระบวนผลิตเยื่อต่อ เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับผลิตกระดาษ ส่วนดัชนีความโค้งงอและดัชนีความหักงอของเส้นใยกากมันสำปะหลังมีความใกล้เคียงกันในแต่ละส่วน ความกว้างของเส้นใยกากมันสำปะหลังเป็นไปตามความยาวของเส้นใย



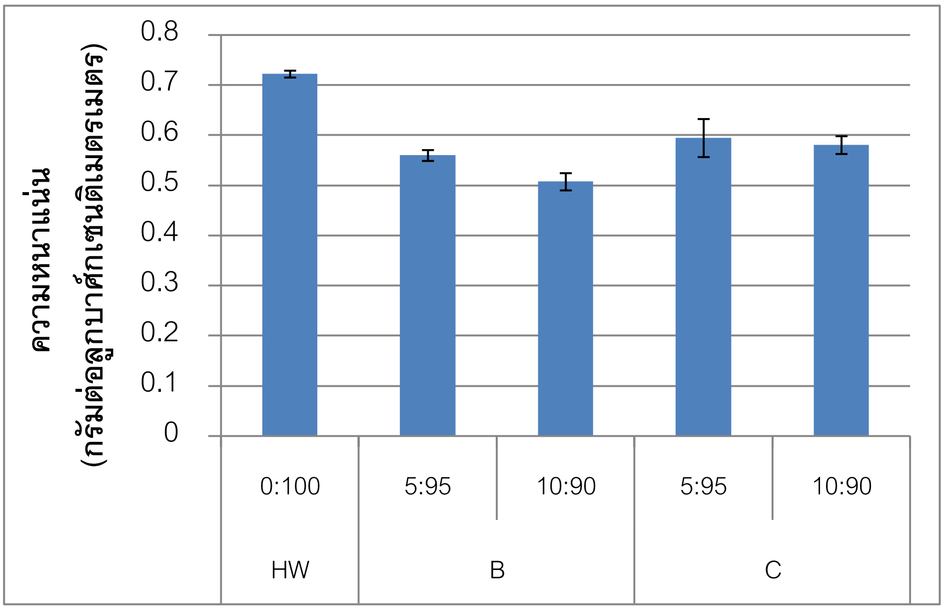
ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังส่วนต่างๆ และเยื่อใยสั้น

ตารางที่ 4-2 ปริมาณกากมัน และสัณฐานวิทยาของเส้นใยกากมันสำปะหลังในแต่ละส่วนเมื่อเทียบกับเยื่อใยสั้น (ค่าเฉลี่ย±SD)

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (%)	ความยาวเส้นใย แบบ LW (มม.)	จำนวนกระจุกเส้นใย (%)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร)	ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	ดัชนีความหักงอของเส้นใย (มม.$^{-1}$)
A	13.04	1.510±0.017	10.50	21.27±2.00	33.88±0.22	0.292±0.001	2.191±0.024
B	46.40	0.791±0.016	1.83	41.46±1.18	26.24±0.12	0.308±0.011	2.188±0.092
C	25.67	0.534±0.035	0.14	48.82±0.57	23.15±0.48	0.283±0.010	2.177±0.046
เยื่อใยสั้น	-	0.581±0.007	0.00	29.95±1.03	16.57±0.09	0.132±0.002	2.529±0.036

4.1.2. ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นชิ้นทดสอบ

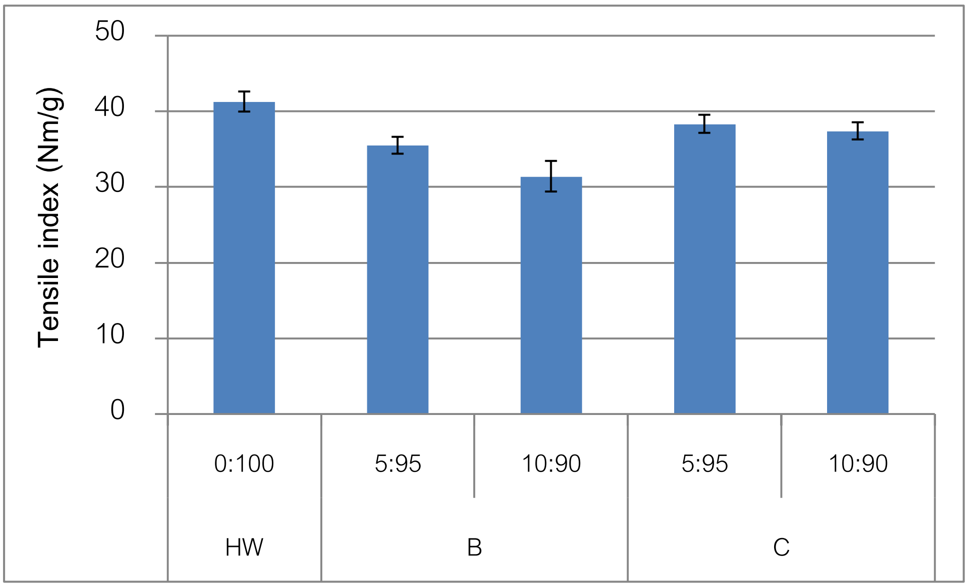
เนื่องจากปริมาณของกากมันสำปะหลังส่วน A มีน้อยไม่เพียงพอต่อการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ จึงนำแต่ส่วน B และ C มาขึ้นแผ่นทดสอบเท่านั้น ความหนาแน่นปรากฏของกระดาษเป็นค่าที่ได้มาจากการนำน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหารด้วยความหนาของกระดาษ ซึ่งความหนาแน่นของกระดาษมีความสัมพันธ์กับการสร้างพันธะหรือการแนบตัวกันได้ดี กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงเส้นใยมักแนบตัวกันได้ดี ทำให้พันธะระหว่างเส้นใยดี ความแข็งแรงของกระดาษจะมีค่าสูง แต่รูพรุนภายในเนื้อกระดาษลดลง ทำให้ความทึบแสงของกระดาษลดลง จากผลการทดลองดังภาพที่ 4-2 พบว่า ความหนาแน่นของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันน้อยกว่าเยื่อใยสั้น ทั้งนี้เนื่องจากเยื่อใยสั้นไม่มีกระจุกของเส้นใย และการที่เป็นเยื่อที่ผ่านการฟอกทำให้เส้นใยมีความอ่อนนุ่มทำให้การแนบชิดกันของเส้นใยมีมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบกากมันใน 2 ส่วน พบว่า ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังส่วน C สูงกว่าส่วน B อาจเนื่องจากส่วน B มีกระจุกเส้นใยอยู่มากกว่า และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากเป็นร้อยละ 10 ก็ยิ่งทำให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากจำนวนกระจุกเส้นใยในแผ่นมีมากขึ้น



ภาพที่ 4-2 ความหนาแน่นปรากฏของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น

4.1.3. ความแข็งแรงต่อแรงดึง

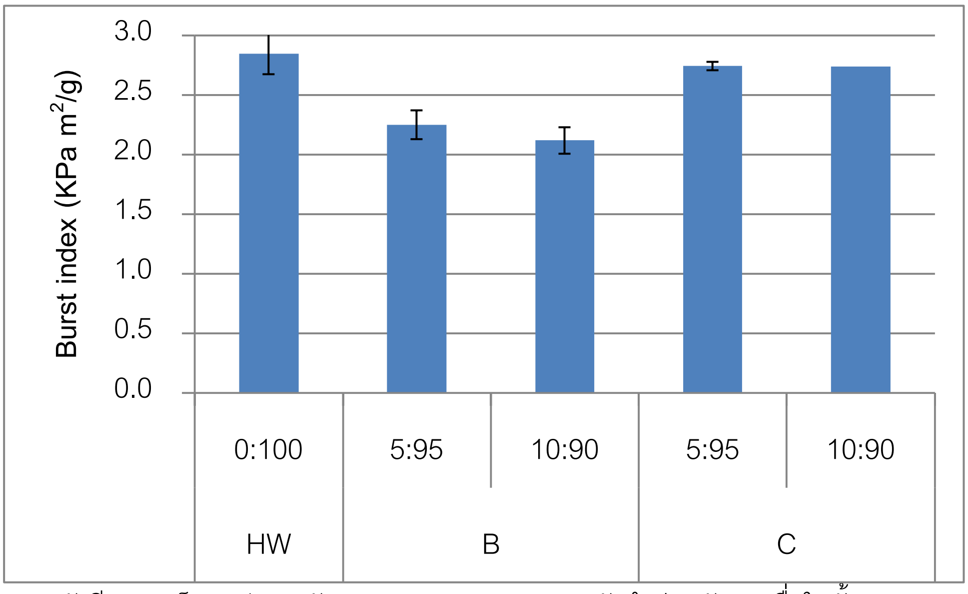
ความแข็งแรงต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยเป็นสำคัญ เส้นใยที่มีการสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีจะส่งผลให้แผ่นชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-3 แสดงในเห็นว่า เยื่อใยสั้นให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด เนื่องจากเส้นใยแนบชิดกันได้มาก และเยื่อมีความบริสุทธิ์สูง ทำให้สามารถสร้างพันธะได้ดี กากมันสำปะหลังส่วน C ให้ความแข็งแรงมากกว่าส่วน B อาจเป็นเพราะมีจำนวนกระจุกเส้นใยน้อย เส้นใยแยกตัวเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ทำให้การสร้างพันธะดีกว่าส่วน B ซึ่งมีจำนวนกระจุกเส้นใยมากกว่า



ภาพที่ 4- 3 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น

4.1.4. ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

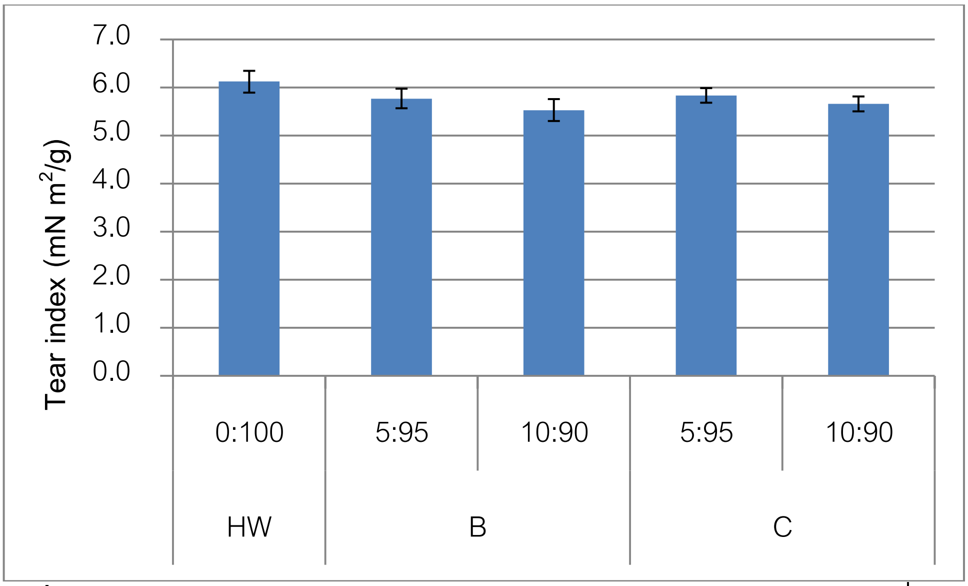
ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยเช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นชิ้นทดสอบ ซึ่งจากผลการทดลองดังภาพที่ 4-4 พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของเยื่อใยสั้นมีค่ามากที่สุด โดยที่แผ่นชิ้นทดสอบของการผสมกากส่วน C มีค่าน้อยกว่าเยื่อใยสั้นเล็กน้อยและสูงกว่ากากมันสำปะหลังส่วน B เนื่องจากกากส่วน C สามารถสร้างพันธะได้ดีกว่ากากส่วน B ซึ่งผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และการเพิ่มปริมาณกากทำให้ความแข็งแรงลดลงเช่นกัน



ภาพที่ 4- 4 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น

4.1.5. ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

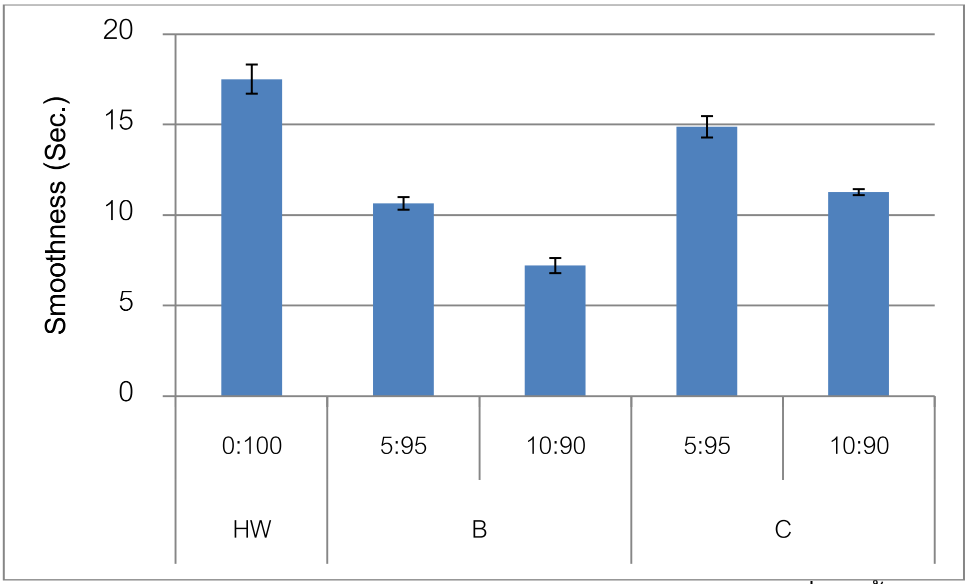
ความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความยาวเส้นใยและความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าพันธะของเส้นใย ดังนั้นเยื่อที่มีความยาวเส้นใยมากและความแข็งแรงของเส้นใยมากนั้นกระดาษก็ทนต่อแรงฉีกได้สูง ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4-5 พบว่าแผ่นชิ้นทดสอบที่ผสมกากมันทั้งสองส่วนมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกต่ำกว่าเยื่อใยสั้นเล็กน้อย โดยกากส่วน C ให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกดีกว่าส่วน B เล็กน้อย ทั้งๆ ที่เส้นใยมีขนาดสั้นกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากกระจุกเส้นใยในแผ่นชิ้นทดสอบทำให้แรงฉีกได้ไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 4- 5 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น

