การใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่า

นางสาววัจนา พัสดุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF CELLULASE COMBINED WITH LACCASE IN FLOTATION DEINKING OF OLD NEWSPRINT

Miss Watchana Passadu

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่า
โดย	นางสาววัจนา พัสดุ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์)

วัจนา พัสดุ : การใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่า. (UTILIZATION OF CELLULASE COMBINED WITH LACCASE IN FLOTATION DEINKING OF OLD NEWSPRINT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. สีหนาท ประสงค์สุข, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยเซลลูเลสผลิตมาจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* ในขณะที่แลกเคสผลิตมาจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* ซึ่งเชื้อราเน่าขาวชนิดนี้เป็นสายพันธุ์ที่สามารถคัดแยกได้ในประเทศไทย การทดลองเริ่มจากทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับการทดลองที่มีการใช้เอนไซม์ ซึ่งเป็นการศึกษาผลการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้ โดยตัวแปรที่สำคัญในการศึกษามี 3 ตัวแปร คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ปริมาณของเอนไซม์ และชนิดของเอนไซม์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของเอนไซม์ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้น รวมถึงใช้ปริมาณเซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เยื่อที่ได้มีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง ค่าความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองควบคุม โดยการใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่าความขาวสว่างสูงสุด ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำสุด และค่าความแข็งแรงของกระดาษสูงสุด ซึ่งผลการทดลองที่ได้ดีกว่าการใช้เซลลูเลสเพียงอย่างเดียว การใช้เซลลูเลสในปริมาณร้อยละ 0.15, 0.1 และ 0.05 ร่วมกับแลกเคสในปริมาณร้อยละ 0.05, 0.1 และ 0.15 และการใช้แลกเคสเพียงอย่างเดียว ที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ เมื่อศึกษาผลของชนิดเอนไซม์ พบว่า การใช้เซลลูเลสให้ผลการทดลองที่ดีกว่าแลกเคส อย่างไรก็ตาม ตัวแปรทั้งสามไม่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

5172444323 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY
KEYWORDS : FLOTATION DEINKING / CELLULASE / LACCASE / NEWSPRINT
WATCHANA PASSADU : UTILIZATION OF CELLULASE COMBINED WITH LACCASE IN FLOTATION DEINKING OF OLD NEWSPRINT. THESIS ADVISOR : SEHANAT PRASONGSUK, Ph.D. 133 pp.

This research studied the effects of cellulase and laccase in flotation deinking of old newsprint. The cellulase was produced from *Aspergillus niger* while the laccase was produced from a white rot fungus *Pycnoporus sanguineus* which was isolated in Thailand. The flotation deinking was firstly performed without using enzyme (control experiment). The obtained results were then used to compare with the case of using enzymes in experiments. Three variables to be studied in the phase were enzyme reaction time, enzyme dosage and enzyme types to examine the effects of these enzymes on flotation efficiency. It was found that longer reaction time as well as higher cellulase together with laccase dosages led to higher brightness, lower ERIC (effective residual ink concentration), longer fiber length, lower fines content, higher tensile index, higher burst index and higher tear index than the control. The use of cellulase together with laccase at the dosage of 0.2% (based on o.d. pulp weight) each provided the best deinking results as indicated by the highest brightness, lowest ERIC and highest paper strength. These results were better than in the case of using cellulase alone, the case of using cellulase in the dosage of 0.15%, 0.1% and 0.05% together with laccase in the dosage of 0.05%, 0.1% and 0.15% and the case of using laccase alone, respectively. When the effects of enzyme types were studied, it was found that the results obtained from using cellulase alone were better than using laccase alone. It was also found that all three variables which were enzyme dosage, enzyme type and reaction time did not affect flotation yield.

Field of Study : Pulp and Paper Technology Student's Signature .....
Academic Year : 2010 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ ผู้ทำหน้าที่เสมือนเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาอีกหนึ่งท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตลอดจนเอาใจใส่ดูแล สนับสนุนและให้กำลังใจ รวมถึงกรุณาช่วยตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ และอาจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาสละเวลามาทำการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณอาณัติ อธิคมปัญญาวงศ์ Senior vice president บริษัท The Post Publishing (มหาชน) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนหนังสือพิมพ์ Post Today สำหรับเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีการพิมพ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษและภาควิชาพฤกษศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดลองในระหว่างการทำวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาทุกท่าน สำหรับการอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ น้องและเพื่อนๆ หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษและภาควิชาพฤกษศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ แนะนำและเป็นกำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ และขอบคุณพี่สาว ที่ได้ให้กำลังใจด้วยความห่วงใย สนับสนุนและช่วยเหลือทางด้านการเรียนและการวิจัย แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…… ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง…… ฌ

สารบัญภาพ……... ฐ

บทที่ 1 บทนำ…… 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา…….. 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย…….. 2

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น…… 3

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย……... 3

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย…… 4

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ……. 4

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย……... 5

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย…… 5

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……. 6

2.1 แนวคิดและทฤษฎี…….. 6

2.1.1 กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ (deinking process)…….. 6

2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก (deinking chemicals)…… 11

2.1.3 การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก (ink redeposition)……... 17

2.1.4 กระบวนการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ (flotation deinking process)…….. 17

2.1.5 ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก (deinkability)……... 22

2.1.6 กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยระบบออฟเซต……. 22

2.1.7 ความสำคัญของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึก……. 23

2.1.8 เคมีของเส้นใย (fiber chemistry)……. 26

หน้า

2.1.9 เอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกจากเส้นใย..... 28
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 36
3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 37
3.1.1 วัสดุและสารเคมี..... 37
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 37
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... 39
3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ..... 39
3.2.2 การทดลองส่วนที่ 1: การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) 42
3.2.3 การทดลองส่วนที่ 2: ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้..... 44
3.3 วิธีการทดสอบสมบัติของเยื่อกระดาษและการวิเคราะห์ข้อมูล..... 48
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 57
4.1 ผลของการใช้เอนไซม์และระยะเวลาในการพักเยื่อ (การวิเคราะห์ผลตอนที่ 1) 57
4.2 ศึกษาผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (การวิเคราะห์ผลตอนที่ 2)..... 74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... 95
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 95
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 96
รายการอ้างอิง..... 98
ภาคผนวก..... 103
ภาคผนวก ก..... 104
ภาคผนวก ข..... 108
ภาคผนวก ค..... 112
ภาคผนวก ง..... 125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 133

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ขนาดของอนุภาคหมึกในแต่ระบบการพิมพ์	23
2-2	การจำแนกทางอนุกรมวิธาน (scientific classification) ของ *Aspergillus niger*.....	29
2-3	การจำแนกทางอนุกรมวิธาน (scientific classification) ของ *Pycnoporus sanguineus*.....	32
3-1	การออกแบบการทดลองส่วนที่ 1.....	44
3-2	การออกแบบการทดลองส่วนที่ 2 เพื่อหาระยะเวลาการพักเยื่อที่เหมาะสม.....	45
3-3	สภาวะในการทดลองส่วนที่ 2 โดยมีการใช้ปริมาณและชนิดของเอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสในระดับต่างๆ.....	47
4-1	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1.....	58
4-2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที.....	59
4-3	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อความขาวสว่าง.....	60
4-4	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่.....	62
4-5	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	64
4-6	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ...	66
4-7	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อดรรชนีความต้านทานแรงฉีก.....	69
4-8	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ.....	71
4-9	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ.....	73
4-10	การทดลองตอนที่ 2.....	75
4-11	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อสมบัติเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก.....	76
4-12	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความยาวเส้นใย (LWW).....	77
4-13	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก.....	78

หน้า

4-14	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความโค้งงอของเส้นใย.....	79
4-15	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีการหักงอของเส้นใย.....	80
4-16	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความกว้างของเส้นใย.....	81
4-17	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความขาวสว่าง.....	82
4-18	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่.....	84
4-19	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	86
4-20	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ...	88
4-21	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีความต้านทานแรงฉีก.....	90
4-22	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ.....	92
4-23	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ.....	94
ค-1	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบ.....	112
ค-2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบ.....	113
ค-3	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ.....	114
ค-4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบ...	115
ค-5	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ	

หน้า

คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบ..... 116
ค-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ..... 117
ค-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อคือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อ..... 118
ค-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก..... 119
ค-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก..... 119
ค-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก..... 120
ค-11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก..... 120
ค-12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก..... 121
ค-13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออก... 121
ค-14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออก... 122
ค-15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณ

หน้า

	ของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความยาวของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก……	122
ค-16	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมึกออก..	123
ค-17	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความโค้งงอของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก….	123
ค-18	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีการหักงอของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก……..	124
ค-19	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความกว้างของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก…..	124
ง-1	ค่าความขาวสว่าง (brightness) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ……..	125
ง-2	ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ในเยื่อ ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ……...	126
ง-3	ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ…….	127
ง-4	ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ…….	128
ง-5	ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ…….	129
ง-6	ค่าสภาพระบายได้ (freeness) ของเยื่อ ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ……...	130
ง-7	ค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้ (yield) เมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ…….	131
ง-8	ค่าเฉลี่ยลักษณะสันฐานวิทยาของเส้นใยก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ……...	132

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	เครื่องตีกระจายเยื่อ (pulper)……	7
2-2	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบตะแกรง (screen)……	7
2-3	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ centrifugal reverse cleaner……..	8
2-4	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ centrifugal forward cleaner……..…….	9
2-5	การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง (wash deinking)……..	9
2-6	เครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell) ขนาดห้องปฏิบัติการ..……	10
2-7	การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ (flotation deinking)……..	11
2-8	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้กำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ…	14
2-9	สารลดแรงตึงผิวฟอร์มตัวเป็นไมเซล (surfactant micelle)……..	15
2-10	การทำงานของสารรวบรวม……..	16
2-11	ค่าความขาวสว่างที่ได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ……..	16
2-12	ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างและเวลาที่ใช้ในการลอยฟองอากาศ…….	18
2-13	ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างและการสูญเสียเยื่อในระบบ……....	18
2-14	กลไกของอนุภาคหมึกที่ยึดติดกับฟองอากาศ……..	19
2-15	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคหมึกและวิธีการกำจัดหมึกพิมพ์…..….	20
2-16	การยึดติดระหว่างอนุภาคของหมึกและฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร……	20
2-17	แนวเส้นกระแสและการชนกันระหว่างอนุภาคหมึกกับฟองอากาศ……..	21
2-18	ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกของกระดาษเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว……..……...	22
2-19	แบบจำลองการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์……..	25
2-20	โครงสร้างของเซลลูโลส……	26
2-21	บริเวณส่วนที่เป็นระเบียบและส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเซลลูโลส……..	27
2-22	โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้สน spruce……...	28
2-23	ลักษณะของ *Aspergillus niger* ..……	29
2-24	ลักษณะของ *Pycnoporus sanguineus*……..	32
3-1	ลักษณะของเชื้อราที่เจริญอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร (ก) PDA และ (ข)	

หน้า

	production medium เป็นเวลา 7 วันเพื่อผลิตเป็นเซลลูเลส……	40
3-2	ลักษณะของเชื้อราที่เจริญอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร (ก) PDA เป็นเวลา 7 วัน และ (ข) production medium; GYP เป็นเวลา 10 วันเพื่อผลิตเป็นแลกเคส…..	41
3-3	เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness tester)……...	48
3-4	เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer, FQA)……..	49
3-5	เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (Rapid-Kothen sheet former)……	50
3-6	ลักษณะของการตัดแผ่นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต่างๆ……	51
3-7	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ (Color touch PC)……	53
3-8	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength tester)……	54
3-9	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength tester)……...	55
3-10	เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Elmendolf tearing resistance tester)……	56
4-1	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ……	60
4-2	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ……	63
4-3	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ……..	65
4-4	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ……...	67
4-5	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ……	70
4-6	ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ……	72
4-7	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ……	82
4-8	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ……...	84
4-9	ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ……	86