4.1.6. **ความเรียบ**

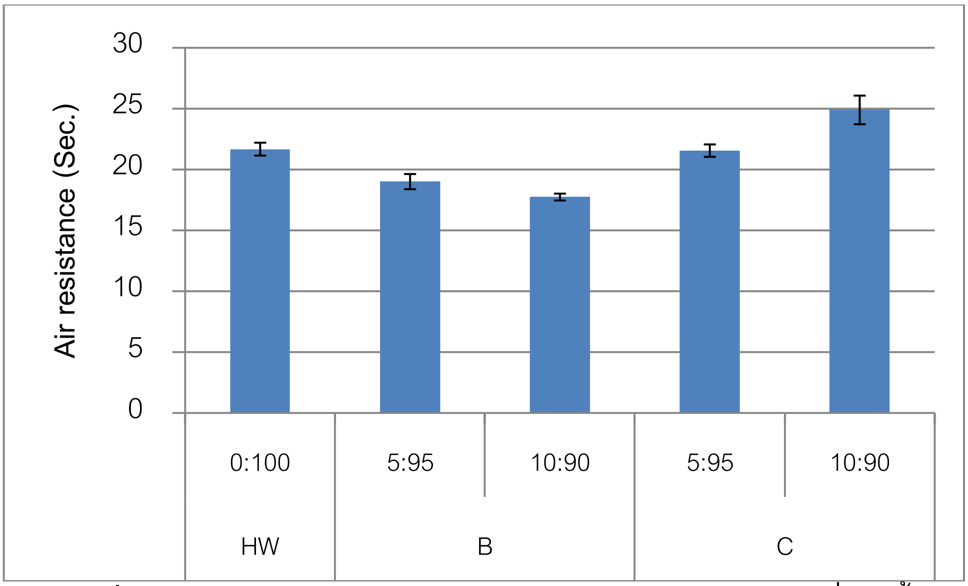
ความเรียบของผิวแผ่นชิ้นทดสอบ วัดโดยใช้หลักของการวัดความสามารถของผิวหน้ากระดาษที่ต้านการไหลของอากาศระหว่างผิวหน้าแผ่นชิ้นทดสอบและผิวหัววัดที่กดลงไป จากภาพที่ 4-6 พบว่า แผ่นชิ้นทดสอบของเยื่อใยสั้นมีความเรียบมากที่สุด ซึ่งน่าจะเป็นเพราะเส้นใยมีการสร้างพันธะและแนบตัวได้ดีแต่เมื่อผสมกากมันซึ่งมีความหยาบและมีกระจุกเส้นใย ทำให้การสร้างพันธะไม่ดีและเส้นใยแนบกันไม่สนิท ซึ่งส่งผลต่อผิวหน้าของแผ่นชิ้นทดสอบ โดยกากส่วน C ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าทำให้มีความเรียบมากกว่า



ภาพที่ 4- 6 ความเรียบของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น

4.1.7. การต้านอากาศ

การต้านอากาศการผ่านของอากาศภายในโครงสร้างในแผ่นชิ้นทดสอบ ซึ่งหมายถึงรูพรุนของกระดาษทั้งแนวนอนและแนวตั้ง โดยวัดการต้าน โดยการวัดจากเวลาที่ใช้ในการผ่านของปริมาณอากาศภายใต้สภาวะที่เฉพาะ ซึ่งแสดงผลการทดสอบในภาพที่ 4-7 พบว่า การผสมกากมันส่วน C ร้อยละ 10 มีการต้านอากาศมากที่สุด อาจเพราะเส้นใยมีขนาดเล็กทำให้เข้าไปอุดรูพรุนในเนื้อกระดาษ จึงทำให้การต้านอากาศมาก แต่เส้นใยส่วน B มีเส้นใยขนาดใหญ่จึงมีรูพรุนมาก และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากมันสำปะหลัง ยิ่งทำให้รูพรุนมากขึ้น ในขณะที่เยื่อใยสั้นให้ค่าการต้านอากาศระดับปานกลาง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความยาวเส้นใยจากตารางที่ 4.2 ที่แสดงให้เห็นว่าความยาวเส้นใยส่วน B > เยื่อใยสั้น > C



ภาพที่ 4- 7 การต้านอากาศของกระดาษผสมกากมันสำปะหลังและเยื่อใยสั้น

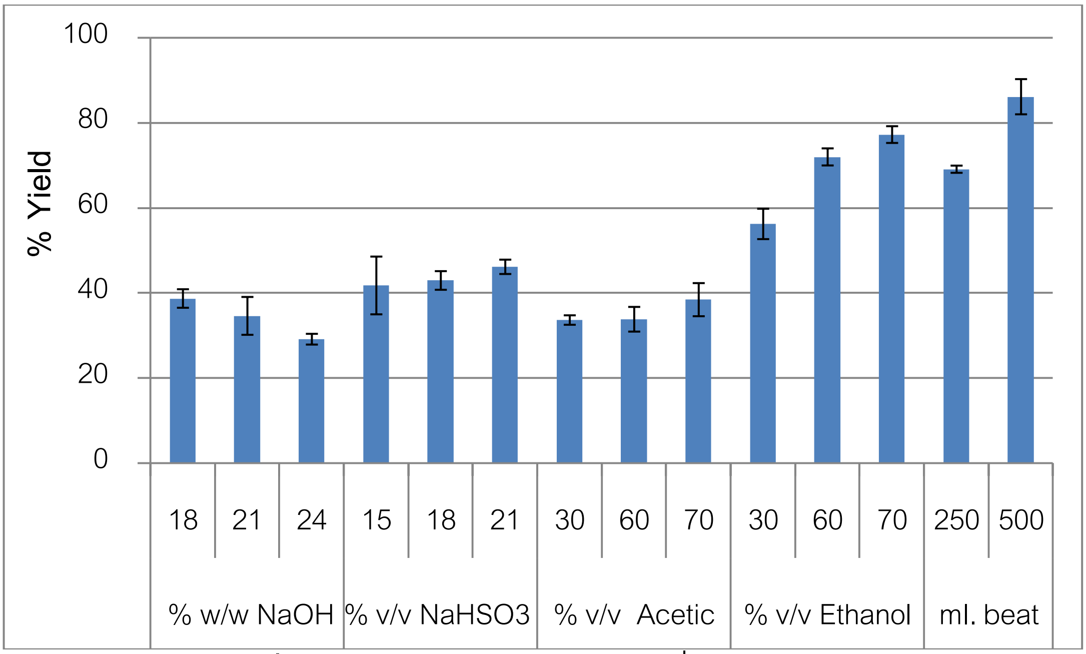
จากการทดลองหาขนาดกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม พบว่า เส้นใยของกากมันในส่วน C มีขนาดเล็กและสมบัติทางกายภาพของกระดาษให้ค่าต่ำกว่าเยื่อใยสั้นไม่มาก จึงไม่ควรนำมาผ่านกระบวนการผลิตเยื่อต่อ ซึ่งอาจจะทำให้ขนาดของกากมันส่วน C มีขนาดเล็กลงกว่าเดิมและทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงลดลงได้ จึงเลือกใช้กากมันในส่วน A และ B โดยกากมันส่วน A มีสัดส่วนที่น้อยประมาณร้อยละ 13 จึงนำไปรวมกับกากในส่วน B เพื่อทำการผลิตเยื่อในลำดับต่อไป

4.2. ผลการทดลองการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลัง

ผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 นี้เป็นผลการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การผลิตเยื่อทางเคมีด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18, 21, 24 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15, 18, 21 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด กรดแอซีติกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด และเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด โดยต้มเยื่อโดยใช้ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาทีและ การผลิตเยื่อเชิงกลด้วยการบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อที่ให้ได้ค่าสภาพระบายได้ 500±20 มล.และ 250±20 มล. จากนั้นทำการวิเคราะห์เส้นใยและขึ้นแผ่นทดสอบด้วยน้ำหนักมาตรฐาน 75 กรัมต่อตารางเมตร โดยผสมกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้นด้วยอัตราส่วน 10:90 แล้วทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1. **ผลผลิตของการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลัง** (pulp yield)

ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีต่างๆ ทั้งเชิงเคมีและเชิงกลแสดงดังภาพที่ 4-8 พบว่า การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นยิ่งเพิ่มความเข้มข้น ยิ่งทำให้ผลผลิตที่ได้ลดลง ในขณะที่โซเดียมไบซัลไฟต์ กรดแอซีติก และเอทานอลให้ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมี ซึ่งอาจเป็นผลของการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปทำลายองค์ประกอบต่างๆ ในกากมันสำปะหลัง อาทิ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และแป้งมากกว่าตัวอื่นๆ โดยดูจากผลของขนาดของเส้นใยที่ลดลงมากกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่น ซึ่งจะกล่าวในข้อถัดไป ส่วนการผลิตเยื่อด้วยการบด พบว่า เมื่อเพิ่มการบดเยื่อมากขึ้น (ค่าสภาพระบายได้ลดลง) ผลผลิตที่ได้ก็จะลดลง อาจเพราะเส้นใยถูกทำลายให้แยกย่อยมากยิ่งขึ้น และแป้งที่อยู่ในกากอาจจะหลุดออกมาและสูญเสียไปกับน้ำ เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ กรดแอซีติก เอทานอล และระดับการบดเยื่อที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อผลผลิตที่ได้ของการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.584, 0.326, 0.991, 0.864 และ 0.868 ตามลำดับ)



ภาพที่ 4- 8 ร้อยละผลผลิตของการผลิตเยื่อด้วยภาวะต่างๆ

4.2.2. สัณฐานวิทยาของเส้นใย

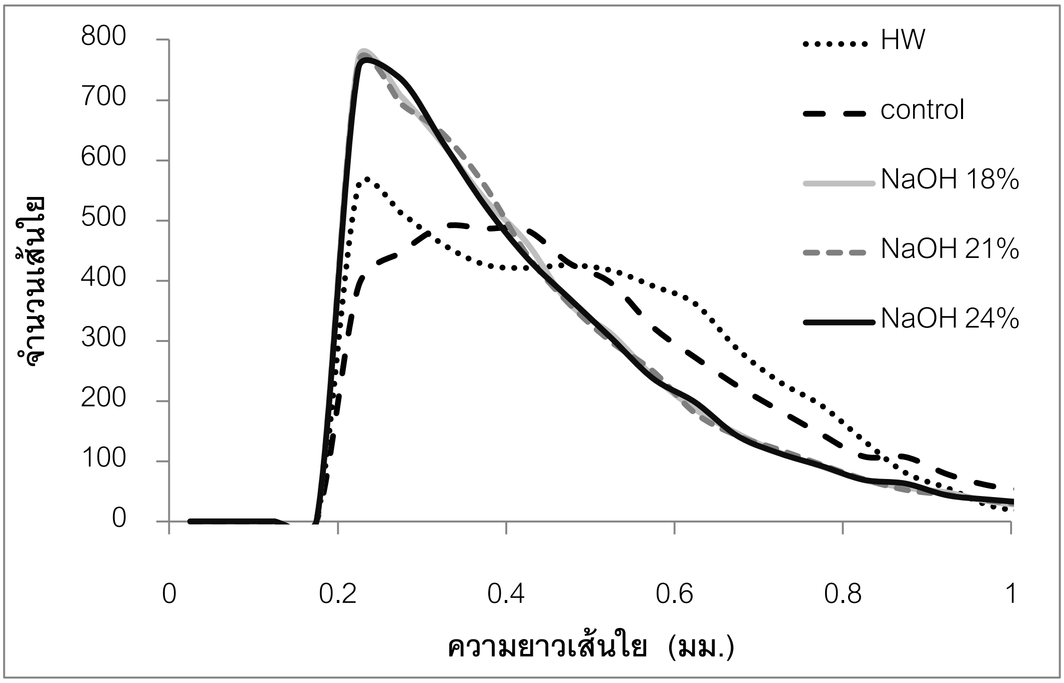
จากการทดลองผลิตเยื่อด้วยวิธีการต่างๆ โดยแสดงการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาเส้นใยในตารางที่ 4-3 เมื่อเปรียบเทียบกากมันสำปะหลังควบคุมกับกากที่ผ่านการผลิตเยื่อในทุกภาวะ พบว่า การผลิตเยื่อด้วยการบดเยื่อให้ความยาวเส้นใยสั้นที่สุด แต่ไม่ได้ช่วยลดจำนวนกระจุกเส้นใยมากเท่ากับการผลิตเยื่อเชิงเคมี นอกจากนี้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก็ยังมีปริมาณมาก ซึ่งส่งผลต่อการอุ้มน้ำของเยื่อในระหว่างกระบวนการผลิตกระดาษ ส่วนการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้น พบว่า การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซต์นั้น ให้ความยาวเส้นใยสั้นที่สุด และลดจำนวนกระจุกเส้นมากที่สุดจากทุกภาวะ ซึ่งอาจเป็นผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้าไปละลายลิกนินและแป้งในกากมันสำปะหลังออกมา เมื่อดูกราฟแสดงการกระจายตัวของความเส้นใยดังภาพที่ 4-9 พบว่าระดับความเข้มข้นของสารเคมีแต่ละชนิดไม่ได้ส่งผลต่อความยาวเส้นใยกากมันสำปะหลัง แต่ชนิดของสารเคมีส่งผลต่อจำนวนเส้นใยที่สั้นลง ซึ่งพบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เส้นใยสั้นลงมากที่สุด ซึ่งอาจเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปทำลายเซลลูโลสมากกว่าสารตัวอื่น นอกจากนี้การผลิตเยื่อทุกภาวะทำให้ความกว้างของเส้นใยดัชนีความหักงอและดัชนีความโค้งงอของเส้นใยลดลง

ตารางที่ 4-3 ผลความยาวเส้นใย จำนวนกระจุกเส้นใย และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของกากมันสำปะหลังหลังการผลิตเยื่อด้วยวิธีต่างๆเทียบกับกากควบคุมและเยื่อใยสั้น (ค่าเฉลี่ย±SD)

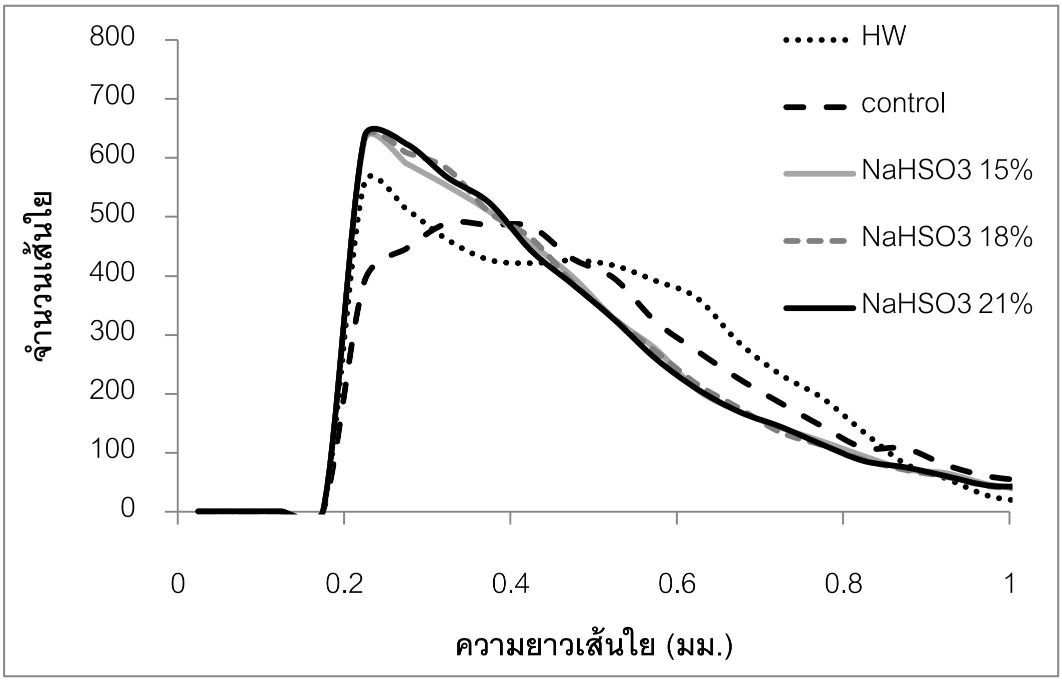
ตัวอย่าง	ความยาวเส้นใยแบบ LW (มม.)	จำนวนกระจุกเส้นใย (%)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%)
NaOH 18% w/w	0.669±0.025	9.07	37.27±0.47
NaOH 21% w/w	0.695±0.051	9.55	36.87±1.02
NaOH 24% w/w	0.686±0.016	8.85	35.31±1.97
$NaHSO_3$ 15% v/v	0.779±0.032	12.85	31.25±3.78
$NaHSO_3$ 18% v/v	0.748±0.017	12.08	30.69±4.88
$NaHSO_3$ 21% v/v	0.769±0.018	11.70	30.54±2.09
Acetic 30% v/v	0.756±0.024	10.45	33.08±2.33
Acetic 60% v/v	0.705±0.038	10.37	37.25±2.02
Acetic 70% v/v	0.751±0.050	10.03	33.32±1.14
Ethanol 30% v/v	0.776±0.033	11.73	30.81±4.47
Ethanol 60% v/v	0.799±0.029	12.07	30.50±3.21
Ethanol 70% v/v	0.717±0.032	12.65	35.14±7.11
Beat 250±20 ml CSF	0.607±0.027	13.20	40.70±1.38
Beat 500±20 ml CSF	0.676±0.032	14.83	33.60±4.38
กากควบคุม	0.780±0.038	23.30	15.03±3.58
เยื่อใยสั้น	0.562±0.004	0.02	35.26±2.88

ตารางที่ 4-4 ผลความกว้างของเส้นใย ดัชนีความโค้งงอ และดัชนีความหักงอของเส้นใยกากมันสำปะหลังหลังการผลิตเยื่อด้วยวิธีต่างๆเทียบกับกากควบคุมและเยื่อใยสั้น (ค่าเฉลี่ย±SD)

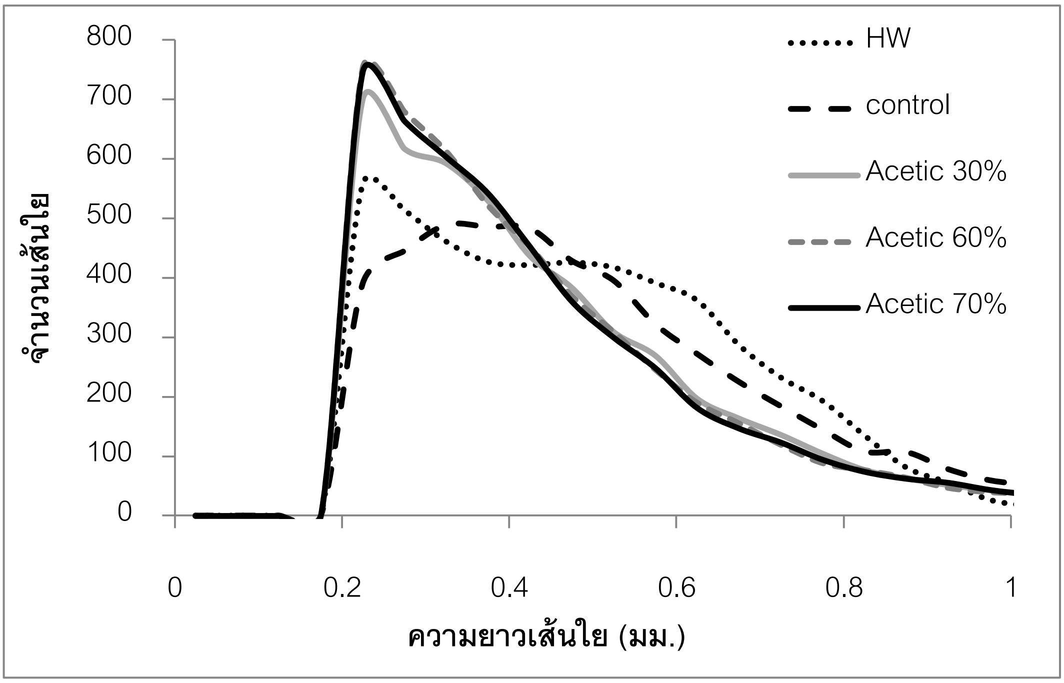
ตัวอย่าง	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร)	ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	ดัชนีความหักงอของเส้นใย (มม.$^{-1}$)
NaOH 18% w/w	32.50±0.83	0.404±0.020	2.917±0.087
NaOH 21% w/w	32.28±0.47	0.402±0.015	2.858±0.115
NaOH 24% w/w	32.03±0.74	0.379±0.021	2.736±0.111
$NaHSO_3$ 15% v/v	33.18±0.17	0.357±0.009	2.399±0.113
$NaHSO_3$ 18% v/v	33.33±0.78	0.384±0.014	2.521±0.118
$NaHSO_3$ 21% v/v	33.00±0.57	0.365±0.003	2.422±0.070
Acetic 30% v/v	33.45±0.31	0.363±0.005	2.470±0.049
Acetic 60% v/v	34.05±0.37	0.390±0.016	2.550±0.110
Acetic 70% v/v	33.55±0.24	0.364±0.010	2.395±0.061
Ethanol 30% v/v	32.48±0.30	0.392±0.009	2.571±0.067
Ethanol 60% v/v	32.25±0.30	0.397±0.012	2.625±0.042
Ethanol 70% v/v	32.55±0.45	0.446±0.018	2.852±0.105
Beat 250±20 ml CSF	33.05±0.39	0.433±0.038	2.602±0.191
Beat 500±20 ml CSF	33.70±1.02	0.429±0.016	2.689±0.131
กากควบคุม	34.78±2.62	0.478±0.020	2.986±0.056
เยื่อใยสั้น	16.30±0.14	0.111±0.005	2.222±0.034



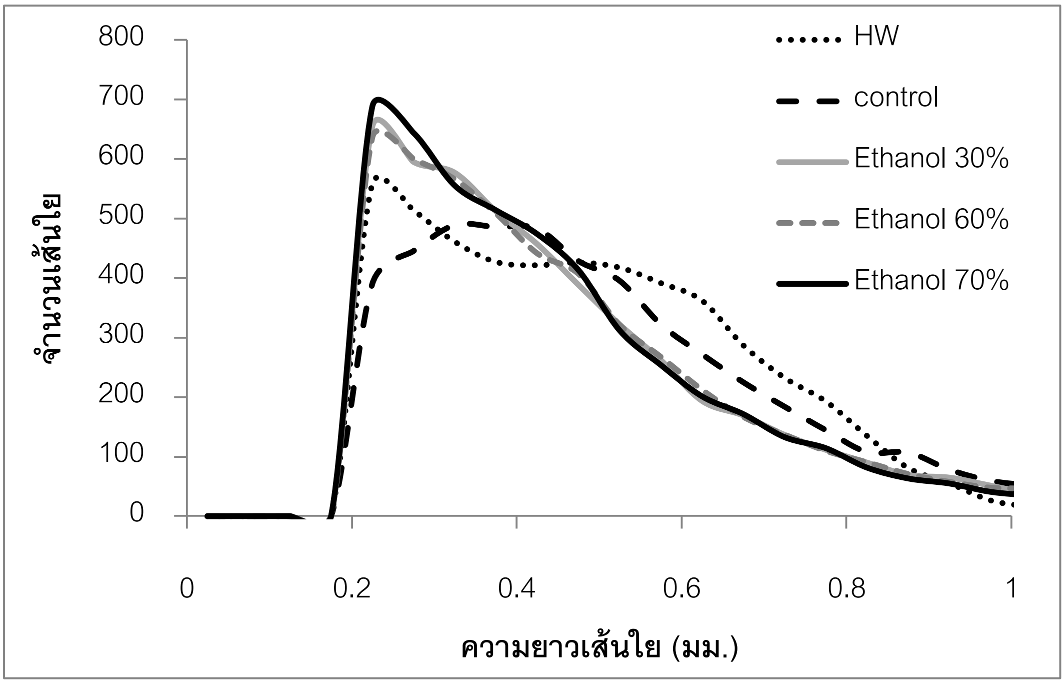
ภาพที่ 4- 9 การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



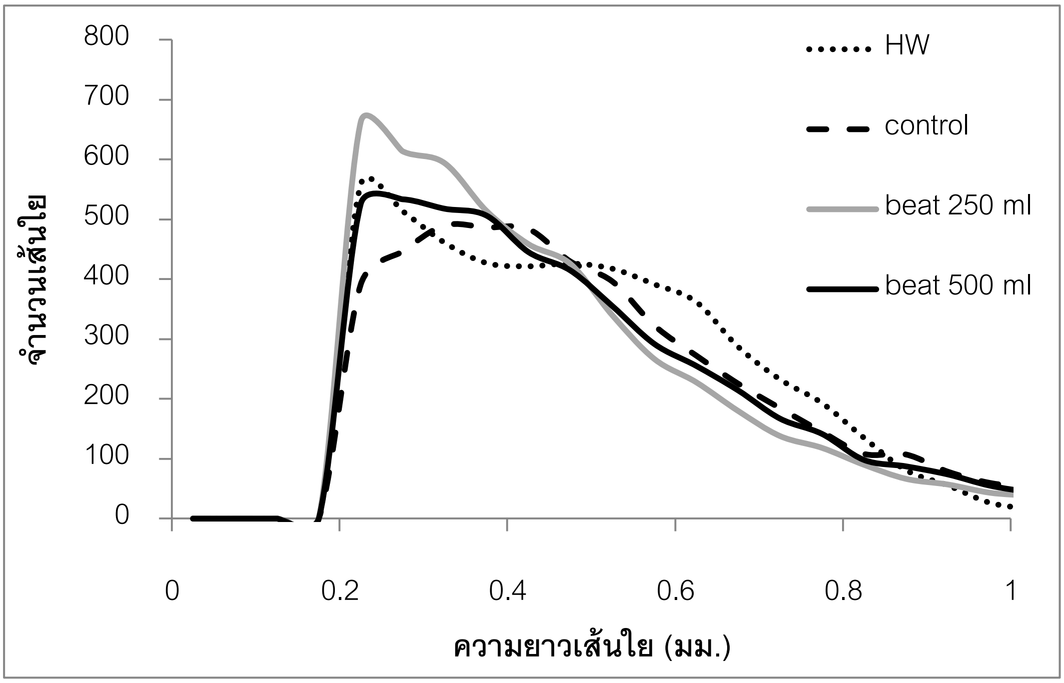
ภาพที่ 4- 10 การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์



ภาพที่ 4-11 การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยแอซีติก



ภาพที่ 4-12 การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยเอทานอล

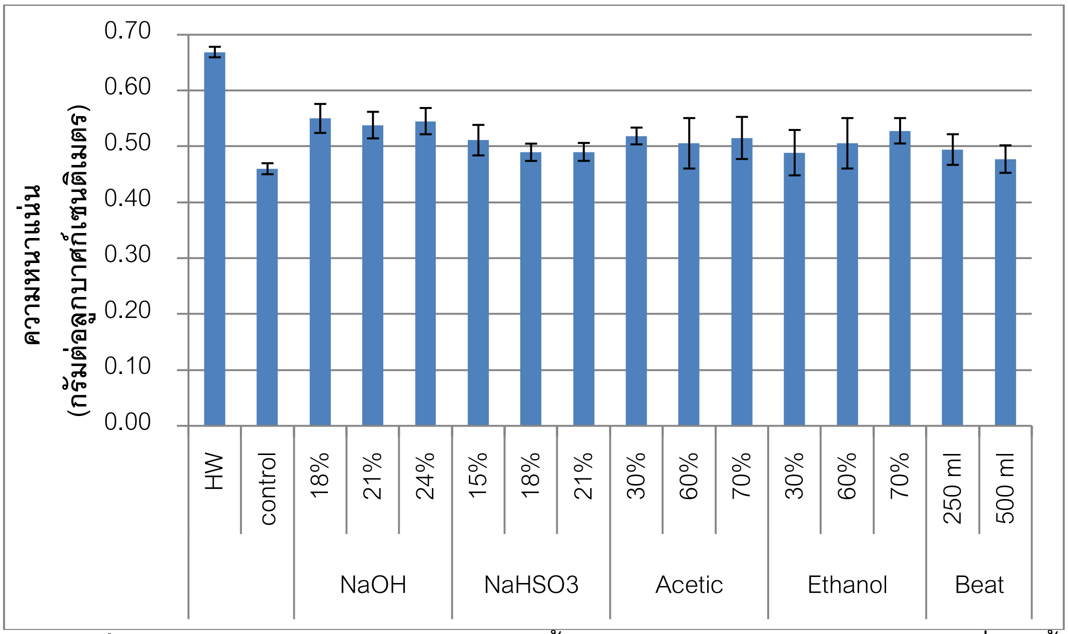


ภาพที่ 4-13 การกระจายตัวของความยาวเส้นใยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อด้วยบด