หน้า

4-10 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ..... 89
4-11 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ..... 90
4-12 ผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศ..... 93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการนำกระดาษกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลกระดาษมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากมนุษย์เราตระหนักถึงความสำคัญของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โครงการนี้จึงมีความสนใจในการใช้เยื่อกระดาษให้คุ้มค่าโดยการนำกระดาษมารีไซเคิลใหม่ อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับกระดาษที่นำมารีไซเคิล กระดาษนั้นควรผ่านกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ (deinking) ออกก่อนที่จะนำกระดาษกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพและมีค่าความขาวสว่างสูง โดยทั่วไปแล้ววิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษที่นิยม ได้แก่ การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (flotation deinking) เนื่องจากใช้น้ำในปริมาณน้อยและให้ผลผลิตของเยื่อกระดาษสูง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการกำจัดหมึกออกจากกระดาษด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้โดยมีการใช้เอนไซม์ เช่น เซลลูเลส (cellulase) และ/หรือ เฮมิเซลลูเลส (hemicellulase) ร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเซลลูเลสหรือเฮมิเซลลูเลสสามารถเข้าไปตัดสายโซ่เซลลูโลส (cellulose) หรือเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) หลังจากเส้นใยถูกเปิดผิวหน้าด้วยแรงกลจากเครื่องตีกระจายเยื่อ ทำให้อนุภาคหมึกสามารถหลุดออกจากเส้นใยได้มากขึ้น และจากการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เซลลูเลสร่วมกับเฮมิเซลลูเลสที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกจากกระดาษรีไซเคิลด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเพิ่มมากขึ้นจาก 73% เป็น 95% ในกรณีของกระดาษหนังสือพิมพ์ซึ่งเป็นกระดาษที่มีสารประกอบลิกนิน (lignin) อยู่นั้น ลิกนินจะไวต่อแสง ความร้อนและความชื้น ทำให้กระดาษกลายเป็นสีเหลืองได้ แลคเคส (laccase) เป็นเอนไซม์สำคัญที่สามารถออกซิไดซ์สารประกอบที่มีส่วนผสมของสารลิกนินได้ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าโดยใช้เซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลสร่วมกับแลกเคส-ไวโอลูริคแอซิด (laccase-violuric acid system) โดยไวโอลูริคแอซิดเป็นตัว mediator พบว่า ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลงและค่าความขาวสว่างสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้แลกเคส-ไวโอลูริคแอซิดจะไปเปลี่ยนแปลงหรือทำลายโครงสร้างย่อยของลิกนิน

ด้วยข้อมูลดังกล่าวเบื้องต้นจึงมีแนวคิดที่จะนำแลกเคส (โดยปราศจากการใช้ mediator ร่วมกับแลกเคส) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลลูเลสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการผลิตเอนไซม์ด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยผลิตเซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* และผลิตแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาว (white rot

fungus) ชนิด *Pycnoporus sanguineus* สายพันธุ์ที่คัดแยกได้ในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยตัวแปรสำคัญในการศึกษามี 3 ตัวแปร คือ ปริมาณของเอนไซม์ ชนิดของเอนไซม์ และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา โครงการวิจัยนี้นอกจากจะช่วยรักษาสภาพแวดล้อม เนื่องจากเป็นการหมุนเวียนนำสิ่งที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ยังอาจช่วยลดการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อได้ และข้อมูลที่ได้ยังสามารถใช้เป็นฐานเบื้องต้นสู่การพัฒนาใช้จริงในภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อรา *Aspergillus niger* ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศและต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

1.2.2 ศึกษาผลของการใช้แลกเคสจากเชื้อราเน่าขาว (white rot fungus) ชนิด*Pycnoporus sanguineus* สายพันธุ์ที่คัดแยกได้ในประเทศไทย ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศและต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

1.2.3 ศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศและต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ผลิตเซลลูเลสจากเชื้อรา *Aspergillus niger* และผลิตแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาว (white rot fungus) ชนิด *Pycnoporus sanguineus* และวิเคราะห์ปริมาณแอคติวิตี (activity) ของเอนไซม์ จากนั้นกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) โดยนำกระดาษมาตีกระจายเยื่อที่ความเข้มข้นของเยื่อ 6% โดยปรับค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 5.5 ±0.2 จากนั้นใส่สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที ใช้ความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อของเครื่อง 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C เมื่อตีกระจายเยื่อจนครบเวลาแล้ว จะพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาอีก 30 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำลงไป 1 ลิตร และปรับอุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 90 ^{O}C ทิ้งไว้ 5 นาที (ทั้งนี้เพื่อเลียนแบบและเป็นการทำตามการทดลองที่ใช้เอนไซม์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง 90 ^{O}C แล้วทิ้งไว้ 5 นาทีนั้น เพื่อเป็นการหยุดการทำงานของเอนไซม์) จากนั้นนำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายแล้วมาทำการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้ความเข้มข้นของเยื่อ 0.8% ใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที เมื่อกำจัดหมึกออกจนครบเวลาแล้ว ทำการคำนวณหาปริมาณผลผลิตที่ได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพของเยื่อทั้งก่อน

และหลังการกำจัดหมึกออก โดยหาค่าสภาพระบายได้ ความยาวของเส้นใย และปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก เป็นต้น และนำเยื่อทั้งก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก เป็นต้น เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้เอนไซม์ สำหรับการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้นั้น โดยวิธีการจะเหมือนกับการทดลองควบคุม เพียงแต่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ นอกจากจะใส่สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุแล้ว จะมีการใส่เอนไซม์ร่วมด้วย ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ปริมาณของเอนไซม์ และชนิดของเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาในการพักเยื่อต่างกัน คือ 0 และ 30 นาที ใช้ปริมาณเอนไซม์แตกต่างกัน ดังนี้คือ ใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และใช้แลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ส่วนภาวะในการตีกระจายเยื่อ กระบวนการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ และการวัดค่าสมบัติของเยื่อและกระดาษทำเช่นเดียวกับการทดลองควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งทุกสภาวะการทดลอง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA เพื่อเปรียบเทียบผลของการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) กับการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้

1.4 **ข้อตกลงเบื้องต้น**

ศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* แลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* สายพันธุ์ที่สามารถคัดแยกได้ในประเทศไทย และการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและศึกษาสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

1.5 **ข้อจำกัดของการวิจัย**

เนื่องจากการผลิตเอนไซม์ยังคงมีต้นทุนในการผลิตสูง นอกจากนี้เอนไซม์ที่ผลิตได้จากเชื้อรามีองค์ประกอบของเอนไซม์ไม่ครบทุกองค์ประกอบ หรือมีองค์ประกอบอยู่ในระดับต่ำ ในบางครั้งเอนไซม์ที่ผลิตได้จากเชื้อรา มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายต่ำภายใต้สภาวะของการทดลอง หรือถูกยับยั้งโดยผลิตภัณฑ์สุดท้าย จึงทำให้การนำเอนไซม์ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังคงต้องมีการศึกษาและพัฒนาใช้จริงต่อไป

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (flotation deinking) เป็นการแยกอนุภาคหมึกออกจากเส้นใย เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพ มีค่าความขาวสว่างสูง โดยในขั้นตอนของการตีกระจายเยื่อจะใส่สารลดแรงตึงผิวที่เรียกว่าสารรวบรวม (collector) เพื่อเป็นการปรับระบบให้มีสภาพไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และทำให้อนุภาคของหมึกเกาะกลุ่มรวมเป็นอนุภาคใหญ่ (agglomeration) อนุภาคของหมึกที่มีขนาดใหญ่จะเกาะติดกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell) เพื่อถูกกำจัดออกไป

เซลลูเลส (cellulase) เป็นกลุ่มของเอนไซม์เชิงซ้อน (complex enzymes) ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์ 3 ชนิดมาทำงานร่วมกัน คือ เอกโซกลูคาเนส (exoglucanase, E.C.3.2.1.91) เอนโดกลูคาเนส (endoglucanase, E.C.3.2.1.4) และเบต้า-กลูโคซิเดส (β-glucosidase, E.C.3.2.1.21) โดยเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่ทำงานในการย่อยสลายเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักชนิดหนึ่งในเส้นใย ผลจากการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเซลลูเลส จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่สำคัญคือ น้ำตาลกลูโคส

แลกเคส (laccase) เป็นเอนไซม์สำคัญที่จัดอยู่ในกลุ่มออกซิโดรีดักเทส (oxidoreductase, E.C.1.10.3.2) ที่มีทองแดงหลายโมเลกุล (multi-copper) ในโครงสร้าง ซึ่งในการทำงานจะต้องมีการจับประสานกับคอปเปอร์ไอออน แล้วเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic) และอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนไปเป็นน้ำ แลกเคสสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหนึ่งอิเล็คตรอนจากสับสเตรต (substrate) ที่เป็นสารอะโรมาติกหลายชนิดและมีสับสเตรตในช่วงกว้างมาก แลกเคสสามารถออกซิไดซ์สารประกอบที่มีส่วนผสมของสารลิกนิน จึงได้มีการนำเอนไซม์นี้มาประยุกต์ใช้ด้านการฟอกเยื่อกระดาษให้ขาวขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษได้เป็นอย่างดี

กระดาษหนังสือพิมพ์ (newsprint) มีน้ำหนักมาตรฐาน 45 หรือ 48 กรัม/ตารางเมตร เป็นกระดาษพิมพ์คุณภาพต่ำ เพราะส่วนใหญ่แล้วมากกว่า 70% ทำมาจากเยื่อไม้บด (mechanical pulp) โดยมีทั้งเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวผสมกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการบดเยื่อ (grinding process) ซึ่งเยื่อชนิดนี้ยังมีสิ่งที่ไม่ต้องการเจือปนอีกด้วย เช่น สารลิกนิน เป็นต้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลพื้นฐานของการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ค้นคว้าเอกสาร ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ

1.8.2 ศึกษาวิธีการทดลอง เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง

1.8.3 วางแผนการทดลองและทำการทดลองตามขั้นตอน ดังนี้

- ผลิตเซลลูเลสและแลกเคสเพื่อใช้ในการกำจัดหมึก
- ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (การทดลองควบคุม)
- ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เอนไซม์ที่เตรียมได้
- ทดสอบสมบัติของเยื่อและกระดาษก่อนและหลังการกำจัดหมึกออก

1.8.4 ทำการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะ

1.8.5 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง

1.8.6 เรียบเรียงเขียนบทความทางวิชาการ เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิชาการและเขียนวิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ในการเสนอผลการวิจัยจะมีการรายงานผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* และแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษจากการวิจัยตามลำดับ ดังนี้

1.9.1 ผลของการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้

1.9.2 อิทธิพลของการลอยฟองอากาศที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้

1.9.3 ผลของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

1.9.4 ผลของปริมาณและชนิดของเซลลูเลสและแลกเคสที่มีต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

คนไทยใช้กระดาษเฉลี่ย 34 กิโลกรัม/คน/ปี ฉะนั้นกระบวนการรีไซเคิลกระดาษ (paper recycling) จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญมาก เนื่องจากปริมาณความต้องการบริโภคเยื่อกระดาษภายในประเทศและตลาดต่างประเทศขยายตัวสูงขึ้น โดยกระดาษที่มีการบริโภคเพิ่มขึ้น ได้แก่ กระดาษจากสำนักงาน กระดาษคอมพิวเตอร์ กระดาษอัดสำเนา ซองจดหมาย กระดาษหนังสือพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งกระดาษเหล่านี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก [1] กอปรทั้งต้นทุนวัตถุดิบเยื่อกระดาษที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการตระหนักถึงความสำคัญของการประหยัดพลังงานและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้เยื่อกระดาษให้คุ้มค่า โดยการนำกระดาษมารีไซเคิลใหม่ และสร้างมูลค่าเพิ่มจากกระดาษที่ใช้แล้ว จึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง ในการลดต้นทุนการผลิต ทั้งยังช่วยรักษาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมให้กับประเทศได้