4.2.3. ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นชิ้นทดสอบ

จากการทดลองการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังด้วยภาวะต่างๆ แล้วผสมกับเยื่อใยสั้นเพื่อขึ้นแผ่นชึ้นทดสอบ เมื่อเทียบกับแผ่นชิ้นทดสอบที่เป็นเยื่อใยสั้นล้วน ดังแสดงในภาพที่ 4-14 พบว่า แผ่นชิ้นทดสอบของเยื่อใยสั้นมีความหนาแน่นปรากฏมากที่สุด แสดงว่ามีการแนบตัวที่ดีสุด และเมื่อมีการผสมกากมันสำปะหลังควบคุม พบว่า การแนบตัวกันระหว่างกากมันมันสำปะหลังกับเยื่อใยสั้นไม่ดี และการผลิตเยื่อกากมันสำปะหลังในทุกภาวะทำให้ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงเส้นใยแนบตัวกันได้ดีขึ้น โดยเฉพาะการผลิตเยื่อด้วยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีเส้นใยขนาดเล็กมาก และลดจำนวนกระจุกเส้นใยลงได้มา ทำให้การแนบตัวของแผ่นชิ้นทดสอบมากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบความแตกต่างของความเข้มข้นและระดับค่าสภาพระบายได้ของการบดเยื่อจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ANOVA single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ กรดแอซีติก และเอทานอล และระดับค่าสภาพระบายของการบดที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.555, 0.692, 0.082 และ 0.161

ตามลำดับ) และความเข้มข้นของโซเดียมไบซัลไฟต์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.039)

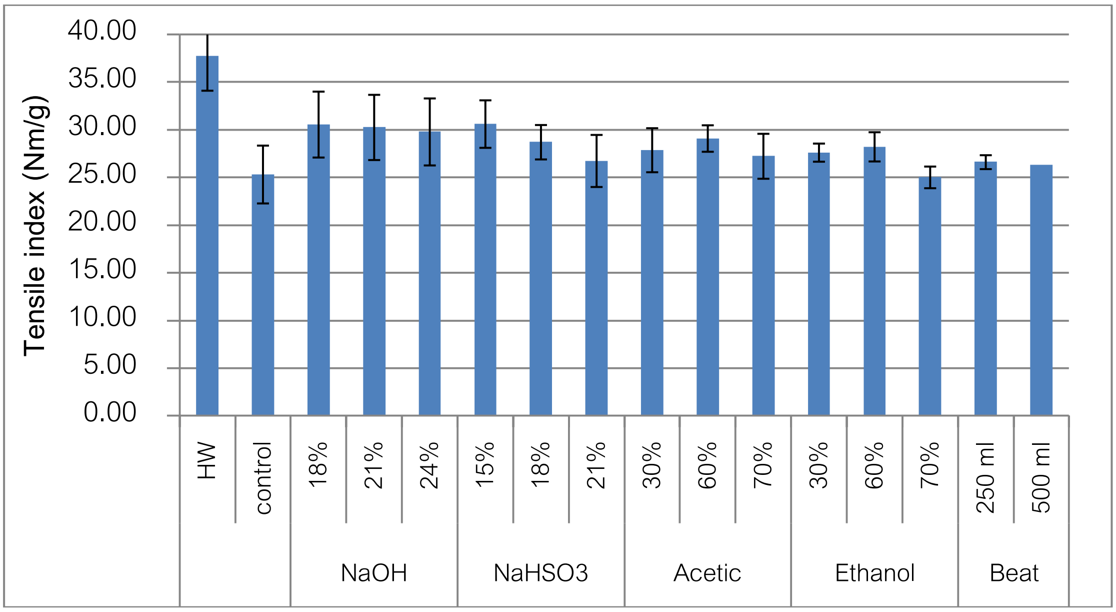


ภาพที่ 4-14 ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น

4.2.4. **ความแข็งแรงต่อแรงดึง**

ภาพที่ 4-15 เป็นการแสดงผลการทดลองความแข็งแรงต่อแรงดึงของการเยื่อกากมันสำปะหลังที่ผลิตในภาวะต่างๆ โดยผสมกับเยื่อใยสั้น พบว่า การนำกากมันสำปะหลังไปผ่านการผลิตเยื่อทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกากมันสำปะหลังที่ผลิตด้วยกระบวนการทางเคมีและเชิงกลให้ค่าสูงกว่าภาวะควบคุม โดยทั่วไปความแข็งแรงต่อแรงดึงเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย โดยการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้นสารเคมีจะเข้าไปละลายลิกนิน ทำให้เส้นใยกากมันสำปะหลังแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น จึงสร้างพันธะระหว่างเส้นใยมากขึ้น ซึ่งการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไซต์ด้วยระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด อาจเป็นผลของความยาวเส้นใยที่ยาวอยู่มากเลยทำให้การสร้างพันธะดีกว่า รองลงมาคือการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18, 21 และ 24 ตามลำดับ แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกากมันสำปะหลังที่ผลิตเยื่อแล้วก็ยังคงน้อยกว่าเยื่อใยสั้นล้วน ซึ่งอาจเป็นผลของกระจุกเส้นใยทำให้ขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งเมื่อนำผลของการผลิตเยื่อในแต่ละวิธีมาวิเคราะห์ทาง

สถิติด้วยเทคนิค ANOVA single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน ไม่ได้ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.872) การผลิตเยื่อด้วยระดับความเข้มข้นโซเดียมไบซัลไฟต์ที่แตกต่าง ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.013) การผลิตเยื่อด้วยกรดแอซีติกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด โดยระดับความเข้มข้นที่แตกต่างให้ผลของความแข็งแรงต่อแรงดึงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.180) การผลิตเยื่อด้วยเอทานอลด้วยความเข้มข้นร้อยละ 60 ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด โดยระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.000609) และการบดที่แตกต่างกัน 2 ระดับของค่าสภาพระบายได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.486)

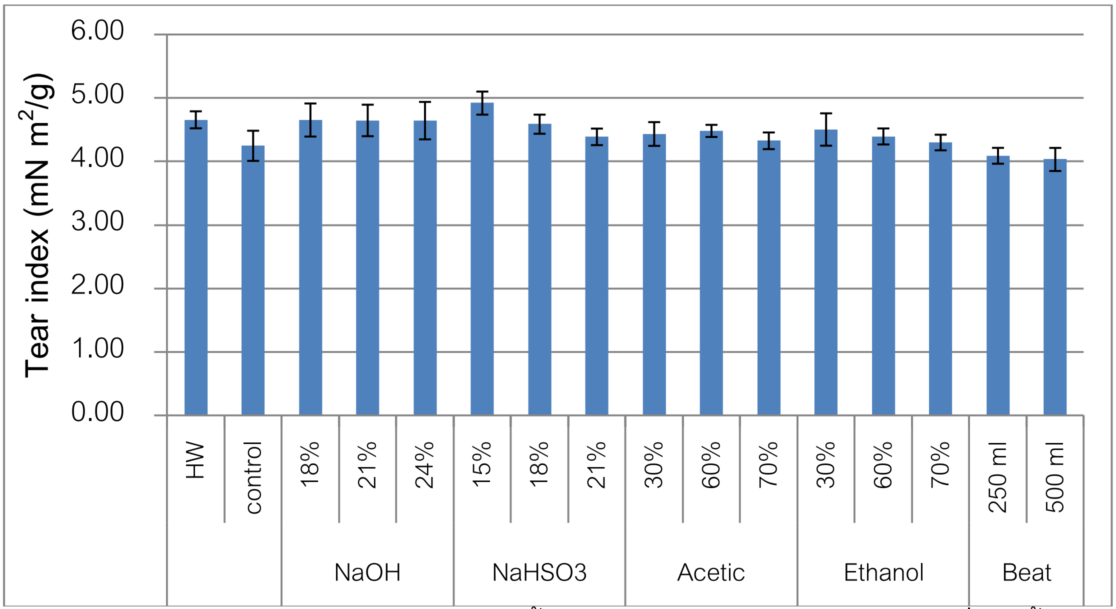


ภาพที่ 4-15 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น

4.2.5. **ความแข็งแรงต่อแรงฉีก**

ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเป็นสมบัติที่ขึ้นกับความยาวและความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าขึ้นกับพันธะระหว่างเส้นใย โดยผลการทดลองดังภาพที่ 4-16 แสดงให้เห็นว่า การผลิตเยื่อ

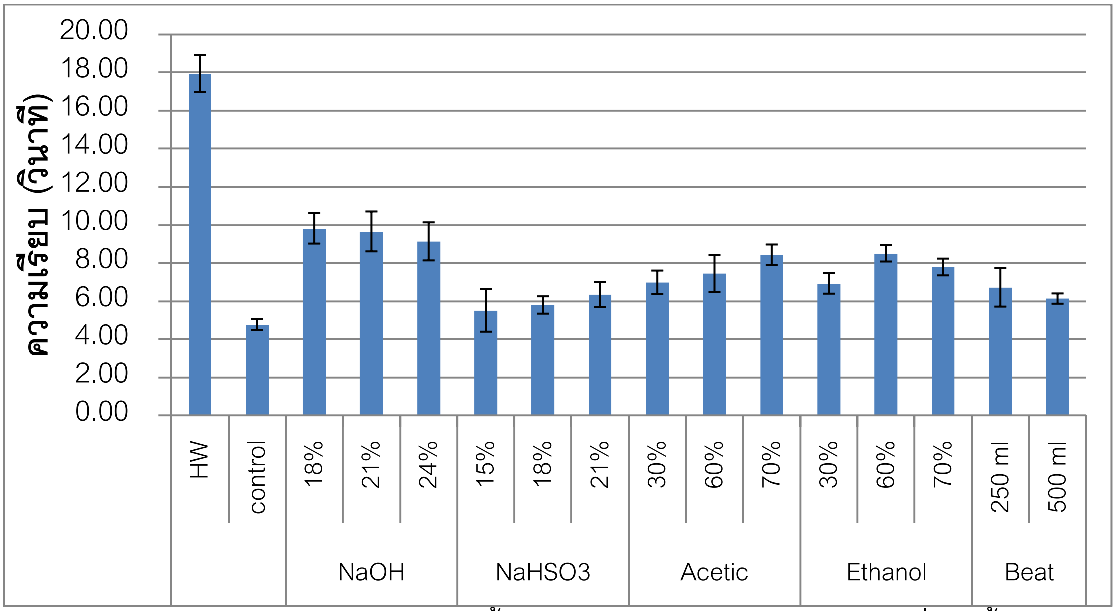
ด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์นั้น ในค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุด โดยมีค่ามากกว่าเยื่อใยสั้นล้วนด้วย อาจจะเป็นการที่โซเดียมไบซัลไฟต์สามารถเข้าไปละลายลิกนิน โดยที่ความเส้นใยกากมันสำปะหลังไม่ถูกทำลาย คือยังมีความยาวเหลืออยู่มากอยู่เมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อด้วยภาวะอื่นและกากที่ยังคงเหลือจำนวนกระจุกเส้นใยมาก ทำให้ต้องใช้แรงในการฉีกผ่านกระจุกเส้นใยในแผ่นชิ้นทดสอบมากกว่า และเมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของระดับความเข้มข้นของการผลิตเยื่อด้วย ANOVA single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.997) ส่วนการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ให้ความแข็งต่อแรงฉีกเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มระดับความเข้มข้น (ค่า P-value เท่ากับ 0.000) การผลิตเยื่อด้วยกรดแอซีติกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 ให้ค่ามากที่สุด โดยระดับของความเข้มข้นมีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.034) ส่วนการผลิตเยื่อด้วยระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.053) และการผลิตเยื่อเชิงกลด้วยการบดที่ระดับค่าสภาพระบายได้ที่แตกต่างกัน ก็ไม่ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.419)



ภาพที่ 4-16 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น

4.2.6. ความเรียบของแผ่นชิ้นทดสอบ

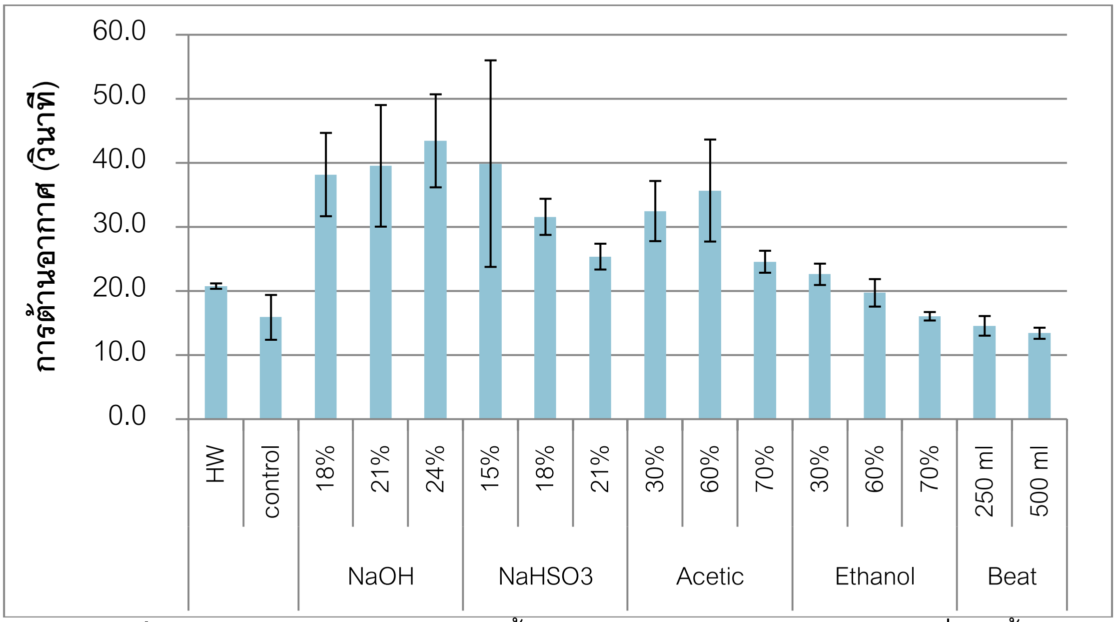
ผลการทดสอบความเรียบของผิวหน้ากระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 4-17 แสดงให้เห็นว่า เยื่อกากมันสำปะหลังไม่สามารถให้ความเรียบได้เทียบเท่ากับเยื่อใยสั้นล้วน เนื่องจากว่าเยื่อใยสั้นมีการแนบกันของเส้นใยได้ดีกว่า ดังจะเห็นว่าผลการทดลองสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นปรากฏซึ่งแสดงในภาพที่ 4-10 และเมื่อมีการผสมเยื่อกากมันสำปะหลังควบคุม ซึ่งเป็นกากมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผ่านการผลิตเยื่อจึงยังคงมีความหยาบและจำนวนกระจุกเส้นใยอยู่มากจะทำให้ความเรียบน้อยที่สุด แต่เมื่อมีการนำกากมาผลิตเยื่อจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงและจำนวนกระจุกเส้นใยน้อยลง ทำให้เส้นใยขนาดเล็กเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยมากขึ้น หรือมีการแนบตัวของเส้นใยมากขึ้น ค่าความเรียบจึงเพิ่มขึ้นโดยการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความเรียบสูงสุด เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของระดับความเข้มข้นของการผลิตเยื่อด้วย ANOVA single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ระดับความเข้มข้นของการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์และค่าสภาพระบายได้ที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อความเรียบอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.263, 0.076 และ 0.091 ตามลำดับ) การผลิตเยื่อด้วยกรดแอซีติกในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ทำให้ความเรียบแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.000) การผลิตเยื่อด้วยเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 มีความเรียบมากที่สุด ซึ่งระดับความเข้มข้นที่แตกต่างนั้นทำให้ความเรียบแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.000)



ภาพที่ 4-17 ความเรียบของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น

4.2.7. การต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบ

การต้านอากาศขึ้นกับรูพรุนโดยรวมของแผ่นชิ้นทดสอบ กระดาษที่มีรูพรุนมากจะมี การต้านอากาศน้อย ภาพที่ 4-18 แสดงการต้านอากาศของกระดาษจากการผสมเยื่อกากมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตเยื่อ ซึ่งการผลิตเยื่อทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงและแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น ซึ่งจะเข้าไปอุดในช่องว่างระหว่างเส้นใยมากขึ้น จึงทำให้รูพรุนน้อยลง โดยเฉพาะการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมากและจำนวนกระจุกเส้นใยที่น้อย ทำให้มีการเติมเต็มรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างเส้นใยมากกว่า ส่งผลให้การต้านของอากาศจะใช้เวลานานกว่าการผลิตเยื่อด้วยภาวะอื่นและสูงกว่าเยื่อใยสั้นมาก โดยการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ยิ่งทำให้การต้านอากาศมีมากขึ้น ในทางกลับกันกับสารตัวอื่นที่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นจะทำให้การต้านอากาศน้อยลง และการผลิตเยื่อด้วยการบดถึงแม้ให้เส้นใยที่มีขนาดเล็กแต่ยังคงมีจำนวนกระจุกเส้นใยอยู่จำนวนมาก จึงส่งผลต่อการสร้างพันธะ และช่องว่างภายในกระดาษเมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของระดับความเข้มข้นของการผลิตเยื่อด้วย ANOVA single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันและการบดเยื่อที่ค่าสภาพระบายต่างกัน ไม่ได้ส่งผลต่อการต้านอากาศอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.314, 0.052) ส่วนการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ กรดแอซีติก และเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นที่แตกกันทำให้การต้านอากาศเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.008, 0.000302, 0.000000006 ตามลำดับ)



ภาพที่ 4-18 การต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบของกากมันสำปะหลังผสมเยื่อใยสั้น

จากการทดลองในตอนที่ 2 พบว่าการผลิตเยื่อส่วนใหญ่เพิ่มสมบัติของเยื่อและกระดาษให้สูงขึ้น ซึ่งหากพิจารณาจากสมบัติด้านความแข็งแรงได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงฉีก พบว่า การผลิตเยื่อที่ทำให้สมบัติดีขึ้นอย่างชัดเจน คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และการบดเยื่อ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะความยาวของเส้นใยที่มาก และจำนวนกระจุกเส้นใยน้อย ดังนั้นจึงเลือกทั้งสามวิธีนี้มาผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลัง เพื่อผสมกับกระดาษรีไซเคิล (OCC) ต่อในการทดลองตอนที่ 3 โดยเลือกการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง เนื่องจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของระดับความเข้มข้นไม่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงฉีกนั้นมีนัยสำคัญจึงเลือกใช้ความเข้มข้นต่ำที่สุด เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและการใช้สารเคมีที่มากเกินไป ส่วนการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด และการผลิตเยื่อเชิงกลเลือกใช้การบดเยื่อที่ค่าสภาพระบายได้เท่ากับ 250±20 มิลลิลิตร เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าระดับ 500±20 มิลลิลิตร และมีจำนวนกระจุกเส้นใยน้อยกว่า

4.3. ผลการทดลองการหาอัตราส่วนการใช้กากมันสำปะหลังทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

การทดลองในข้อ 4.3 เป็นผลการทดลองตอนที่ 3 โดยนำผลจากการผลิตเยื่อในตอนที่ 2 มาผสมกับเยื่อรีไซเคิล (OCC) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดแทนเยื่อกระดาษรีไซเคิลเพื่อผลิตกระดาษลอนลูกฟูก โดยเลือกภาวะการผลิตเยื่อที่เหมาะสมจากตอนที่ 2 ได้แก่ การผลิตเยื่อเชิงเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ต่อของเหลวทั้งหมด และการผลิตเยื่อเชิงกลด้วยการบดที่ค่าสภาพระบายได้ 250±20 มิลลิลิตร จากนั้นทำการวิเคราะห์เส้นใยและขึ้นแผ่นทดสอบด้วยน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร โดยผสมกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิลด้วยอัตราส่วน 5:95, 10:90 และ 20:80 แล้วทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.3.1. **ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อกากมันสำปะหลัง** (freeness)

ค่าสภาพระบายได้บอกถึงการระบายน้ำของเยื่อ (drainage) ผ่านรูตะแกรงของเครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ จากผลการทดลองตามตารางที่ 4-4 พบว่า การผลิตเยื่อเชิงเคมีส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อกากมันสำปะหลังลดลง เพราะสารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินและเส้นใยแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้นและยังทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง จึงเป็นการเพิ่มผิวสัมผัสกับน้ำมากยิ่งขึ้น ส่งผลต่อสภาพการระบายน้ำ คือทำให้เส้นใยอุ้มน้ำมากขึ้น ค่าสภาพระบายได้จึงลดลง ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับเยื่อรีไซเคิลที่จะทำการผสม ส่วนการผลิตเยื่อด้วยการบด ทำให้เส้นใยแยกย่อยมากขึ้น และเกิดเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้เพิ่มการอุ้มน้ำของเส้นใยเช่นกัน จึงทำให้ค่าสภาพระบายลดลง โดยอาจส่งผลต่อการขึ้นแผ่นทดสอบ เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กและอุ้มน้ำได้มาก จึงทำให้การระบายน้ำใช้เวลานาน และการที่มีเส้นใยขนาดเล็กมากอาจจะหลุดลอดผ่านตะแกรงขณะขึ้นแผ่นทดสอบได้เช่นกัน

ตารางที่ 4-5 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อกากมันสำปะหลัง

ภาวะ	ค่าสภาพระบายได้ (มิลลิลิตร)	SD
เยื่อรีไซเคิล (OCC)	381	2.08
กากมันสำปะหลังควบคุม	732	8.63
กากที่ผลิตด้วย NaOH 18% OD	377	38.18
กากที่ผลิตด้วย $NaHSO_3$ 18% v/v	435	49.50
กากที่ผลิตด้วยการบด	258	28.99

4.3.2. **ปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง**

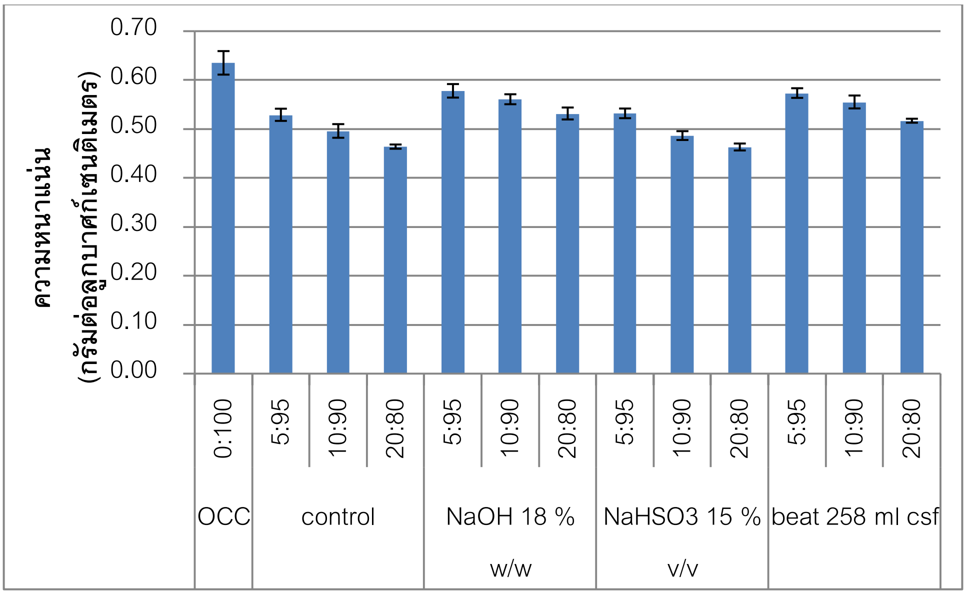
จากการวิเคราะห์ปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง ซึ่งแป้งในที่นี้เป็นแป้งที่อยู่ภายในเส้นใยกากมันสำปะหลังที่ไม่สามารถสกัดได้แล้วในกระบวนการผลิตมันสำปะหลัง จากตารางที่ 4-5 พบว่า กากมันสำปะหลังที่ถูกผลิตด้วยการผลิตเยื่อเชิงเคมีนั้น สารเคมีเข้าไปทำลายแป้งในกากมันสำปะหลังด้วยนอกจากจะเข้าไปละลายลิกนิน และเส้นใยบางส่วนแล้ว ดังจะเห็นได้จากค่าปริมาณแป้งที่ลดลง ซึ่งส่งผลต่อผลผลิตที่ได้จะมีส่วนที่สูญเสียไปมากขึ้น ส่วนการผลิตเยื่อด้วยการบด เป็นการทำให้เส้นใยแยกย่อย ซึ่งอาจจะทำให้แป้งหลุดออกจากภายในเส้นใยเพียงบางส่วน ทำให้ปริมาณแป้งลดลงเพียงเล็กน้อย แป้งที่หลุดออกมาอาจหลุดไปกับน้ำ

ตารางที่ 4-6 ผลผลิตที่ได้ และปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง

ภาวะ	ผลผลิตที่ได้ (%)	ปริมาณแป้ง (%)
กากมันสำปะหลังควบคุม	-	62.75
กากที่ผลิตด้วย NaOH 18% w/w	38.68	26.21
กากที่ผลิตด้วย $NaHSO_3$ 18% v/v	41.75	22.17
กากที่ผลิตด้วยการบด	69.09	56.76

4.3.3. ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นชิ้นทดสอบ

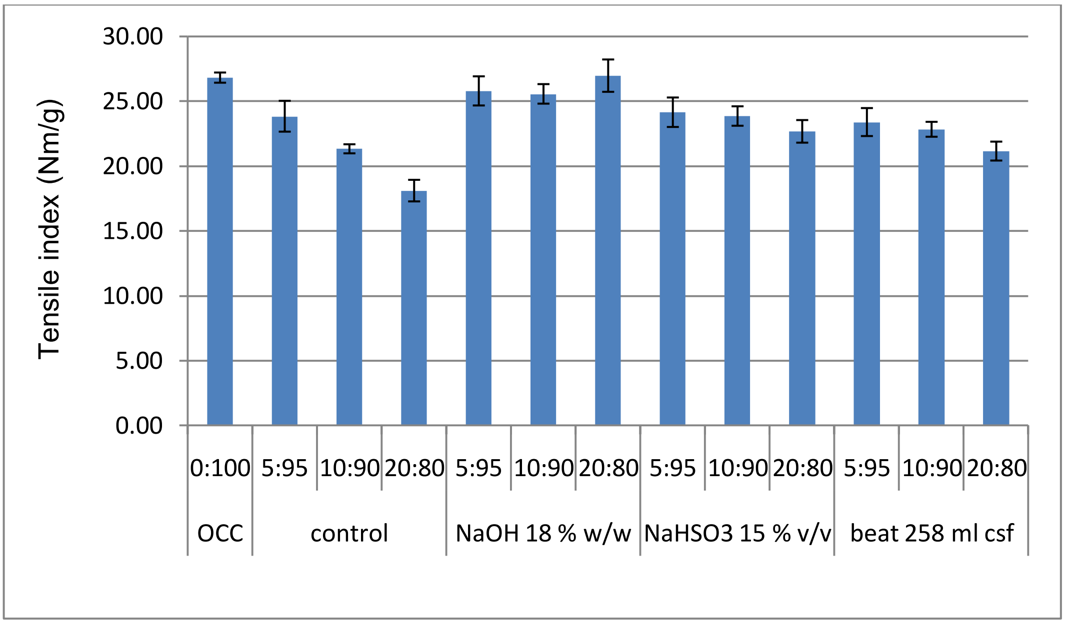
ผลของความหนาแน่นปรากฏของแผ่นชิ้นทดสอบ ในภาพที่ 4-19 พบว่า การเพิ่มปริมาณการใส่กากมันสำปะหลังมากขึ้นไม่ว่าจะภาวะใด ก็ส่งผลต่อการลดลงของความหนาแน่นปรากฏและยังน้อยกว่าเยื่อ OCC ล้วน ซึ่งอาจเกิดจากการแนบตัวของกากมันปะหลังด้วยกันยังไม่ดีพอ เพราะยังคงมีกระจุกเส้นใยอยู่ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA single factor ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่มากขึ้นจากร้อยละ 5, 10 และ 20 ส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในกากมันสำปะหลังทุกภาวะ คือ กากมันสำปะหลังควบคุม กากที่ผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซต์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และการบด ด้วยค่า P-value เท่ากับ 0.0000033, 0.0002157, 0.0000001 และ 0.0000032 ตามลำดับ



ภาพที่ 4- 19 ความหนาแน่นของแผ่นชิ้นทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง