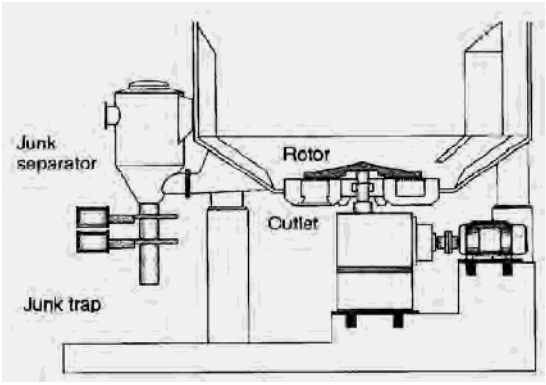
2.1.1 กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ (deinking process)

การนำกระดาษที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษใหม่ ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ หลายขั้นตอน รวมทั้งการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้ว เพื่อที่ให้ได้เยื่อกระดาษที่สามารถนำไปผลิตกระดาษที่มีคุณภาพสูงได้ การกำจัดหมึกออกจากกระดาษประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ประมาณ 9 ขั้นตอน ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วอาจจะมีการใช้ทุกขั้นตอน หรือเลือกใช้เฉพาะบางขั้นตอน และการเรียงลำดับของขั้นตอนต่างๆ อาจแตกต่างกันออกไป โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระดาษที่ผ่านเข้ามาในกระบวนการ ชนิดของหมึกที่ต้องการกำจัดออก และผลผลิตสุดท้ายที่ต้องการ ขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญในการกำจัดหมึกพิมพ์มีรายละเอียดดังนี้ คือ

2.1.1.1 การตีกระจายเยื่อ (pulping or repulping)

เป็นขั้นตอนที่นำกระดาษมาตีกระจายเป็นเยื่อโดยการใช้เครื่องตีกระจายเยื่อ (pulper) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 การตีกระจายเยื่อนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการกำจัดหมึกออก เพราะเป็นขั้นตอนที่อนุภาคของหมึกพิมพ์หลุดจากเส้นใยโดยอาศัยแรงกล และ/หรือสารเคมี รวมถึงเป็นขั้นตอนที่ขนาดของหมึกพิมพ์ถูกควบคุมให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการถูกแยกออกจากเส้นใยในขั้นตอนต่อไป โดยทั่วไปแล้วในขั้นตอนนี้อาจจะมีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสาร

ลดแรงตึงผิว เป็นต้น ลงไปด้วยเพื่อช่วยในการกระจายเยื่อหรือฟอกเยื่อ [2] โดยปรกติแล้วค่าความเข้มข้น (consistency) ของเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อจะมีค่าประมาณ 4-6% อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะใช้ค่าความเข้มของเยื่อที่สูงขึ้น คือประมาณ 12% เป็นอย่างน้อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกหมึกออกจากผิวหน้ากระดาษให้สูงขึ้น สำหรับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายเยื่อ ได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ อุณหภูมิที่ใช้ เวลาที่ใช้ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ ปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ เป็นต้น ซึ่งนอกจากตัวแปรต่างๆ เหล่านี้แล้ว ก็ยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกออกและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในขั้นตอนสุดท้ายเป็นสำคัญ

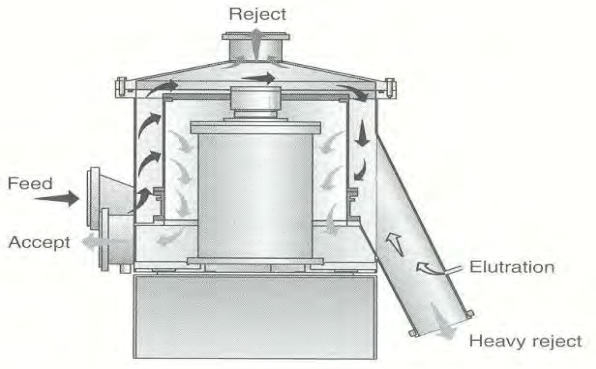


ภาพที่ 2-1 เครื่องตีกระจายเยื่อ (pulper) [2]

2.1.1.2 **การล้างเยื่อขั้นต้น** (pre-washing)

เป็นขั้นตอนการเอาน้ำออก (dewatering) จนทำให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อเพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนจาก 4-5% ไปเป็น 12-15% เพื่อเป็นการนำสารเคมีที่เหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ในการตีกระจายเยื่อครั้งต่อไป

2.1.1.3 **การกรองเยื่อ** (screening)

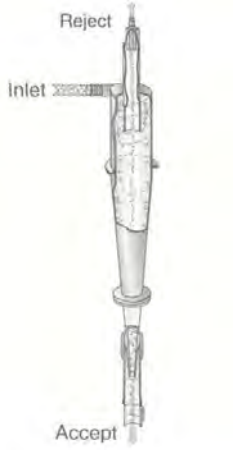


ภาพที่ 2-2 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบตะแกรง (screen) [2]

เป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดใหญ่ออกจากเยื่อกระดาษ เช่น คลิปหนีบกระดาษ ลวดเย็บกระดาษ เป็นต้น ออกจากเยื่อที่ผ่านการตีกระจายมาแล้ว โดยผ่านตะแกรง (screen) (ดังแสดงในภาพที่ 2-2) เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้หลุดไปสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนขั้นตอนต่อไป

2.1.1.4 **การทำความสะอาดเยื่อแบบ** reverse cleaning

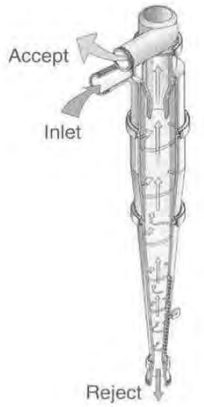
เป็นขั้นตอนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็กซึ่งการใช้ตะแกรงไม่สามารถกำจัดได้ออกจากเยื่อกระดาษ โดยสิ่งแปลกปลอมนั้นจะมีค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ต่ำกว่า 1 หรือมีความหนาแน่น (density) น้อยกว่าเส้นใย เช่น พลาสติก โฟม เป็นต้น โดยใช้เครื่องทำความสะอาดหนีศูนย์กลาง (centrifugal reverse cleaner) (ดังแสดงในภาพที่ 2-3) ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้คือ เครื่องจะมีการหมุนวนด้วยแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้เส้นใย (accept) ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าเกิดการชนกระทบกับผนังของเครื่อง และถูกคัดออกจากเครื่องทางด้านล่าง ในขณะที่สิ่งแปลกปลอม (reject) ที่มีขนาดเบากว่าเส้นใยจะอยู่ตรงบริเวณส่วนกลางของเครื่องและถูกคัดออกจากทางด้านบนของเครื่อง



ภาพที่ 2-3 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ centrifugal reverse cleaner [2]

2.1.1.5 **การทำความสะอาดเยื่อแบบ** forward cleaning

เป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็กซึ่งการคัดแยกด้วยตะแกรงไม่สามารถกำจัดได้ออกจากเยื่อกระดาษ โดยสิ่งแปลกปลอมนั้นจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1 หรือมีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใย เช่น เม็ดทราย เป็นต้น จากภาพที่ 2-4 สิ่งแปลกปลอม (reject) ที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1 หรือมีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใย จะถูกคัดแยกออกมาทางด้านล่าง ส่วนเส้นใย (accept) จะถูกแยกออกไปทางด้านบน



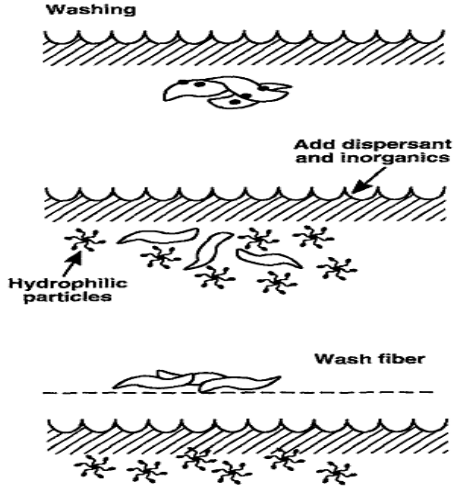
ภาพที่ 2-4 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ centrifugal forward cleaner [2]

2.1.1.6 **การกำจัดหมึก** (deinking)

เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพ มีค่าความขาวสว่างสูง ก่อนที่จะนำเยื่อกลับมาใช้ใหม่ โดยทั่วไปแล้วการกำจัดหมึกออกจากกระดาษจะแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

2.1.1.6.1 **การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง** (wash deinking)

วิธีการล้างจะใช้น้ำเป็นตัวพาอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกไป (ดังแสดงในภาพที่ 2-5) เหมาะสำหรับหมึกพิมพ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร [3] การล้างหมึกพิมพ์เป็นการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยโดยการใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) จำพวกสารช่วยกระจาย (dispersant) ทำให้หมึกพิมพ์อยู่ในสภาพที่ชอบน้ำ (hydrophilic) จากนั้นอาศัยแรงไฮโดรลิก (hydraulic) แยกอนุภาคหมึกพิมพ์ที่แขวนลอยอยู่กับเส้นใยให้หลุดรอดออกไปกับน้ำ

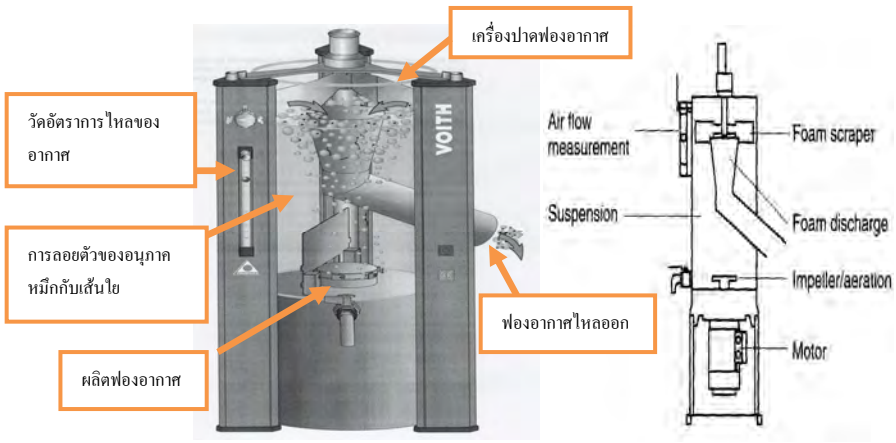


ภาพที่ 2-5 การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง (wash deinking) [4]

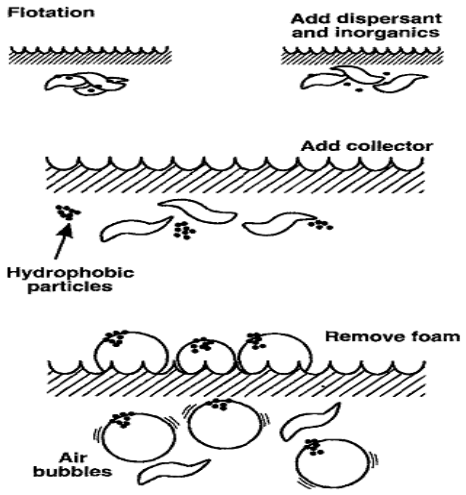
สำหรับสารช่วยกระจายที่ใช้ในการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยด้วยวิธีนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะเติมลงไปในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหลังจากปรับสภาวะความเป็นกรด-เบสให้เหมาะสม เพื่อช่วยกระจายหมึกพิมพ์และป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์กลับไปติดที่เส้นใยอีกครั้ง ตัวอย่างของหมึกพิมพ์ที่เหมาะสำหรับการแยกหมึกออกด้วยวิธีนี้ได้แก่ หมึกพิมพ์อิงก์เจ็ตฐานน้ำ และหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการกำจัดหมึกพิมพ์ด้วยวิธีนี้คือ การใช้น้ำในปริมาณมากและผลผลิตที่ได้ (yield) ของเยื่อต่ำ

2.1.1.6.2 **การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ** (flotation deinking)