4.3.4. ความแข็งแรงต่อแรงดึง

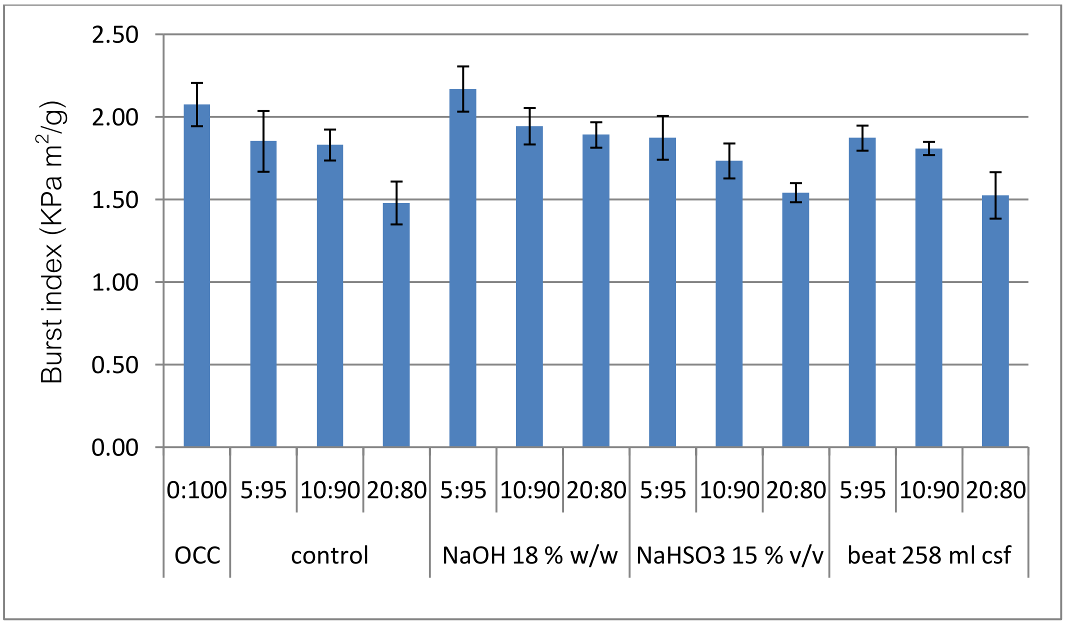
ความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็นผลมาจากพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก โดยการทดลองแสดงในภาพที่ 4-20 พบว่า การเติมกากมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่มากขึ้นของแต่ละภาวะ ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ลดลงตามลำดับ ยกเว้นการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งการเติมที่อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อเยื่อรีไซเคิลที่ 20:80 ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ดีที่สุด อาจเป็นเพราะเส้นใยมีขนาดเล็ก (fines) มาก จากการวิเคราะห์เส้นใยในตารางที่ 4-3 จึงเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างระหว่างเส้นใยมากขึ้น ซึ่งอาจจะเพิ่มพื้นที่ผิวของการสร้างพันธะมากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA single factor ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเพิ่มปริมาณ กากมันสำปะหลังควบคุม และการบดเยื่อที่ระดับค่าสภาพระบายได้ 258 มิลลิลิตร ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) กากมันสำปะหลังที่ผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ในระดับการเติมกากมันสำปะหลังร้อยละ 20 ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากมันสำปะหลังไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.122) กากมันสำปะหลังที่ผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.063)



ภาพที่ 4- 20 ความแข็งแรงต่อแรงดึงเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง

4.3.5. ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

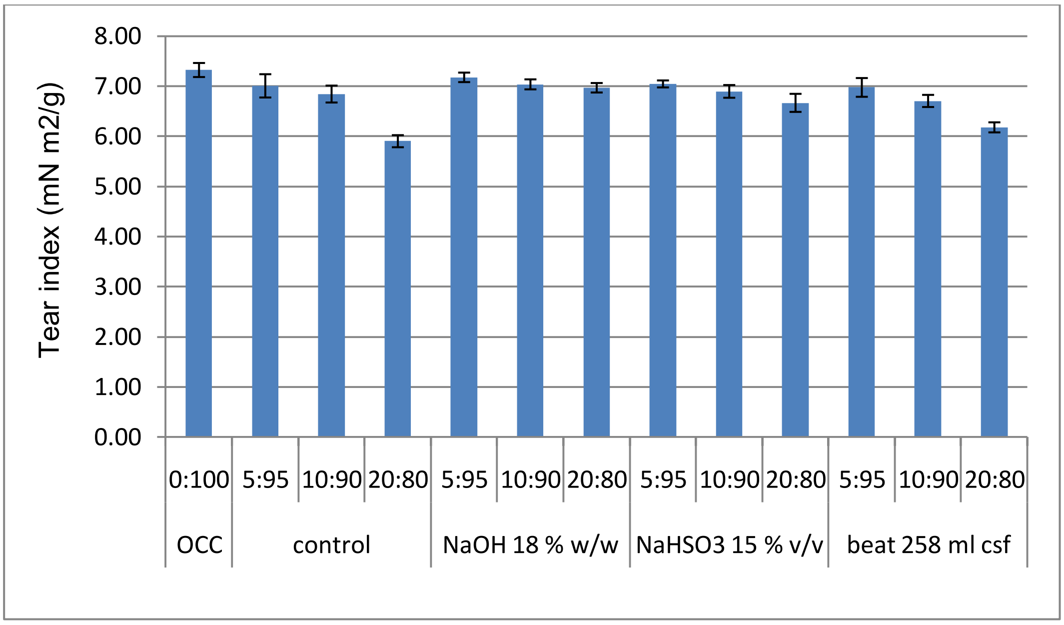
ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเป็นผลมาจากการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4-21 พบว่า การเติมกากมันสำปะหลังในแต่ละภาวะที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลง ซึ่งอาจเป็นผลของการสร้างพันธะที่ไม่ดีของกากมันสำปะหลัง เมื่อมีปริมาณกากมากยิ่งขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจึงลดลง ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังนั้นความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อรีไซเคิล 100% ในความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากกว่าแผ่นชิ้นทดสอบที่เติมกากมันสำปะหลัง ยกเว้น การเติมกากมันสำปะหลังที่การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากที่สุด อาจเพราะมีจำนวนกระจุกเส้นใยน้อย จึงทำให้การสร้างพันธะได้ดี เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA single factor ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเติมกากมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นในทุกภาวะ ได้แก่ ภาวะควบคุม โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 18 โซเดียมไบซัลไฟด์ที่ร้อยละ 15 และการบดที่ค่าสภาพระบายได้ 258 มล. ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.00192, 0.00432, 0.00998, 0.00020 ตามลำดับ)



ภาพที่ 4- 21 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง

4.3.6. ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

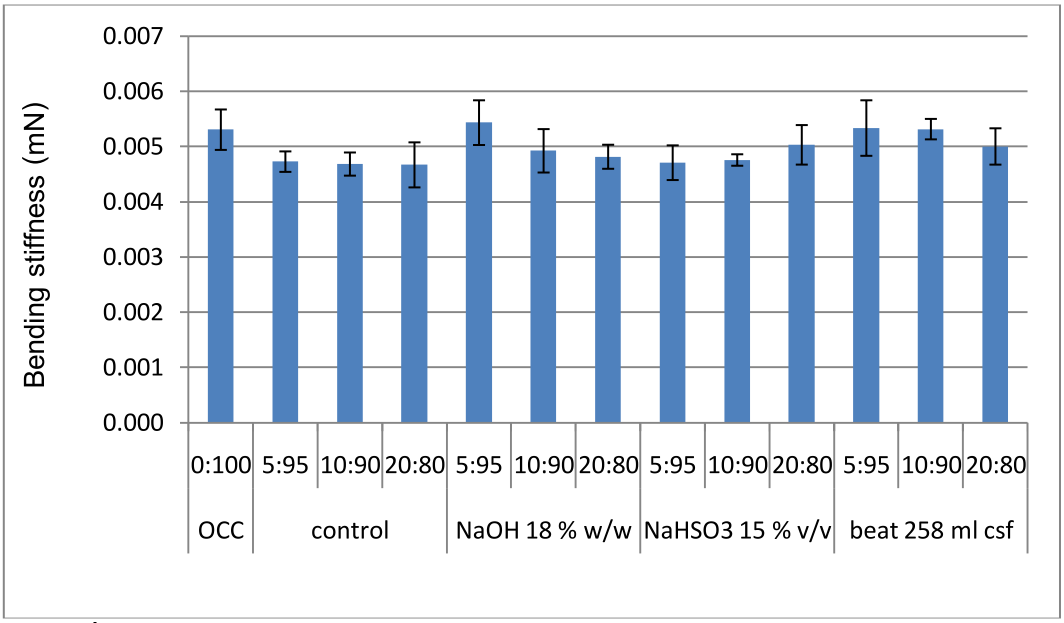
ความแข็งต่อแรงฉีกเป็นผลของความแข็งแรงของเส้นใยและความยาวของเส้นใยเป็นหลัก ส่วนความแข็งแรงของพันธะเป็นปัจจัยรอง จากภาพที่ 4-22 พบว่า แผ่นชิ้นทดสอบจากเยื่อ OCC 100% ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงที่สุด โดยกากที่ผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเยื่อรีไซเคิลที่อัตราส่วน 5:95 ให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากกว่าอัตราส่วนเดียวกันของการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ เมื่อเปรียบเทียบจากผลการทดลองในภาพที่ 4-16 ในขั้นตอนที่ 2 พบว่าการผลิตเยื่อจากโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุด และจากการวิเคราะห์เส้นใยตามตารางที่ 4-3 ความยาวเส้นใยแบบ LW เรียงได้ว่า $NaHSO_3$ > NaOH > บด ส่วนจำนวนกระจุกเส้นใย บด > $NaHSO_3$ > NaOH และปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก บด > $NaHSO_3$ > NaOH แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกอาจมาจากผลของปัจจัยรอง คือ พันธะระหว่างเส้นใยก็เป็นได้ กล่าวคือการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ได้มีความยาวของเส้นใย และปริมาณเส้นใยขณะเล็กสูงที่สุด แต่มีจำนวนกระจุกเส้นใยน้อยที่สุด ซึ่งทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยดีกว่าการผลิตเยื่อด้วยภาวะอื่น และการเติมกากมันสำปะหลังที่เพิ่มในทุกภาวะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลง ที่ทำให้การเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังส่งผลต่อการลดลงของความแข็งแรงต่อแรงฉีกได้ อาจเนื่องจากจำนวนกระจุกเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การสร้างพันธะไม่ดี เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA single factor ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังในทุกภาวะ คือ กากมันสำปะควบคุม โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 และการบดที่ระดับค่าสภาพระบายได้ 258 มิลลิลิตร ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05)



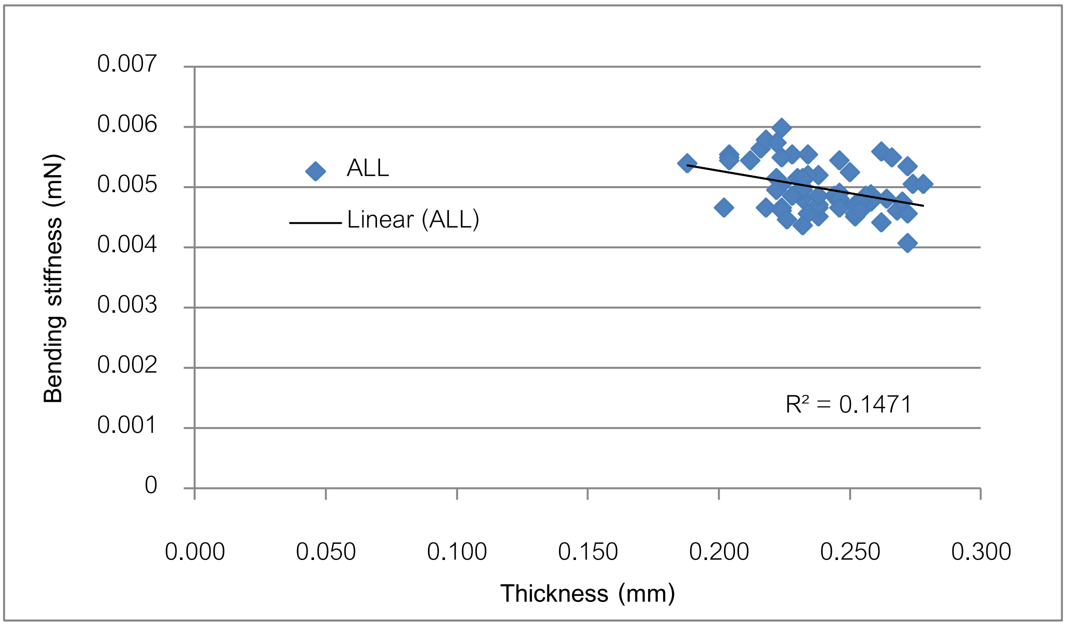
ภาพที่ 4- 22 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง

4.3.7. **ความแข็งต่อการโค้งงอ**

ความแข็งต่อการโค้งงอคือการวัดแรงที่ใช้ในการทำให้กระดาษโค้งด้วยมุมที่ 15 องศาในแนวตั้งฉาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก ซึ่งแสดงตามภาพที่ 4-23 พบว่า การเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังให้แนวโน้มไม่ชัดเจนนัก กล่าวคือการเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังในแต่ละภาวะ ส่งผลให้กระดาษแข็งขึ้นหรืออ่อนลงก็ได้ โดยปกติความแข็งแรงต่อการโค้งงอจะขึ้นกับความหนาของแผ่นชิ้นทดสอบ แต่ผลจากการทดลองนี้ พบว่า ความหนาไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อการโค้งงออย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 4-24 ว่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอทุกภาวะมีกระจายตัวไม่เข้าใกล้เส้นแนวโน้ม เพราะนั้นจึงน่าจะเกิดจากคุณภาพของกากมันสำปะหลังที่เติมลงไปเอง จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA single factor ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้ว่า การเพิ่มอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังควบคุม โซเดียมไบซัลไฟต์ และการบดเยื่อ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงต่อการโค้งงออย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.944, 0.189 และ 0.301 ตามลำดับ) การเพิ่มกากมันสำปะหลังที่ผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อการโค้งงออย่างมีนัยสำคัญของความแข็งแรงต่อการโค้งงอของแผ่นชิ้นทดสอบ (ค่า P-value เท่ากับ 0.036) อาจเพราะการเพิ่มมากขึ้นของเส้นใยขนาดเล็กในระบบ