วิธีการลอยฟองอากาศเป็นขั้นตอนการแยกหมึกพิมพ์ออกที่เหมาะสำหรับหมึกพิมพ์ที่มีอนุภาคประมาณ 10-100 ไมโครเมตร [3] โดยขั้นตอนของการตีกระจายเยื่อจะใส่สารเคมีที่ปรับภาวะความเป็นกรด-เบสของระบบ จากนั้นจะใส่สารลดแรงตึงผิวที่เรียกว่าสารรวบรวม (collector) เพื่อเป็นการปรับระบบให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และทำให้อนุภาคของหมึกเกาะกลุ่มรวมเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (agglomeration) หลังจากการตีกระจายเยื่อแล้วจะนำเอาเยื่อที่ได้มาเจือจางให้มีค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ ประมาณ 0.8-1.0% ก่อนที่จะนำมาใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell) (ภาพที่ 2-6) โดยเครื่องนี้จะมีหน่วยผลิตฟองอากาศออกมาในระบบ ทำให้อนุภาคของหมึกไปเกาะติดกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องและถูกกำจัดหมึกออกไปในที่สุด (ภาพที่ 2-7) ข้อดีของการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ คือ ใช้น้ำในปริมาณที่น้อยกว่า และให้ปริมาณผลผลิตของเยื่อกระดาษที่ได้สูงกว่าการกำจัดหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการล้าง อย่างไรก็ตาม รายละเอียดของการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ เช่น เคมีของการลอยฟองอากาศและปัจจัยที่มีผลต่อการลอยฟองอากาศ จะพูดถึงต่อไปในหัวข้อ 2.1.4



ภาพที่ 2-6 เครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell) ขนาดห้องปฏิบัติการ [2]



ภาพที่ 2-7 การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ (flotation deinking) [4]

2.1.1.7 **การกำจัดหมึกพิมพ์ออกโดยการกระจายหมึก** (dispersion deinking)

ทำได้โดยนำกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาตีกระจายให้เป็นเยื่อ และให้หมึกพิมพ์มีขนาดเล็กมากจนกระทั่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า วิธีนี้จะเหมาะกับการกำจัดอนุภาคของหมึกที่มีขนาดใหญ่ เช่น หมึกพิมพ์ยูวี และหมึกโทนเนอร์ อย่างไรก็ตาม หากนำเยื่อที่ได้ไปวัดค่าความขาวสว่างแล้ว จะพบว่าความขาวสว่างของเยื่อโดยรวมจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากหมึกพิมพ์ไม่ได้ถูกกำจัดออกเพียงแต่ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงเท่านั้น

2.1.1.8 **การฟอกเยื่อ** (bleaching)

เยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว ส่วนมากจะถูกนำไปผ่านการฟอกเยื่อเพื่อเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการฟอกขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อเป็นสำคัญ

2.1.1.9 **การเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่** (water recirculation)

เป็นขั้นตอนที่นำน้ำที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการกำจัดหมึกออกมาปรับสมบัติต่างๆ เช่น ค่า pH เพื่อให้มีค่าที่เหมาะสม ก่อนจะหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการกำจัดหมึกออกอีกครั้ง

2.1.2 **สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก** (deinking chemicals)

สารเคมีที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่จะนำมารีไซเคิล ชนิดของหมึกพิมพ์ ระบบที่ใช้ในการพิมพ์ ขั้นตอนของการกำจัดหมึกออก และคุณภาพของเยื่อรีไซเคิลที่ต้องการ โดยส่วนของ

หมึกพิมพ์ที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาด้วยนั้น คือส่วนที่เป็นสารยึด (binder) เช่น พวกเรซิน (resin) ไม่ใช่ส่วนที่เป็นสารสี (pigment) [5]

2.1.2.1. **โซเดียมไฮดรอกไซด์** (sodium hydroxide; NaOH)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อและการฟอกเยื่อ เพื่อปรับสภาพในขั้นตอนการกระจายเยื่อให้อยู่ในภาวะที่เป็นเบส โดยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 9.5-11.0 เพื่อทำให้เส้นใยรับน้ำ มีความยืดหยุ่นและพองตัวมากขึ้น รวมถึงป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์จนมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่เหมาะที่จะกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยเพิ่มปริมาณของ perhydroxyl ion (OOH^-) ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยา (active bleaching agent) ในการฟอกเยื่อแบบที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) เป็นสารฟอกเยื่อ (bleaching agent) อย่างไรก็ตาม การใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปในกระดาษที่ทำจากเยื่อไม้บดจะทำให้เยื่อสุดท้ายที่ได้จากการรีไซเคิลมีสีเหลืองและคล้ำ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า alkali darkening หรือความหมองคล้ำด้วยเบส [6]

2.1.2.2 **ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์** (hydrogen peroxide; H_2O_2)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ โดยใช้เป็นสารฟอกเยื่อหลังจากที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดหมึกออกแล้ว ซึ่งเป็นตัวที่จะไปทำปฏิกิริยากับลิกนินทำให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น โดยที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับ NaOH และให้ผลิตภัณฑ์เป็น perhydroxyl ion (OOH^-) ซึ่งเป็นสารฟอกเยื่อที่แท้จริง (true bleaching agent) นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังช่วยในการทำลายอัลคีดเรซิน (alkyd resin) ซึ่งเป็นสารยึดที่พบมากในหมึกพิมพ์ระบบออฟเซต โดยทำให้สารยึดเกิดการแตกตัวลง ส่งผลให้สามารถกำจัดหมึกพิมพ์ออฟเซตออกจากเส้นใยได้ง่ายมากขึ้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่มีโลหะหนักจำพวกแมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) อยู่ สภาวะที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิสูง การสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์สามารถป้องกันได้โดยการใส่สารที่เรียกว่า สารรักษาเสถียรภาพ (stabilizing agent) พวกคีเลติง (chelating agents) หรือโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) โดยสารรักษาเสถียรภาพไม่ได้ไปทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงสภาพ หากแต่ไปทำให้สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการคงสภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงสภาพเดิม [6]

2.1.2.3 **กรดซัลฟิวริก** (sulfuric acid; H_2SO_4)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ เพื่อช่วยในการปรับสภาพของค่าความเป็นกรด-เบส ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ กรดซัลฟิวริกนี้มีชื่อเรียกทั่วไปว่ากรดกำมะถัน โดยละลายได้ในน้ำที่ทุกความเข้มข้น [7]

2.1.2.4 **โซเดียมซิลิเกต** (sodium silicate; Na_2SiO_3)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อและการฟอกเยื่อเพื่อไปจับกับโลหะหนัก โดยทำให้เกิดเป็นสารประกอบคอลลอยด์ (colloid) กับโลหะหนัก ทำให้โลหะหนักไม่มีโอกาสไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่สลายตัว นอกจากนี้ยังช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของกระดาษหนังสือพิมพ์และนิตยสารต่างๆ เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตจะไปช่วยป้องกันการย้อนกลับมายึดติดที่เส้นใยของอนุภาคหมึก (ink redeposition) ส่งผลให้อนุภาคของหมึกมีการกระจายตัวได้ดี ถูกกำจัดออกได้ง่าย นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตยังช่วยปรับปรุงระบบต่างๆ ของเครื่องผลิตกระดาษและช่วยลดการสูญเสียเส้นใย ซึ่งส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้จากการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศสูงขึ้น [6]

2.1.2.5 **สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม** (agglomerating chemicals)

ใส่ในขั้นตอนของการตีกระจายเยื่อ การกรองเยื่อ หรือการทำความสะอาดเยื่อ โดยสารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม เป็นสารเคมีที่ใช้สำหรับหมึกพิมพ์โทนเนอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีโครงสร้างของรูปร่างเป็นแบบแผ่นแบน เนื่องจากหมึกเหล่านี้อาจมีขนาดใหญ่เกินไปที่จะนำมาขจัดออกโดยวิธีการล้างหรือวิธีการลอยฟองอากาศ ดังนั้นจึงใช้สารเคมีนี้มาทำให้หมึกรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เพื่อถูกกำจัดออกโดยวิธีการกรองเยื่อและการทำความสะอาดเยื่อแบบ forward cleaning ต่อไป [6]

2.1.2.6 **สารจับโลหะหนัก** (chelating agents)

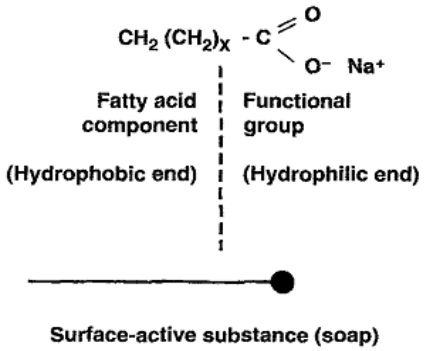
ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ โดยสารจับโลหะหนักจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยจะจับโลหะหนักไว้ ก่อนที่โลหะหนักจะไปเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารจับโลหะหนักที่นิยมใช้กันในกระบวนการกำจัดหมึกออกได้แก่ DTPA (diethylenetriaminepentacetic acid) และ EDTA (ethylenediaminetetracetic acid) โดย DTPA ซึ่งมีโครงสร้าง 5 แขน (five-legged structure) จะไปจับโลหะหนักได้ดีและแข็งแรงกว่า EDTA ที่มีโครงสร้าง 4 แขน (four-egged structure) การจับโลหะหนักของสารจับ

โลหะหนักจะเรียงลำดับจากง่ายไปยากดังต่อไปนี้: $Ni^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Al^{3+}$ [6]

2.1.2.7 **สารลดแรงตึงผิว** (surfactants)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง และการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ หน้าที่โดยทั่วไปของสารลดแรงตึงผิว คือ ทำให้เกิดฟอง ช่วยในการเปียกผิวของเส้นใยโดยการลดแรงตึงผิวของน้ำ ช่วยแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยและช่วยในการกระจายตัวของหมึกพิมพ์นั้น โดยทั่วไปแล้วสารลดแรงตึงผิวเป็นคำรวมที่ใช้ครอบคลุมตั้งแต่สารช่วยกระจาย (dispersants), สารรวบรวม (collectors), สารที่ทำให้เปียก (wetting agents) และสารกึ่งช่วยกระจายกึ่งรวบรวม (displectors) เป็นต้น สารลดแรงตึงผิว (ภาพที่ 2-8) มีโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก คือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic part) ซึ่งเป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาว จะประกอบด้วย C และ H ซึ่งเป็นได้ทั้งเส้นตรง (linear) หรือเป็นกิ่ง (branched) รวมถึงเป็นแบบอิ่มตัว (saturated) และแบบไม่อิ่มตัว (unsaturated) ส่วนที่สอง คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic part) ซึ่งเป็นไอออนิก โดยสามารถแบ่งประเภทของสารลดแรงตึงผิวออกเป็นสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้ว (non-ionic surfactants) และสารลดแรงตึงผิวแบบมีขั้ว (ionic surfactants) โดยสารลดแรงตึงผิวแบบมีขั้ว สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นประจุบวก (cationic) ประจุลบ (anionic) และมีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ด้วยกัน (amphoteric)

ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษนั้น โดยทั่วไปแล้วนิยมใส่สารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้วมากกว่า เนื่องจากสามารถทำงานได้ดี เป็นอิสระจากค่า pH และความกระด้างของน้ำ (water hardness) [6]



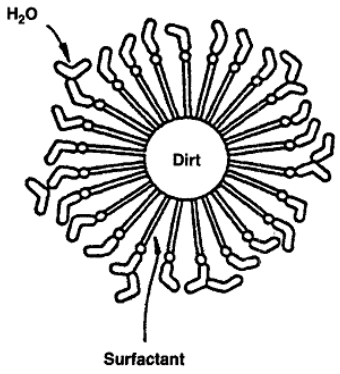
ภาพที่ 2-8 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้กำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ [4]

สำหรับปริมาณที่เหมาะสมของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในกระบวนการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย คือ ประมาณ 0.2-2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้และภาวะการกำจัดหมึกออก (deinking condition) เป็นสำคัญ

การเลือกใช้ชนิดของสารลดแรงตึงผิวขึ้นอยู่กับวิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ที่เลือกใช้เป็นสำคัญ สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย มีดังนี้คือ

2.1.2.7.1 **สารช่วยกระจาย** (dispersants)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ส่วนใหญ่จะนิยมใช้เป็นสารที่ช่วยให้หมึกพิมพ์กระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ไม่เกาะกลุ่มกัน และทำให้อนุภาคหมึกพิมพ์อยู่ในสภาพที่ชอบน้ำด้วยการฟอร์มตัวเป็นไมเซล (micelle) (ภาพที่ 2-9) เพื่อให้สะดวกในการถูกกำจัดออกโดยวิธีการล้าง โดยเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปแล้ว ส่วนที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวจะหันเข้าหาน้ำ ในขณะส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะหันเข้าหาหมึกหรือคราบสกปรก ทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่าไมเซลขึ้น

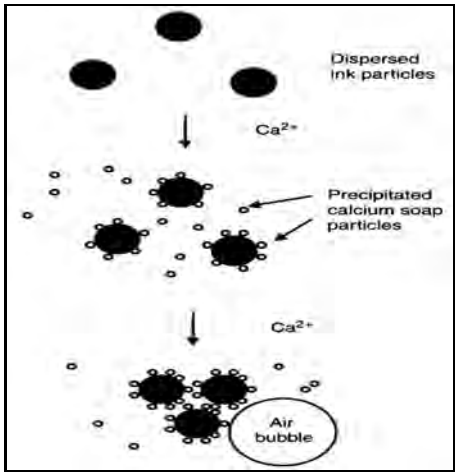


ภาพที่ 2-9 สารลดแรงตึงผิวฟอร์มตัวเป็นไมเซล (surfactant micelle) [6]

2.1.2.7.2 **สารรวบรวม** (collectors)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ เพื่อช่วยในกระบวนการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยทำให้อนุภาคของหมึกพิมพ์มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น และอนุภาคของหมึกพิมพ์มาสัมผัสกับสารรวบรวม อนุภาคหมึกจะเริ่มเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จากนั้นกลุ่มอนุภาคของหมึกจะไปสัมผัสกับฟองอากาศต่อ (ภาพที่ 2-10) ฟองอากาศจะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไปตรงบริเวณผิวหน้าของเครื่อง นอกจากนี้สารรวบรวมยังไปช่วยปรับแรงตึงผิวของฟองอากาศให้มีความแข็งแรงมากพอที่สามารถพาอนุภาคของหมึกลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ คือ สบู่กรดไขมัน (fatty acid soap) ซึ่งสบู่

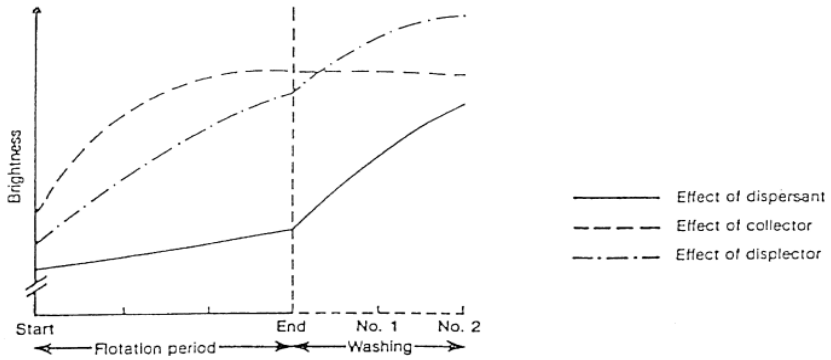
กรดไขมันจะรวมตัวกับแคลเซียมไอออน (calcium ion) ในน้ำ เกิดเป็นสบู่แคลเซียม (calcium soap) ซึ่งไม่ละลายน้ำ และจะไปช่วยรวมอนุภาคหมึกพิมพ์ที่แขวนลอยอยู่กับเส้นใยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและอยู่ในสภาพที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้สามารถเกาะติดกับฟองอากาศแล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ



ภาพที่ 2-10 การทำงานของสารรวบรวม [2]

2.1.2.7.3 **สารกึ่งช่วยกระจายกึ่งรวบรวม** (displectors)

สารกึ่งช่วยกระจายกึ่งรวบรวมมีสมบัติทางกายภาพที่เป็นทั้งสารช่วยกระจายและสารรวบรวม โดยถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกออกแบบลูกผสม คือ สามารถใช้ได้กับการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้างและวิธีการลอยฟองอากาศ (hybrid flotation-washing) ซึ่งในขณะลอยฟองอากาศจะช่วยให้อนุภาคของหมึกพิมพ์ยึดเกาะกับฟองอากาศได้ดี และในขณะทำการล้างเยื่อจะช่วยทำให้อนุภาคหมึกพิมพ์กระจายตัวได้ดี ไม่กลับมาติดเส้นใยอีก ทำให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างสูง (ภาพที่ 2-11) นอกจากนี้ สารกึ่งช่วยกระจายกึ่งรวบรวมยังทนต่อสภาพน้ำกระด้างและไม่ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกรัน (scaling)



ภาพที่ 2-11 ค่าความขาวสว่างที่ได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ [8]

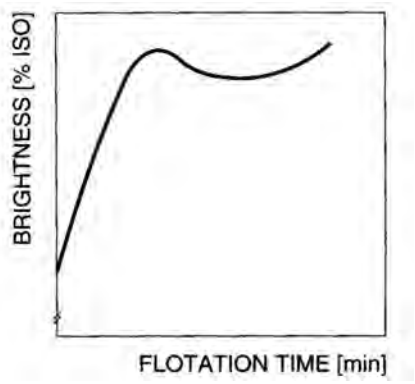
2.1.3 **การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก** (ink redeposition)

การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกมีผลทำให้คุณภาพของเยื่อที่ได้ลดลง คือ มีค่าความขาวสว่างลดลงและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่เพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ Ben และคณะ [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อที่มีผลต่อการย้อนกลับของหมึกไปติดที่เส้นใย ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเร็วในการตีกระจายเยื่อ เวลาในการตีกระจายเยื่อ และพลังงานที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ (specific energy) ในการทดลองนี้มีการใช้เยื่อเชิงกล หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี และมีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต DTPA และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยหลังจากการตีกระจายเยื่อจะแบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไปผ่านกระบวนการล้างแบบ Hyperwashing (การล้างเยื่อด้วยน้ำหลายๆ รอบจนกระทั่งน้ำที่ออกมาจากเยื่อใส) เพื่อหาปริมาณหมึกที่ยังเหลือค้างอยู่ทั้งบริเวณผิวหน้าและในเส้นใย ซึ่งการล้างแบบ Hyperwashing สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการติดของอนุภาคหมึกและการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกได้อย่างแท้จริง โดยหากปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการล้างมีค่าสูง แสดงว่าเกิดการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกสูงและจำนวนหมึกที่ติดอยู่มีมาก จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีและใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าสูงขึ้น รวมทั้งถ้ามีการใช้ความเข้มข้นของเยื่อสูง ความเร็วในการตีกระจายเยื่อสูง จะยิ่งทำให้เกิดปัญหาการย้อนกลับของหมึกไปฝังตัวอยู่ในเส้นใยมากขึ้น กล่าวคือ ส่งผลทำให้อนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กลงมากจนกระทั่งมีโอกาสย้อนกลับไปติดที่เส้นใยเพิ่มขึ้น โดยที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยจะมีหมึกเกาะอยู่น้อย ส่วนใหญ่หมึกมักจะฝังตัวอยู่บริเวณผิวที่ขรุขระของช่องว่างตรงกลางของเส้นใย (lumen) มากกว่า

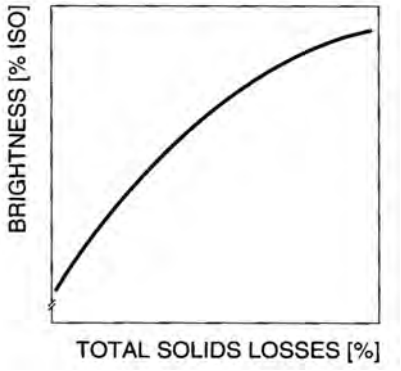
2.1.4 **กระบวนการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ** (flotation deinking process)

การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นโดยการทำให้อนุภาคของหมึกไปเกาะติดกับฟองอากาศและลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดหมึกต่อไป โดยในกระบวนการจะใส่สารลดแรงตึงผิวชนิดสารรวบรวมเข้าไปเพื่อทำให้หมึกมีสมบัติไม่ชอบน้ำ และมาเกาะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ขนาดอนุภาคของหมึกที่เหมาะสมในการลอยฟองอากาศ คือ 10-100 ไมโครเมตร การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิต (yield) และค่าความขาวสว่าง (brightness) ของเยื่อที่ได้หลังจากการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าและนิตยสาร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการลอยฟองอากาศ ดังปรากฏในภาพที่ 2-12 และ 2-13

กล่าวคือ ค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ได้จากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าและนิตยสารหลังการกำจัดหมึกออกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้เวลาในการลอยฟองอากาศนานขึ้น หากแต่ปริมาณผลผลิตที่ได้จะมีค่าลดต่ำลงหรือมีการสูญเสียเยื่อมากขึ้น [2]



ภาพที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างและเวลาที่ใช้ในการลอยฟองอากาศ [2]



ภาพที่ 2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างและการสูญเสียเยื่อในระบบ [2]

2.1.4.1 **เคมีของการลอยฟองอากาศ** (flotation chemistry)

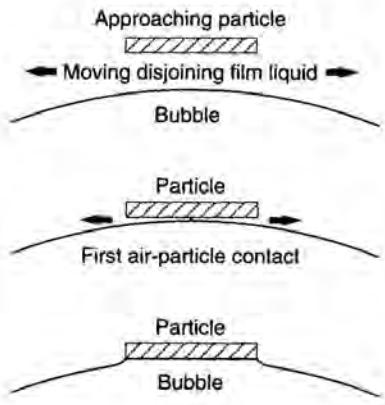
เครื่องลอยฟองอากาศเป็นหัวใจของการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำการกำจัดหมึกออกอย่างแท้จริง การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ

1. การแยกอนุภาคของหมึกออกจากเส้นใย (เกิดขึ้นในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ)
2. การรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกโดยใช้สารเคมี (เกิดขึ้นในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการลอยฟองอากาศ)

3. การที่กลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกไปเกาะติดอยู่กับฟองอากาศ ก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดต่อไป (เกิดขึ้นในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ)

การกำจัดหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อ

1. อนุภาคของหมึกต้องมีการชนกับฟองอากาศ
2. การชนกันจะต้องทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่ระหว่างหมึกกับฟองอากาศหมดไป
3. อนุภาคของหมึกกับฟองอากาศจะต้องไม่ผลักกัน
4. อนุภาคของหมึกจะต้องมีสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อที่จะได้ยึดติดกับฟองอากาศได้
5. การที่ฟองอากาศและอนุภาคของหมึกที่เกาะติดกันอยู่จะลอยสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้นั้น ฟองอากาศจะต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะสามารถเอาชนะแรงที่กระทำต่อมัน ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) และแรงเหนี่ยว (viscous drag) ซึ่งพยายามแยกอนุภาคของหมึกและฟองอากาศออกจากกัน (ภาพที่ 2-14)



ภาพที่ 2-14 กลไกของอนุภาคหมึกที่ยึดติดกับฟองอากาศ [2]

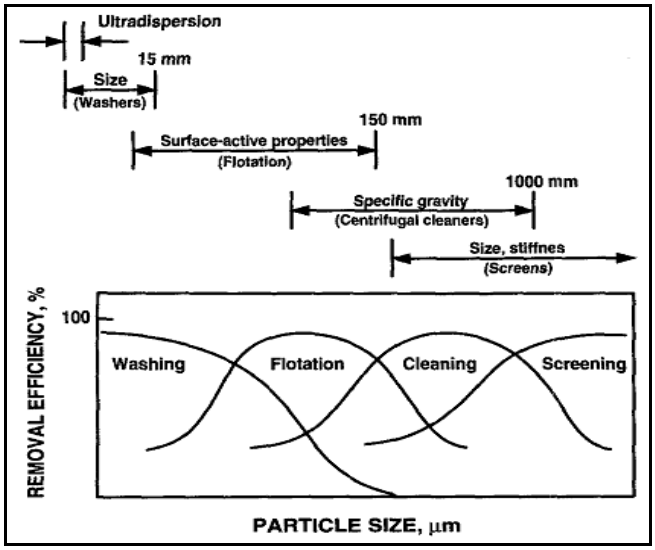
2.1.4.2 **ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ**