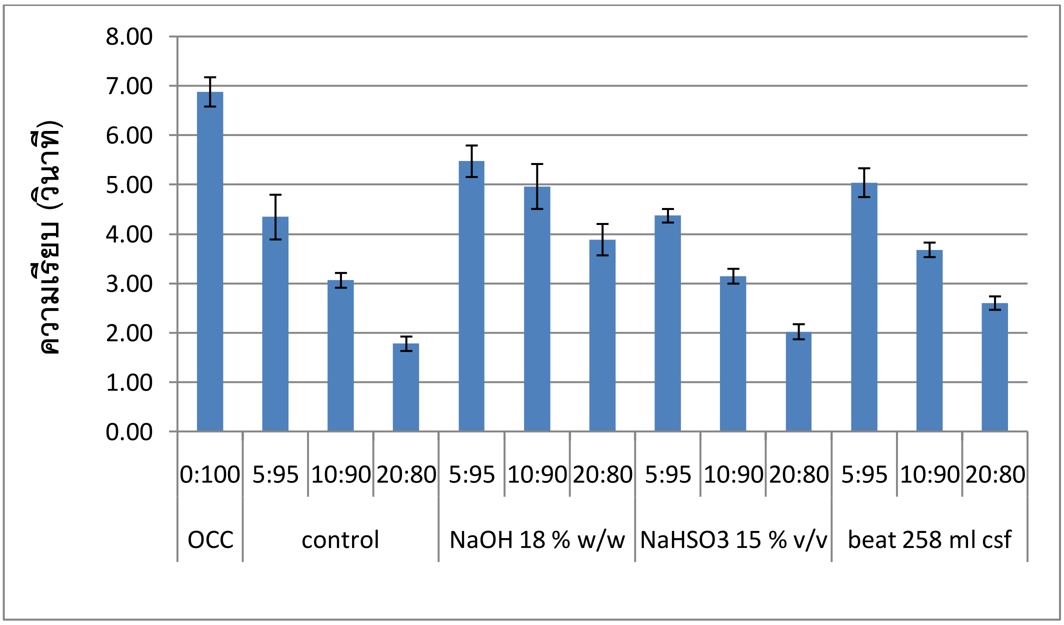
ภาพที่ 4- 23 ความแข็งแรงต่อการโค้งงอเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง



ภาพที่ 4- 24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับความแข็งแรงต่อการโค้งงอ

4.3.8. ความเรียบของแผ่นชิ้นทดสอบ

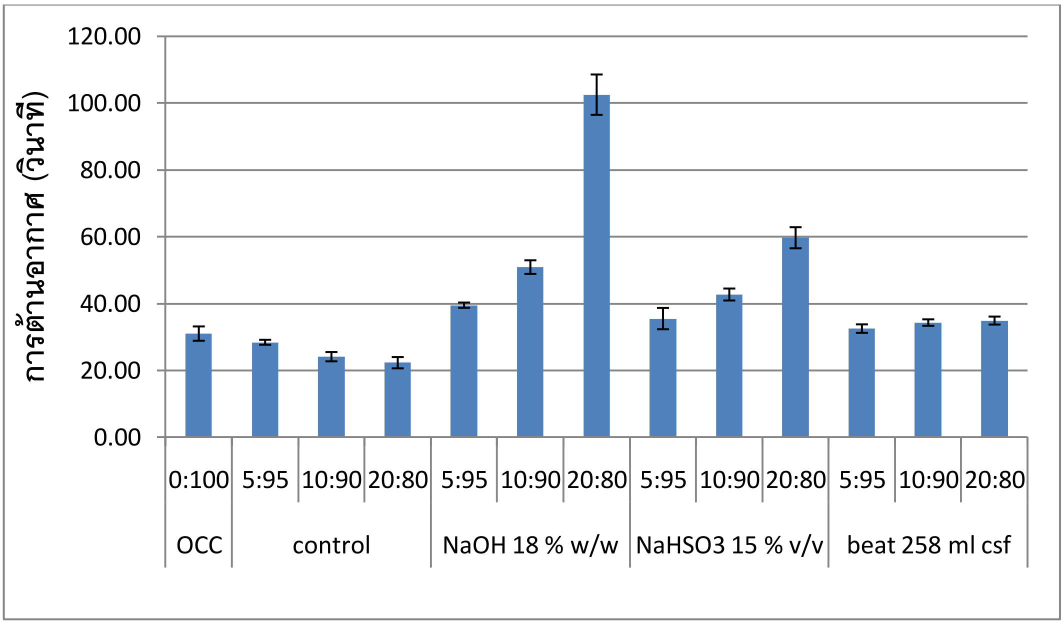
ผลของความเรียบเป็นการบอกลักษณะผิวหน้าของผิวแผ่นชิ้นทดสอบ โดยแสดงในภาพที่ 4-25 พบว่า แผ่นชิ้นทดสอบที่เพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลัง ส่งผลต่อการลดลงของความเรียบ ซึ่งอาจจะเป็นผลของกระจุกเส้นใยที่ยังเหลืออยู่ ยิ่งเพิ่มปริมาณมากขึ้นทำให้ความเรียบยิ่งน้อยลง และผลของการเรียงตัวของเส้นใยไม่เรียบเหมือนแผ่นชิ้นทดสอบที่เป็นเยื่อรีไซเคิลล้วน ซึ่งเป็นเยื่อที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA single factor ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงในเห็นว่า การเพิ่มปริมาณของกากมันสำปะหลัง ควบคุม การผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และการบด ส่งผลต่อความเรียบอย่างมีนัยสำคัญของความแข็งแรงต่อการโค้งงอทั้งสิ้น โดยค่า P-value น้อยกว่า 0.05



ภาพที่ 4- 25 ความเรียบของแผ่นชิ้นทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลัง

4.3.9. การต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบ

ภาพที่ 4-26 แสดงการต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบซึ่งแสดงถึงความพรุนของกระดาษ คือ ถ้ามีรูพรุนมาก อากาศจะใช้เวลาในการผ่านน้อย โดยผลจากการวัดการต้านอากาศของกากมันสำปะหลังควบคุม เมื่อเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังมากขึ้น การต้านอากาศลดลง ซึ่งหมายถึง การมีรูพรุนที่มากขึ้น โดยการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ส่งผลต่อการต้านอากาศที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งอาจเป็นเพราะการที่เส้นใยยังจับกันเป็นกระจุกและไม่มีการกำจัดลิกนิน ทำให้การสร้างพันธะไม่ดี จึงเกิดรูพรุนในแผ่นชิ้นทดสอบมากขึ้น ส่วนการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น มีการละลายลิกนินออกมา และจำนวนกระจุกเส้นใยที่ลดลงทำให้มีการสร้างพันธะได้ดี ทำให้รูพรุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญด้วยค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.05 ซึ่งไปในแนวทางเดียวกันคือการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ ซึ่งมีการต้านอากาศที่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แต่เนื่องจากจำนวนกระจุกเส้นใยยังมีมากกว่าจึงทำให้การสร้างพันธะไม่ดีเท่ากับการผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการผลิตเยื่อด้วยการบดก็ส่งผลให้การต้านอากาศมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ด้วยค่า P-value เท่ากับ 0.017



ภาพที่ 4- 26 การต้านอากาศของแผ่นชิ้นทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมกาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการหาขนาดของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม

จากการทดลองในการนำกากมันสำปะหลังมาหาขนาดด้วยตะแกรงขนาด 25 และ 50 เมช พบว่า กากมันสำปะหลังขนาดระหว่างตะแกรง 25-50 เมช มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือส่วนกากมันสำปะหลังขนาดเล็กกว่า 50 เมชและส่วนที่ใหญ่กว่า 25 เมช ตามลำดับ ผลของสัณฐานวิทยาของเส้นใยกากมันสำปะหลัง พบว่า ความยาวของเส้นใยแบบ LW จำนวนกระจุกเส้นใย และความกว้างของเส้นใย ของกากมันปะหลังขนาดใหญ่กว่า 25 เมชมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ กากมันสำปะหลังขนาดระหว่างตะแกรง 25-50 และขนาดเล็กกว่า 50 เมช ตามลำดับ แต่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเป็นไปในทางกลับกัน คือกากขนาดเล็กกว่าตะแกรง 50 เมชมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากที่สุด และเมื่อนำกากมันสำปะหลังมาขึ้นแผ่นทดสอบ เนื่องจากกากมันสำปะหลังขนาดใหญ่กว่า 25 เมช มีปริมาณน้อยไม่เพียงพอ จึงใช้เฉพาะกากขนาดระหว่างตะแกรง 25-50 และขนาดเล็กกว่า 50 เมช มาผสมเยื่อใยสั้นด้วยอัตราส่วน 5:95 และ 10:90 พบว่า ความหนาแน่นปรากฏ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความเรียบ และการต้านอากาศ ของการผสมกากขนาดเล็กกว่า 50 เมช ให้สมบัติกระดาษที่ดีกว่ากากมันสำปะหลังขนาดระหว่างตะแกรง 25-50 เมช และเมื่อเพิ่มปริมาณกากมันสำปะหลังในการผสมเยื่อใยสั้น ทำให้สมบัติกระดาษลดลง

ขนาดของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตเยื่อคือ ขนาดใหญ่กว่าตะแกรง 50 เมช เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่าเยื่อใยสั้นและจำนวนกระจุกเส้นใยอยู่มาก ทำให้สมบัติกระดาษไม่ดี แต่กากมันสำปะหลังส่วนที่เล็กกว่าตะแกรง 50 เมช เส้นใยมีขนาดเล็กอยู่แล้วถ้านำมาผลิตเยื่อต่อจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กกว่าเดิม และอาจส่งผลให้สมบัติของกระดาษลดลง

5.1.2 ผลการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลัง

เมื่อนำกากมันสำปะหลังขนาดใหญ่กว่า 50 เมช มาผลิตเยื่อต่อด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18, 21, 24 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15, 18, 21 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด กรดแอซีติกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ

30, 60, 70 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด และเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 60, 70 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด พบว่า ผลผลิตที่ได้ของการผลิตเยื่อด้วยการบดมีค่าสูงที่สุด และการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลผลิตเยื่อน้อยที่สุด และระดับความเข้มข้นของสารเคมีที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ผลผลิตเยื่อที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของสัณฐานวิทยาของเส้นใยกากมันสำปะหลัง พบว่า การผลิตเยื่อในทุกภาวะ ทำให้จำนวนกระจุกเส้ยใยลดลง และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น โดยการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการบดทำให้เส้นใยขนาดเล็กลงใกล้เคียงกับเยื่อใยสั้น เมื่อนำกากมันสำปะหลังทุกภาวะผสมเยื่อใยสั้นในอัตราส่วน 10:90 มาขึ้นแผ่นทดสอบสมบัติของกระดาษ ความหนาแน่นปรากฏของโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลดีที่สุด ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงฉีกของการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ให้ค่ามากที่สุด ความเรียบของกากมันปะหลังที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 มีค่ามากที่สุด และการต้านอากาศของกากมันปะหลังที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 24 ส่งผลต่อการต้านอากาศมากที่สุด

จากผลการทดลองภาวะการผลิตเยื่อที่เหมาะสมของกากมันสำปะหลัง คือการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด และการบดเยื่อที่ค่าสภาพระบายได้ 258 มิลลิลิตร ให้สมบัติของกระดาษที่ดี จึงนำมาหาอัตราส่วนเพื่อการทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

5.1.3 ผลการหาอัตราส่วนการใช้กากมันสำปะหลังทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก

เมื่อนำเยื่อกากมันสำปะหลังที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มช้นร้อยละ 15 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด และการบดเยื่อที่ค่าสภาพระบายได้ 258 มิลลิลิตร มาผสมเยื่อรีไซเคิลด้วยอัตราส่วนดังนี้ 5:95, 10:90 และ 20:80 ได้ว่า ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ และปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลังหลังการผลิตเยื่อในทุกภาวะมีค่าลดลง ส่วนสมบัติของกระดาษมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนในการเติมกากมันสำปะหลังมากขึ้น แต่การต้านอากาศเมื่อเพิ่มกากมันสำปะหลังจากการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์มีค่าที่มากขึ้น และผลความแข็งแรงต่อแรงดึงของปริมาณของเยื่อกากมันสำปะหลังที่ผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อ

เยื่อรีไซเคิลที่อัตราส่วน 20:80 ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุด แต่ให้ค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอ และความความเรียบที่ไม่ดี

สมบัติที่สำคัญของกระดาษลอนลูกฟูกคือ ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อการโค้งงอ ซึ่งการผลิตเยื่อจากกากมันสำปะหลังที่ให้ความแข็งแรงดังกล่าวดีที่สุด คือการผลิตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 18 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ด้วยอัตราส่วนกากต่อเยื่อรีไซเคิล 5:95

5.2.ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในขั้นตอนการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจลดความเข้มข้นลงจากร้อยละ 18 เพื่อประหยัดสารเคมี เพราะสมบัติกระดาษไม่ได้แตกต่างกันมาก เมื่อเพิ่มระดับความเข้นข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2.2 อาจเพิ่มอัตราส่วนในการเติมกากมันสำปะหลังจากการผลิตเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 18 ต่อเยื่อรีไซเคิล เนื่องจากผลของความแข็งแรงต่อแรงดึงที่อัตราส่วนกากต่อเยื่อรีไซเคิลที่ 20:80 ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด

5.2.3 นำกากมันสำปะหลังขนาดเล็กกว่าตะแกรง 50 เมช มาผสมในกระดาษอาจเพิ่มสมบัติกระดาษ

รายการอ้างอิง

[1] การวิเคราะห์ตลาดมันสำปะหลังไทย[ออนไลน์]. (ม.ป.ป.) แหล่งที่มา http://www.thaitapiocastarch.org [25 สิงหาคม 2554]

[2] มันสำปะหลัง [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.) แหล่งที่มา http://web.ku.ac.th/agri/job198/topic.htm [25 สิงหาคม 2554]

[3] มันสำปะหลัง [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.) แหล่งที่มา http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=14 [25 สิงหาคม 2554]

[4] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

[5] การบำบัดและการใช้ประโยชน์จากราก เหง้า กากมัน [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.) แหล่งที่มา http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail [15 กันยายน 2554]

[6] Biermann, C.J. Essential of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.

[7] Kline, J.E. Paper and Paperboard Manufacturing and Converting Fundamentals. San Francisco: Miller Freeman, 1991.

[8] Sjostrom, E. Wood Chemistry Fundamentals and Application. San Diego: Academic Press, 1993.

[9] Sjostrom, E. and Alen, R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Germany: Springer, 1999.