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศมีดังต่อไปนี้คือ

2.1.4.2.1 **ขนาดของอนุภาคหมึก**

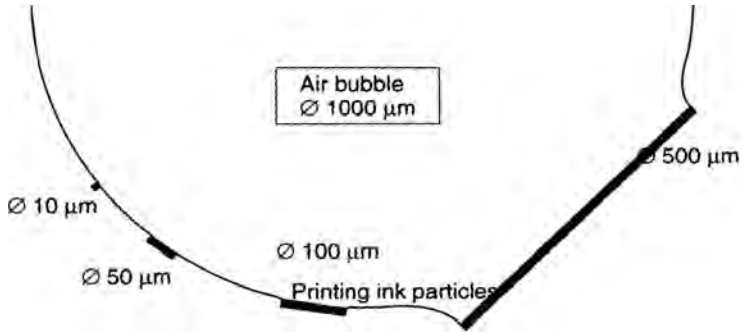
ขนาดของอนุภาคหมึกที่เหมาะกับการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศจะอยู่ในช่วงประมาณ 10-100 ไมโครเมตร (ภาพที่ 2-15) ถ้าขนาดของหมึกพิมพ์มีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศ สภาพปั่นป่วน (turbulence) ที่สูงภายใน

เครื่องลอยฟองอากาศจะทำให้อนุภาคของหมึกหลุดจากฟองอากาศได้ ก่อนที่ฟองอากาศจะลอยขึ้นไปสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ

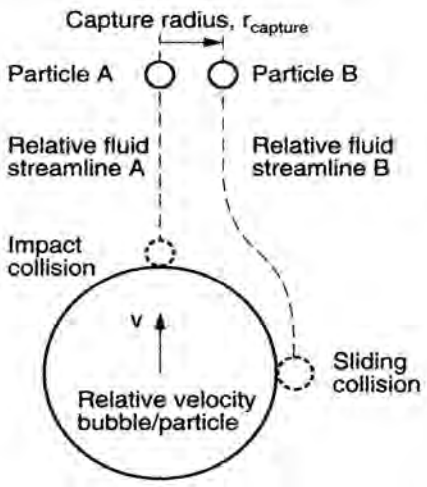


ภาพที่ 2-15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคหมึกและวิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ [4]

แต่ถ้าขนาดของหมึกพิมพ์มีขนาดเล็กเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศ โอกาสที่อนุภาคของหมึกจะชนกับฟองอากาศเพื่อยึดติดกันและลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศก็จะยิ่งน้อยลง (ภาพที่ 2-16) เนื่องจากอนุภาคของหมึกมีแนวโน้มที่จะไหลไปตามแนวเส้นกระแส (streamlines) (ภาพที่ 2-17) ที่อยู่รอบฟองอากาศมากกว่าที่จะไปชนกับฟองอากาศโดยตรง [10]



ภาพที่ 2-16 การยึดติดระหว่างอนุภาคของหมึกและฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร [2]



ภาพที่ 2-17 แนวเส้นกระแสและการชนกันระหว่างอนุภาคหมึกกับฟองอากาศ [2]

2.1.4.2.2 **ขนาดของฟองอากาศ**

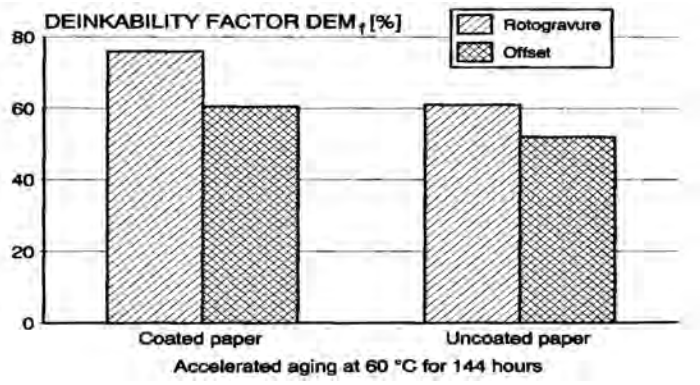
การควบคุมขนาดของฟองอากาศให้เหมาะสมเป็นหัวใจของเครื่องลอยฟองอากาศ โดยฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.3 มิลลิเมตร จะมีแรงพยุงตัว (bouyancy) มากพอที่จะสามารถดันตัวเองผ่านเครือข่ายเส้นใย (fiber network) ขึ้นไปสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ รวมทั้งสามารถยึดติดกับอนุภาคของหมึกพิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ดี เนื่องจากฟองอากาศที่ใหญ่จะมีพื้นที่สัมผัสกับอนุภาคของหมึกพิมพ์มาก ส่วนฟองอากาศที่มีขนาดเส้นศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร จะมีแนวโน้มที่ไปเกาะติดกับเส้นใย ทำให้เส้นใยถูกกำจัดออกไปด้วยพร้อมหมึก ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ลดลง นอกจากนี้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเกินไปจะถูกกักด้วยเครือข่ายเส้นใยและมีโอกาสที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้น้อยเนื่องจากแรงพยุงตัวน้อย แม้ว่าฟองอากาศที่เล็กนี้สามารถลอยขึ้นมาได้ฟองอากาศนั้นก็จะพาเอาเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ลอยขึ้นมาด้วย อย่างไรก็ตาม ขนาดของฟองอากาศและอนุภาคของหมึกที่เหมาะสมต่อการกำจัดหมึกออกโดยวิธีลอยฟองอากาศ คือ 5:1 (ขนาดของฟองอากาศ:ขนาดของอนุภาคหมึก) [11]

2.1.4.2.3 **อิทธิพลของการผสม** (mixing)

การผสมเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ฟองอากาศกับอนุภาคหมึกในเครื่องลอยฟองอากาศมาเกาะติดกันได้ เนื่องจากการผสมทำให้อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคของหมึกกับฟองอากาศเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การผสมนั้นควรใช้ที่ความเร็วและความแรงที่เหมาะสม เพราะหากเร็วหรือแรงเกินไปจะทำให้ฟองอากาศกับอนุภาคของหมึกที่เกาะติดกันอยู่เกิดแยกจากกันได้ และจะทำให้ฟองอากาศแตก รวมไปถึงอนุภาคหมึกที่เกาะติดกันอยู่จะเกิดการกระจายตัวได้

2.1.5 **ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก** (deinkability)

กระบวนการกำจัดหมึกออกต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น ชนิดของกระดาษ ชนิดของหมึกพิมพ์ และเทคนิคการพิมพ์ กระดาษบางประเภทสามารถกำจัดหมึกออกได้ง่าย ขณะที่บางประเภทมีปัญหามากในการกำจัดหมึกออก การกำจัดหมึกพิมพ์ออกมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 ปัจจัยหลัก คือ สมบัติของหมึกพิมพ์และสภาพผิวหน้าของกระดาษ กล่าวคือ หมึกแต่ละชนิดมีสูตรหมึกที่แตกต่างกัน ทำให้มีการแห้งตัวด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษแตกต่างกัน ย่อมมีผลทำให้ความสามารถในการยึดติดของหมึกบนผิวหน้ากระดาษแตกต่างกัน ความสามารถในการกำจัดหมึกออกจากผิวหน้ากระดาษนั้นๆ จึงแตกต่างกันไปด้วย เช่น หมึกที่พิมพ์บนกระดาษเคลือบผิวจะสามารถถูกกำจัดหมึกออกได้ง่ายกว่าหมึกที่พิมพ์บนกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิว เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกของกระดาษเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว [2]

2.1.6 **กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยระบบออฟเซต**

ระบบการพิมพ์แต่ละชนิดมีการใช้หมึกแตกต่างกันออกไป เพื่อให้เหมาะสมกับระบบการพิมพ์นั้นๆ ซึ่งสมบัติต่างๆ ของหมึกรวมถึงขนาดอนุภาคของหมึกที่ใช้ในแต่ละระบบการพิมพ์ย่อมที่จะแตกต่างกันออกไปด้วย ส่งผลให้การเลือกใช้วิธีการกำจัดหมึกออกจากเส้นใยมีความแตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมและให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด

จากตารางที่ 2-1 จะเห็นว่าขนาดอนุภาคของหมึกพิมพ์โทนเนอร์ (toner) จะมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยรองลงมาเป็นหมึกพิมพ์ออฟเซต เลตเตอร์เพรส กราวัวร์ และเฟล็กโซฐานน้ำ ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของหมึกพิมพ์ออฟเซต มีขนาด 2-100 ไมโครเมตร ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมในการกำจัดหมึกออกคือ วิธีการลอยฟองอากาศเพราะวิธีนี้เหมาะสำหรับหมึกพิมพ์ที่มีอนุภาคประมาณ 10-100 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2-1 ขนาดของอนุภาคหมึกในแต่ระบบการพิมพ์ [2]

ประเภทของหมึกพิมพ์	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของหมึก (ไมโครเมตร)	
	กระดาษไม่เคลือบผิว	กระดาษเคลือบผิว
เลตเตอร์เพรส (letterpress)	2-30	10-100
ออฟเซต (offset)	2-30	50-100
เฟล็กโซฐานน้ำ (water-based flexo)	0.3-1	0.7-2
กราวัวร์ (gravure)	2-30	5-30
โทนเนอร์ (toner)	40-400	40-400

กระดาษหนังสือพิมพ์เป็นกระดาษชนิดหนึ่งที่รู้จักกันทั่วไปว่าเป็นกระดาษพิมพ์คุณภาพต่ำ เพราะส่วนใหญ่แล้วทำมาจากเยื่อไม้บด (mechanical pulp) มากกว่า 70% โดยมีทั้งเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวผสมกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการบดเยื่อ (grinding process) เยื่อชนิดนี้ยังมีสิ่งที่ไม่ต้องการเจือปนอีกด้วย เช่น สารลิกนิน เป็นต้น กระดาษหนังสือพิมพ์มีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) 45 หรือ 48 กรัม/ตารางเมตร ที่ผิวกระดาษจะเรียบด้วยวิธีการขัดผิว (calendering) มีความมันวาว (gloss) 15% กระดาษหนังสือพิมพ์ไม่มีสารกันซึม (sizing agent) ผสมอยู่ ฉะนั้นหมึกพิมพ์ที่ใช้จึงต้องมีคุณสมบัติพิเศษ คือแห้งตัวด้วยการซึมผ่าน (penetration) นอกจากนี้กระดาษหนังสือพิมพ์ยังมีค่าความขาวสว่าง (brightness) ของผิวกระดาษต่ำ โดยปกติจะวัดได้ที่ 60 %ISO และกระดาษยังเปลี่ยนสีเร็ว โดยทั่วไปแล้วกระดาษหนังสือพิมพ์จะถูกพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ออฟเซตป้อนม้วนที่แห้งตัวด้วยการซึมผ่าน (cold-set offset inks) เนื่องจากหมึกพิมพ์ประเภทนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่เหมาะสำหรับใช้พิมพ์ลงบนกระดาษประเภทไม่เคลือบผิว [12]

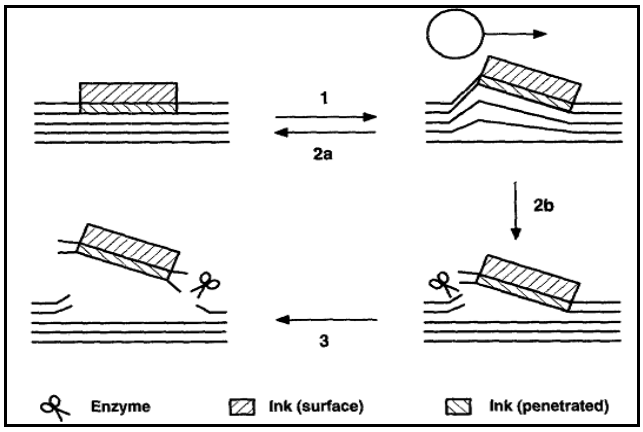
2.1.7 **ความสำคัญของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึก**