[10] Cell Wall Polysaccharides, Fiber, Gums [online]. 2010. Available form: http://www.uky.edu/~dhild/biochem/11B/lect11B.html [2011, August 25]

[11] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.

[12] Composition of the wood cell wall. 2011. Available form: http://www.umk.fi/en/NL0209/newsletter_NL0209_Taipale.html [2011, August 25]

[13] องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้. (ม.ป.ป.) แหล่งที่มา http://buranapagroup.com/knowledge _chemical.php [25 สิงหาคม 2554]

[14] Lignin [online]. (n.d.) Available form: http://5e.plantphys.net/image.php?id=130 [2011, August 25]

[15] Lignin [online]. (n.d.) Available form: www.chem.vt.edu/chem-dept/helm/3434WOOD /notes1/lignin.html [2011, August 25]

[16] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper Technologists. Vancouver: Angus Wilde Publication, 2002.

[17] Johansson, A., Aaltonen O. and Ylinen P. Organosolv Pulping-Methods and Pulp Properties. Biomass 13 (1987): 45-65.

[18] Jonson, G. Corrugated Board Packaging. Surrey: Pira International, 1993.

[19] Corrugated board [online]. (n.d.) Available form: http://www.pt-pack.com [2011, August 25]

[20] Corrugated board [online]. (n.d.) Available form: http://www.aegiscontainer.com/commonterms.htm [2011, August 25]

[21] Corrugated board [online]. (n.d.) Available form: http://www.packaging-gateway.com /projects/smurfit_mbi/smurfit_mbi1.html [2011, August 25]

[22] Corrugated board [online]. (n.d.) Available form: http://duropack.at.nocache .gugler.at/en/corrugated-board/production-program.html

[2011, August 25]

[23] Minor, J.L. Hornification-its origin and meaning. Progr Pap Recycling 3 (1994): 93-95.

[24] ศุภลักษณ์ โอสถานนท์. การใช้กากมันสำปะหลังเพื่อทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[25] สาวิตรี พิสุทธิ์พิเชฏฐ์. การใช้กากมันสำปะหลังทดแทนเยื่อกระดาษจากกล่องกระดาษลูกฟูกที่ใช้แล้วเพื่อผลิตกระดาษลอนลูกฟูก. ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์, คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548

[26] LÓpez, F., Ariza, J., Pérez, I. and Jiménez, L. Comparative study of paper sheets from olive tree wood pulp obtained by soda, sulphite or kraft pulping. Bioresource Technology 71 (2000): 83-86.

[27] Caparrós, S., Ariza, J., López, F., Nacimiento, J.A., Garrote, G. and Jiménez, L. Hydrothermal treatment and ethanol pulping of sunflower stalks. Bioresource Technology 99 (2008): 1368-1372.

[28] Ligero, P., Villaverde, J.J., Vega, A. and Bao, M. Acetosolv delignification of depithed cardoon (Cyanara cardunculus) stalk. Industrial Crops and Product 25 (2007): 294-300.

[29] TAPPI. TAPPI Test Methods. Atlanta: TAPPI Press, 2002.

[30] International standard. Paper, board and pulps. Switzerland. International Organization for Standardization, 2003.

ภาคผนวก

การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและการเตรียมเยื่อ

1. วิธีการเตรียมเยื่อในการบดเยื่อด้วยเครื่อง Valley Beater

เครื่องบดเยื่อ Valley beater ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 โดยใช้น้ำหนักเยื่อแห้ง 360 กรัม ในน้ำปริมาตร 23000 มิลลิลิตร ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 กำหนดให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นร้อยละ 80 แสดงว่า เมื่อชั่งกากมันสำปะหลัง 100 กรัม จะมีกากมันสำปะหลังแห้งอยู่ 20 กรัม

หาปริมาณของการเตรียมกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลัง	(100-80)	กรัมแห้งในน้ำหนักทั้งหมด	100	กรัม
ต้องการน้ำหนักเยื่อแห้งที่ใช้	360	กรัมแห้ง		

เพราะฉะนั้นต้องชั่งกากมันสำปะหลัง = $\frac{360 \times 100}{(100-80)}$

ดังนั้นต้องชั่งกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นร้อยละ 80 มา 1800 กรัมถึงจะได้น้ำหนักแห้ง 360 กรัมแห้ง ซึ่งในกากมันสำปะหลังที่ชั่งมามีน้ำอยู่แล้ว 1800 – 360 = 1440 กรัม

เพราะฉะนั้นต้องเติมน้ำเข้าไปในเครื่องบดเยื่ออีก 23000 – 1440 = 21560 กรัม

2. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าสภาพระบายได้ (freeness)

การวัดค่าสภาพระบายได้ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร ในการหาค่าสภาพระบายได้ ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาตรน้ำเยื่อ หรือเยื่อกากมันสำปะหลังเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อ โดยกำหนดให้เยื่อมาจากเครื่องบดเยื่อคือ ร้อยละ 1.56

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าสภาพระบายได้เยื่อ 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 มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.56 มา 192 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

3. **การคัดขนาดกากมันสำปะหลังในขั้นตอนที่ 2**

การคัดขนาดกากมันสำปะหลังโดยใช้น้ำไปตัวนำพา โดยกำหนดน้ำหนักกากมันสำปะหลัง 2000 กรัม ในน้ำ 3800 มิลลิลิตร เมื่อผสมเข้ากันดี จึงเทลงบนตะแกรงขนาด 50 เมช แล้วฉีดน้ำลงบนตะแกรงที่มีกากมันสำปะหลังเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกากมันสำปะหลังส่วนบนตะแกรงมาใช้ในการวิจัยขั้นที่ 2

4. **วิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อเชิงเคมี**

การเตรียมกากมันสำปะหลังก่อนการผลิตเยื่อ

กำหนดให้ใช้น้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง 70 กรัม ต่อการผลิตต่อครั้ง โดยมีความชื้นร้อยละ 75 และในการต้มเยื่อกำหนดให้มีค่าของเหลวต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง (L: W) เป็น 10 ต่อ 1

- การหาน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง จากความชื้นร้อยละ 75

น้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง 100-75= 25 กรัมจะมีน้ำหนักเท่ากับ 100 กรัม

ถ้าน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง 70 กรัมจะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ = $\frac{70 \times 100}{25}$ กรัม

เพราะฉะนั้นน้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ใช้คือ 280 กรัม

- การหาอัตราส่วนของของเหลวทั้งหมด จากค่า L:W = 10:1

น้ำหนักแห้งของกากมันสำปะหลังที่ใช้การผลิตเยื่อเท่ากับ 70 กรัมแห้ง ดังนั้นปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ 10 x 70 = 700 กรัม

ปริมาณสารเคมีที่ต้องเติม

- <u>การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักแห้ง</u>

น้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง 100 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 กรัม

ถ้าน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้ง 70 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ = $\frac{70 \times 18 \text{ กรัม}}{100}$

เพราะฉะนั้นต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12.6 กรัม ในการละลายในน้ำที่เติมเพื่อให้ได้ปริมาตรรวม โดยต้องหักน้ำในเยื่อออกด้วย คือ

ปริมาตรของเหลวทั้งหมดคือ 700 กรัม

น้ำในกากมันสำปะหลังที่ความชื้นร้อยละ 75 คือ 280 – 70 = 210 กรัม

ดังนั้นต้องละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้ำหนัก 12.6 กรัมในน้ำ 700 – 210 = 490 กรัม

- <u>การเตรียมโซเดียมไบซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 18 ของของเหลวทั้งหมด</u>

เนื่องจากสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ มีความเข้มข้นร้อยละ 40 ต่อปริมาตร จึงต้องนำมาเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดย

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ คือ ร้อยละ 40

C_2 = ความเข้มข้นของของสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ คือ ร้อยละ 18

V_1 = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ต้องตวง

V_2 = ปริมาตรของของเหลวทั้งหมดในระบบคือ 700 มิลลิลิตร

$$40 \times V_1 = 18 \times 700$$

$$V_1 = (18 \times 700)/40$$

V_1 = 315 มิลลิลิตร

หลังจากนั้นนำมาละลายในน้ำที่ต้องเติมให้ได้ปริมาตรรวม ซึ่งต้องหักน้ำในกากมันสำปะหลังออกที่ความชื้นร้อยละ 75 คือ 280 – 70 = 210 มิลลิลิตร

ดังนั้นน้ำที่เติมเพิ่มคือ 700 – 315 – 210 = 175 มิลลิลิตร

- <u>การเตรียมกรดอะแซติกความเข้มข้นร้อยละ 30 ของของเหลวทั้งหมด</u>

การเติมกรดอะแซติกจากความเข้มข้นร้อยละ 100 ซึ่งสามารถคิดโดยตรงจากจากปริมาตรรวมเลย คือ

ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร มีกรดอะแซติก 30 มิลลิลิตร

แต่ปริมาตรทั้งหมด 700 มิลลิลิตร ต้องการกรดอะแซติก = $\frac{30 \times 700}{100}$ มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องตวงกรดอะแซติกมา 210 มิลลิลิตร และเติมน้ำเข้ าตรทั้งหมด โดยหักน้ำในกากมันสำปะหลังออก คือ 700 – 210 – 210 = 280 มิลลิลิตร

- <u>การเตรียมเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ของของเหลวทั้งหมด</u>

เนื่องจากสารละลายเอทานอล มีความเข้มข้นร้อยละ 95 ต่อปริมาตร จึงต้องนำมาเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดย

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล คือ ร้อยละ 95

C_2 = ความเข้มข้นของของสารละลายเอทานอล คือ ร้อยละ 30

V_1 = ปริมาตรของสารละลายเอทานอลที่ต้องตวง

V_2 = ปริมาตรของของเหลวทั้งหมดในระบบคือ 700 มิลลิลิตร

$$95 \times V_1 = 30 \times 700$$

$$V_1 = (30 \times 700)/95$$

V_1 = 221 มิลลิลิตร

หลังจากนั้นนำมาละลายในน้ำที่ต้องเติมให้ได้ปริมาตรรวม ซึ่งต้องหักน้ำในกากมันสำปะหลังออกที่ความชื้นร้อยละ 75 คือ 280 – 70 = 210 มิลลิลิตร

ดังนั้นน้ำที่เติมเพิ่มคือ 700 – 221 – 210 = 269 มิลลิลิตร

5. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ

- <u>แผ่นชิ้นทดสอบควบคุม (เยื่อใยสั้นล้วน)</u>

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นชิ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0314 ตารางเมตร ดังนั้นถ้าจะทำการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับดังนี้

แผ่นชิ้นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 75 กรัม

ถ้าแผ่นชิ้นทดสอบมีขนาด 0.0314 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ

75×0.0314 = 2.36 กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 2.36 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นชิ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร แต่ละภาวะจะทำการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ 10 แผ่น ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ 2.36 x 10 = 23.6 กรัม เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 โดยวิธีการเทียบปริมาตรน้ำเยื่อ ดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 1.56 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 23.6 กรัม ต้องตวงน้ำเยื่อมาจากในเครื่องบดเยื่อเท่ากับ (23.6×100)/1.56 = 1512 มิลลิลิตร

นำปริมาตรน้ำเยื่อที่คำนวณได้จากเครื่องบดเยื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ หลังจากนั้นทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น เนื่องจากแผ่นชิ้นทดสอบขนาด 75 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อ 2.36 กรัม ดังนั้นจะต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 2.36 โดยการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 2.36 ต้องตวงมาจากน้ำเยื่อเท่ากับ (2.36×100)/0.3 = 786 มิลลิลิตร

ดังนั้นตวงน้ำเยื่อจำนวน 786 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นชิ้นทดสอบที่มีขนาด 75 กรัมต่อตารางเมตร

- <u>แผ่นชิ้นทดสอบที่ผสมกากมันสำปะหลัง</u>

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นชิ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร โดยอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อเยื่อใยสั้น คือ 10:90

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 2.36 กรัมในการขึ้นแผ่นจากการคำนวณข้างต้น เพื่อทำให้แผ่นชิ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร แต่ละภาวะจะทำการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ 10 แผ่น ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ 2.36 x 10 = 23.6 กรัม

เพราะฉะนั้นต้องแยกส่วนของการผสมโดยกากมันสำปะหลังผสมร้อยละ 10 คือ

จากน้ำหนักเยื่อทั้งหมด 100 กรัมมีกากมันสำปะหลัง 10 กรัม

ถ้าน้ำหนักเยื่อ 23.6 กรัม ต้องเติมกากมันสำปะหลัง $= \frac{10 \times 23.6}{100} = 2.36$ กรัม

ถ้าความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับร้อยละ 75 [illegible]ามีกากมันสำปะหลังแห้งอยู่ (100 – 75) จากน้ำหนักทั้งหมด 100 กรัม

ต้องการกากมันสำปะหลัง 2.36 กรัม ต้องชั่งกากมันทั้งหมด $= \frac{2.36 \times 100}{100-75} = 9.44$ กรัม

และส่วนเยื่อใยสั้นที่ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 90 คำนวณจาก

จากน้ำหนักเยื่อทั้งหมด 100 กรัมมีกากมันสำปะหลัง 90 กรัม

ถ้าน้ำหนักเยื่อ 23.6 กรัม ต้องเติมกากมันสำปะหลัง $= \frac{90 \times 23.6}{100} = 21.24$ กรัม

น้ำหนักเยื่อ 1.56 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 21.24 กรัม ต้องตวงน้ำเยื่อมาจากในเครื่องบดเยื่อเท่ากับ (21.24×100)/1.56 = 1361 มิลลิลิตร

นำปริมาตรน้ำเยื่อที่คำนวณได้จากเครื่องบดเยื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นชิ้นทดสอบ หลังจากนั้นทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น เนื่องจากแผ่นชิ้นทดสอบขนาด 75 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อ 2.36 กรัม ดังนั้นจะต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 2.36 โดยการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 2.36 ต้องตวงมาจากน้ำเยื่อเท่ากับ (2.36×100)/0.3 = 786 มิลลิลิตร

ดังนั้นตวงน้ำเยื่อจำนวน 786 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นชิ้นทดสอบที่มีขนาด 75 กรัมต่อตารางเมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาว นันทพร ตรีภพนาถ เกิดเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสายปัญญาในพระบรมราชินูปถัมภ์
- ปี พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ผลงานวิชาการ

- Tripopnat, N., and Suvarnakich, K. (2011). Mechanical and chemical pulping of cassava residue. The 1st National and International Graduate Study Conference 2011, (IGSC2011) "Creative Education". pp. 1237-1241, 10-11 May 2011. Bangkok, Thailand.