Lee และคณะ [13] รายงานว่าการกำจัดหมึกออกจากกระดาษรีไซเคิลด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้ เมื่อมีการควบคุมปัจจัยการกำจัดหมึกให้มีประสิทธิภาพ และการกำจัดหมึกออกจากกระดาษด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้โดยมีการใช้เอนไซม์ร่วมด้วย ซึ่งเอนไซม์เป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการผลิตทางชีวภาพจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การใช้เอนไซม์ช่วยในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ ปัจจุบันจึงมีการนำเอนไซม์มาช่วยในการกำจัดหมึกกันมากขึ้น ซึ่งเอนไซม์ที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดหมึกออก

ได้แก่ เซลลูเลส (cellulase) เฮมิเซลลูเลส (hemicellulase) ไซแลนเนส (xylanase) เพกติเนส (pectinase) และแลกเคส (laccase) [14] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส ทั้งนี้เนื่องมาจากในกระดาษจะมีองค์ประกอบหลักๆ ประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ประมาณร้อยละ 45 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประมาณร้อยละ 25-35 ลิกนิน (lignin) ประมาณร้อยละ 21-25 และสารแทรก (extractive) ประมาณร้อยละ 2-8 จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย (fiber chemistry) ทำให้มีการนำเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลสมาช่วยในการกำจัดหมึกออกจากเส้นใยกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเอนไซม์สามารถไปย่อยสลายหรือตัดพันธะของน้ำตาลที่ต่อเรียงกันเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

ในปี 1991 Kim และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์โดยใช้เซลลูเลส ที่ค่า pH เท่ากับ 4.7 ในการทดลองมีการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ 2 ชนิด คือ หนังสือพิมพ์เก่าจากประเทศอเมริกา (American old newsprint; AONP) และหนังสือพิมพ์เก่าจากประเทศเกาหลี (Korean old newsprint; KONP) จากการศึกษาพบว่า ในส่วนของค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ผลิตได้นั้น เมื่อเติมเซลลูเลสลงไปในกระบวนการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ปริมาณเซลลูเลสที่เติมลงไปเล็กน้อย คือร้อยละ 0.1-0.15 ให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นสูงสุด ในด้านสมบัติความแข็งแรงของเยื่อที่ผลิตได้ Prasad และคณะ [16] รายงานว่าการใช้เอนไซม์ในปริมาณที่พอเหมาะ ส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเส้นใยเล็กๆ ในระบบซึ่งจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยยาวจะถูกเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาจนเกือบหมด คงเหลือแต่เส้นใยที่มีขนาดยาวอยู่ในระบบจำนวนที่มากกว่า จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษโดยรวมเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความขาวสว่างนั้นพบว่าการใช้เอนไซม์มีผลทำให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่ไม่ได้มีการใช้เอนไซม์

ในปี 1994 Zeyer และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึก และได้เสนอข้อคิดเห็นเกี่ยวกับแบบจำลองการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่อเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 2-19 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าในตอนแรกเส้นใยจะถูกปิดกั้นโดยชั้นของหมึกพิมพ์ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ แต่เมื่อมีแรงเสียดทานอันเกิดขึ้นมาจากการตีกระจายเยื่อหรือการผสมเยื่อ ซึ่งทำให้รูปแบบการยึดติดของหมึกบนเส้นใยบิดเบี้ยวไปและไปช่วยเปิดผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น สามารถตัดสายโซ่ของเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ และเมื่อเส้นใยถูกตัด อนุภาคของหมึกที่อยู่บนผิวหน้าของเส้นใยก็จะสามารถหลุดออกมาได้



ภาพที่ 2-19 แบบจำลองการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ [17] ; (1) แรงเสียดทานเปิดผิวหน้าของเส้นใย (friction opens the fiber) (2a) การยึดติดของหมึกบนเส้นใยอย่างหลวมๆ เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น (relaxation) (2b) เอนไซม์เข้าไปตัดสายโซ่น้ำตาล (enzyme cutting) (3) อนุภาคหมึกหลุดออก (ink removed)

Welt และ Dinus [18] ได้สรุปความเป็นไปได้ถึงกลไกการกำจัดหมึกออกโดยใช้เอนไซม์ดังนี้

1) เอนไซม์อาจไปทำให้ผิวหน้าของเส้นใยแตกออกจนหมึกที่ผิวหน้าของเส้นใยสามารถหลุดออกมาได้

2) เอนไซม์อาจเข้าไปทำให้ผิวหน้าของเส้นใยเปลี่ยนเป็นสารตัวอื่นที่มีความแข็งแรงของพันธะต่ำลงด้วยวิธีการทำลายพอลีเมอร์ (depolymerization) ของเส้นใย ส่งผลให้หมึกสามารถหลุดออกมาได้ง่ายโดยการตีกระจายเยื่อ

3) เอนไซม์อาจเข้าไปลดความแข็งแรงของพันธะโดยการเอาเส้นใยเล็กๆ ที่บริเวณผิวหน้าของกระดาษออก จึงทำให้อนุภาคของหมึกออกมาได้ง่ายขึ้น

4) เอนไซม์เฮมิเซลลูเลสอาจเข้าไปทำให้ลิกนินที่ผิวหน้าของเส้นใยหลุดออกมาพร้อมกับอนุภาคของหมึก โดยการทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นโครงสร้างซับซ้อนระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต (lignin carbohydrate complex) จึงทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น

5) มีความเป็นไปได้ที่เอนไซม์จะเข้าไปลอกเส้นใยย่อยๆ (fibrils) จากผิวหน้าของเส้นใย จนทำให้หมึกหลุดออกมาพร้อมกับเส้นใยย่อยๆ เหล่านี้

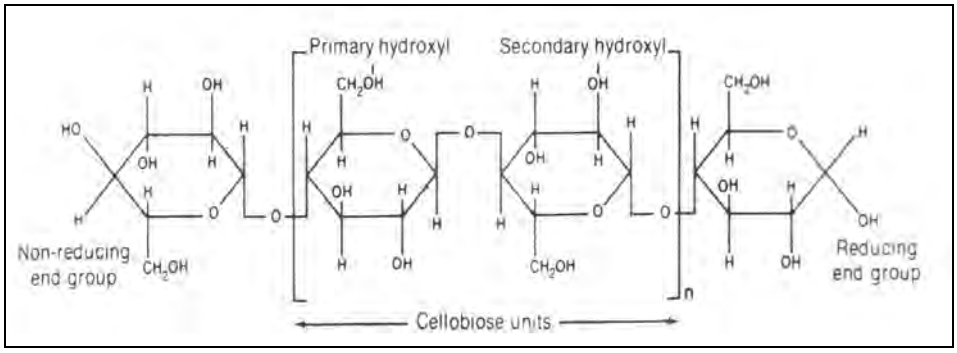
6) แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการตีกระจายเยื่อเข้าไปทำลายสายโซ่ของเซลลูโลสที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยให้ผิดรูปไป ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำงานได้ง่ายขึ้น (ลักษณะเดียวกับข้อเสนอแนะของ Zeyer และคณะ)

2.1.8 **เคมีของเส้นใย** (fiber chemistry)

เนื่องจากการใช้เอนไซม์ในการกำจัดหมึกออกจากเส้นใยนั้น เอนไซม์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจการทำงานของเอนไซม์มากขึ้น จึงขออธิบายถึงเคมีของเส้นใยไว้คร่าวๆ ดังนี้

2.1.8.1 **เซลลูโลส** (cellulose)

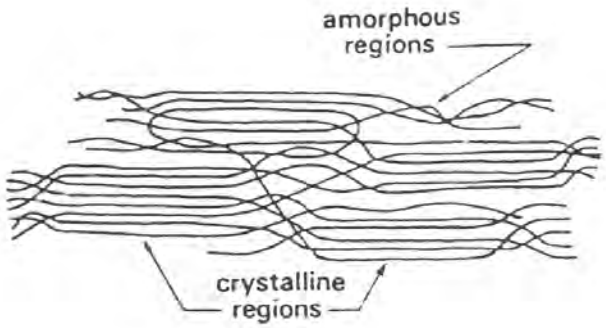
เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ของน้ำตาลกลูโคส (glucose) หลายโมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะ β-(1,4) glycosidic linkage ต่อเป็นโซ่ยาว ดังแสดงในภาพที่ 2-20 การเกาะกันของโมเลกุลน้ำตาลจะเหนียวแน่นและทนต่อสารเคมี ทำให้สลายตัวได้ยาก เซลลูโลสจะเป็นส่วนประกอบอยู่ในผนังเซลล์ของพืช ช่วยให้พืชแข็งแรง มีความเหนียว ไม่ละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม เซลลูโลสจะถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyse) ได้ง่ายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เซลลูโลสจัดเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และเป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใย จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตเยื่อและกระดาษ เนื่องจากเป็นตัวสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย (fiber-to-fiber bond)



ภาพที่ 2-20 โครงสร้างของเซลลูโลส [19]

เซลลูโลสประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน (ภาพที่ 2-21) ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ บริเวณที่โครงสร้างโมเลกุลมีการเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline regions) โมเลกุลของเซลลูโลสบริเวณนี้จะมีการจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) อย่างเป็นระเบียบ ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรง สามารถต้านทานต่อสารเคมีที่เป็นตัวทำละลาย (solvents) ได้ดี สารเคมีจึงซึมเข้าบริเวณนี้ได้ยาก ส่วนที่ 2 คือ บริเวณที่โครงสร้างโมเลกุลมีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (amorphous regions) บริเวณนี้สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายจะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้าง

เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จึงไม่แข็งแรง สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายจึงสามารถซึมผ่านได้ ทำให้เซลลูโลสบริเวณนี้ถูกทำลายได้ง่าย



ภาพที่ 2-21 บริเวณส่วนที่เป็นระเบียบและส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเซลลูโลส [19]

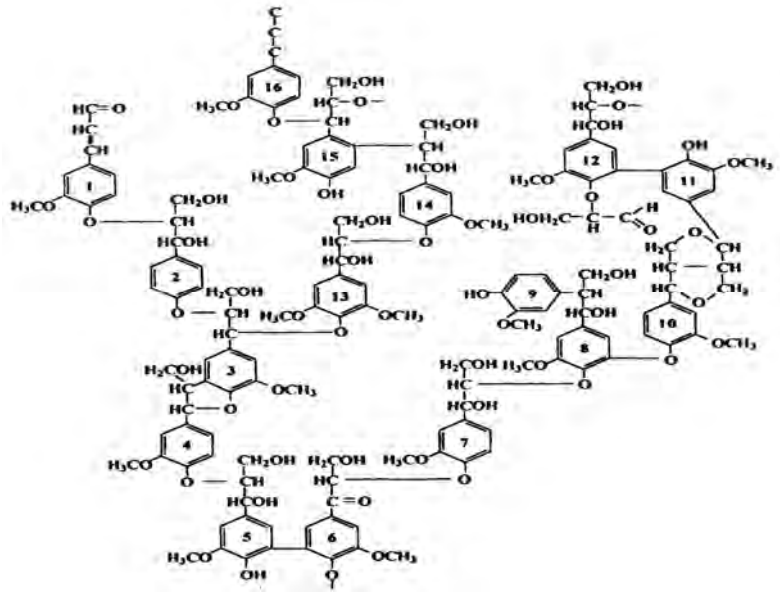
2.1.8.2 **เฮมิเซลลูโลส** (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ของน้ำตาลหลายหน่วยมาเชื่อมต่อกัน มีทั้งน้ำตาลเฮกโซส (hexoses) ที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส (glucose),น้ำตาลแมนโนส (mannose) และน้ำตาลกาแลกโตส (galactose) และยังมีน้ำตาลเพนโตส (pentose) ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ น้ำตาลไซโลส (xylose) กับน้ำตาลอะราบิโนส (arabinose) ซึ่งทำให้มีความแตกต่างจากเซลลูโลสตรงที่เซลลูโลสมีน้ำตาลกลูโคสเพียงชนิดเดียวมาเชื่อมต่อกัน ด้วยความที่เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดมาเชื่อมต่อกัน โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสจึงมีเฉพาะบริเวณที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้เฮมิ-เซลลูโลสอุ้มน้ำและพองตัวได้ดี ถูกทำปฏิกิริยาได้ง่าย เมื่อโดนสารเคมีจึงละลายและถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่าย

2.1.8.3 **ลิกนิน** (lignin)

ลิกนินเป็นสารประเภทพอลีเมอร์เช่นเดียวกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส หากแต่ลิกนินประกอบด้วยสารประกอบแอโรมาติกจำพวกเฟนนิลโพรเพน (phenyl propane) ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน (irregular noncrystaline structure) ดังแสดงในภาพที่ 2-22 ลิกนินส่วนมากจะพบที่บริเวณมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella) ซึ่งคือบริเวณระหว่างเส้นใย ลิกนินส่วนน้อยจะกระจายอยู่ในตัวเส้นใย โดยลิกนินมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในการผลิตกระดาษต้องคำนึงถึงปริมาณลิกนินที่มีอยู่ในเยื่อ เนื่องจากลิกนินทำหน้าที่เหมือนกาวเชื่อมเส้นใยไว้ด้วยกัน ฉะนั้นการที่จะนำเส้นใยเดี่ยวๆ มาใช้ในการผลิตกระดาษนั้น จึงต้องมีการจัดการกับลิกนินก่อนโดย

ลิกนินอาจถูกแยกออกจากผนังเส้นใยและถูกกำจัดออกไปในการผลิตเยื่อแบบเคมี ในขณะที่การผลิตเยื่อแบบเชิงกลนั้น ลิกนินจะไม่ถูกกำจัดออกไปแต่จะถูกทำให้อ่อนตัวลง เพื่อให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้นด้วยแรงกล อย่างไรก็ตาม ลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อมีผลต่อความเหลืองของกระดาษ (yellowness) เนื่องจากลิกนินมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีสีซึ่งเรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแสง รวมถึงความชื้นทำให้เปลี่ยนสีกลายเป็นสีเหลืองขึ้นมา ดังนั้นในการผลิตกระดาษที่ต้องการความขาวสว่างสูง ส่วนมากแล้วมักจะนำเยื่อที่ผลิตได้ไปทำการฟอกเยื่อ (bleaching) ต่อ เพื่อกำจัดเอาลิกนินออก



ภาพที่ 2-22 ตัวอย่างโครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้สน (spruce) [20]

2.1.9 เอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกจากเส้นใย

เอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกนั้นมีหลายชนิด อย่างไรก็ตาม ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเพียงเอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์แลกเคสที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

2.1.9.1 เอนไซม์เซลลูเลส

เซลลูเลส คือ กลุ่มของเอนไซม์เชิงซ้อน (complex enzymes) ที่ทำงานร่วมกันในการย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักชนิดหนึ่งของเส้นใย เซลลูเลสประกอบด้วยเอนไซม์ 3 กลุ่มหลักได้แก่ เอกโซกลูคาเนส (exoglucanase, E.C.3.2.1.91) เอนโดกลูคาเนส (endoglucanase, E.C.3.2.1.4) และเบต้า-กลูโคซิเดส (β-glucosidase, E.C.3.2.1.21) ผลจากการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเซลลูเลสจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่สำคัญคือ น้ำตาลกลูโคส [21] เซลลูเลสสามารถผลิตได้จากจุลินทรีย์พวกเชื้อรา แบคทีเรีย และแอคติโนมัยซีส ซึ่งเชื้อราเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้าง

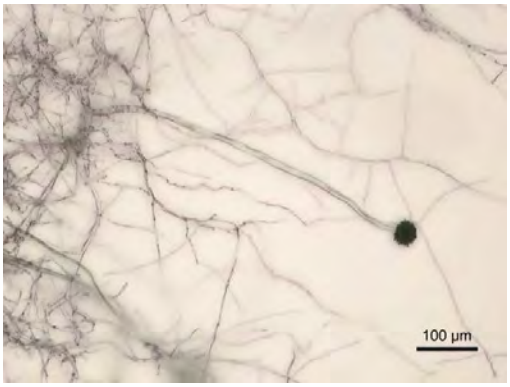
เอนไซม์เซลลูเลสได้ในปริมาณที่มากกว่า และขับออกจากเซลล์ลงสู่อาหารเลี้ยงเชื้อ ทำให้สะดวกต่อการแยกสกัดเอนไซม์ จึงมีผู้ให้ความสนใจศึกษาและนำมาผลิตเอนไซม์ในระดับอุตสาหกรรมมาก

2.1.9.1.1 **เชื้อราชนิด *Aspergillus niger***

ตารางที่ 2-2 การจำแนกทางอนุกรมวิธาน (scientific classification) ของ *Aspergillus niger* [22]

Domain:	Eukaryota
Kingdom:	Fungi
Phylum:	Ascomycota
Subphylum:	Pezizomycotina
Class:	Eurotiomycetes
Order:	Eurotiales
Family:	Trichocomaceae
Genus:	*Aspergillus*
Species:	***A. niger***

ตารางที่ 2-2 แสดงการจำแนกทางอนุกรมวิธานของเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* และภาพที่ 2-23 แสดงลักษณะของเชื้อราชนิดนี้ ซึ่งเชื้อราชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิห้องและสามารถพบได้ทั่วไป โคโลนีด้านที่เริ่มเจริญขึ้นจะมีสีขาว ต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและดำ โดยมีอัตราการเจริญเติบโต 7 วัน



ภาพที่ 2-23 ลักษณะของ *Aspergillus niger* [22]

เชื้อรา *A. niger* สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเอนไซม์ที่มีแอคติวิตี (activity) สูงพร้อมกับการสร้างกรดอินทรีย์ เช่น กรดฟูมาลิก กรดซิตริกและกรดแลคติก รวมถึงนำไปใช้ผลิตกลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ใช้กำจัดกลูโคสออกจากอาหาร จึงใช้ประโยชน์ในการถนอมอาหาร และสามารถนำไปใช้ในการผลิตเซลลูเลสเพื่อใช้ในการย่อยเซลลูโลสจากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร อย่างไรก็ตาม ข้อควรระวังของเชื้อราชนิดนี้ คือ *A.niger* เป็นสาเหตุสำคัญของโรคหูชั้นนอกอักเสบ บางสเตรนสร้างสารอะฟลาท็อกซิน ซึ่งมักปนเปื้อนอยู่ตามหัวหอม [22]

2.1.9.1.2 **สมบัติของเอนไซม์เซลลูเลส**

เซลลูเลสเป็นไกลโคโปรตีน (glycoprotein) ประกอบด้วยโปรตีนและคาร์โบไฮ-เดรตในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 30,000 ถึง 60,000 ดาลตัน [23] มีสมบัติละลายน้ำได้ดี และไม่ต้องการ co-factor หรือโลหะอื่นๆ ในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปเอนไซม์เซลลูเลสที่ได้จากจุลินทรีย์จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานประมาณ 50 °C ยกเว้นจุลินทรีย์ทนร้อนบางชนิด นอกจากนี้เซลลูเลสยังมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อความเป็นกรด-เบส (pH) ในช่วงกว้างประมาณ 4.0 ถึง 8.0 และคงทนต่อสารเคมีได้ดี สามารถเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 และ 4 °C ได้เป็นเวลาหลายปีหรือเก็บโดยวิธีการทำแห้งด้วยความเย็น (freeze dry) หรือตกตะ-กอนด้วยอะซิโตนหรือเอทานอล โดยไม่สูญเสียสมบัติ [24] อย่างไรก็ตาม เอนไซม์ที่ได้จากจุลิน-ทรีย์ต่างชนิดกันย่อมมีสมบัติแตกต่างกัน

2.1.9.1.3 **ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส**

ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อจุลินทรีย์ ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสนอกจากจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของจุลินทรีย์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ชนิดและความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน ธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรอง รวมไปถึงสภาพแวดล้อมในการผลิต ซึ่งได้แก่ อายุและปริมาณของเชื้อเริ่มต้น ความเป็นกรด-เบส (pH) อุณหภูมิ การให้อากาศและอัตราการเขย่า [25]

2.1.9.1.4 **การประยุกต์ใช้เซลลูเลส**

การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยระบบเอนไซม์เซลลูเลสเป็นวิธีทางชีวภาพ วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีเคมี คือ ต้นทุนต่ำกว่า เพราะปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองได้ในที่อุณหภูมิซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถเจริญเติบโตได้ จึงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานงานมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ไม่รุนแรงมาก ไม่จำเป็นต้องใช้ภาชนะที่ทนกรด และที่สำคัญไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลจากการย่อยสลาย

เซลลูโลสด้วยเซลลูเลสทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลกลูโคส ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์ โปรตีนเซลล์เดี่ยว วิตามิน กรดอินทรีย์ สารปฏิชีวนะ และเคมีภัณฑ์ต่างๆ โดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) [21] นอกจากนี้ยังมีการนำเซลลูเลสไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมผลิตอาหาร อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ เป็นต้น [26]

2.1.9.2 **เอนไซม์แลกเคส**

แลกเคสเป็นเอนไซม์สำคัญที่จัดอยู่ในกลุ่มออกซิโดรีดักเทส (oxidoreductase, E.C.1.10.3.2) ที่มีทองแดงหลายโมเลกุล (multi-copper) ในโครงสร้าง ซึ่งในการทำงานจะต้องมีการจับประสานกับคอปเปอร์ไอออน แล้วเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic) และอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา กล่าวคือ ออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ (reduce) ให้เป็นน้ำ แลกเคสสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหนึ่งอิเล็คตรอนจากสับสเตรต (substrate) ที่เป็นสารอะโรมาติกหลายชนิดและมีสับสเตรตในช่วงกว้างมาก เอนไซม์ชนิดนี้สามารถกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ (oxidise) หนึ่งอิเล็กตรอนจากหมู่ฟีนอล (phenol) อะนิลีน (aniline) และอะโรมาติกไธออล (aromatic thiol) ให้อยู่ในรูปสารอนุมูลอิสระ ตามด้วยปฏิกิริยาการตัดหรือต่อสายพอลีเมอร์ จนได้ผลิตภัณฑ์เป็นควิโนน (quinone) [27] สิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ที่สามารถผลิตแลกเคสได้ คือ พืชชั้นสูง และรา ซึ่งแลกเคสส่วนใหญ่ถูกผลิตขึ้นจากเชื้อราเน่าขาว โดยรากลุ่มนี้ในธรรมชาติต้องสลายลิกนิน เพื่อนำเอาเซลลูโลสที่อยู่ในเนื้อไม้มาใช้เป็นแหล่งคาร์บอน โดยที่สามารถสลายลิกนินได้สมบูรณ์ เอนไซม์หลักที่สำคัญในการย่อยสลายสารประกอบลิกนินของเชื้อราในกลุ่มนี้ ได้แก่ ลิกนินเปอร์อกซิเดส (lignin peroxidase; LiP), แมงกานีสเปอร์อกซิเดส (manganese peroxidase; MnP) และ แลกเคส (Laccase; Lac) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในช่วงเมทาบอลิซึมทุติยภูมิ (secondary metabolism) [28]

2.1.9.2.1 **เชื้อราเน่าขาวชนิด** ***Pycnoporus sanguineus***

ตารางที่ 2-3 แสดงการจำแนกทางอนุกรมวิธานของ *P. sanguineus* และภาพที่ 2-24 แสดงลักษณะของเชื้อราเน่าขาวชนิดนี้ โดยทั่วไปแล้วเอนไซม์จากเห็ดส่วนใหญ่ได้จากเส้นใยที่เพาะขึ้น ซึ่ง *P. sanguineus* คือ เห็ดขอนแดง (red fungus) มีลักษณะดอกเป็นหมวกเห็ดรูปพัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2-6 เซ็นติเมตร หนา 1-3 มิลลิเมตร ผิวเรียบมันและเป็นแถบวงกลมซ้อนกัน ด้านล่างเต็มไปด้วยรูขนาดเล็กเชื่อมติดกัน สีแดงหรือแดงอมส้ม

โดยมักเจริญเติบโตอยู่ตามตอไม้ ท่อนไม้ กิ่งไม้ที่ล้มกองอยู่ตามพื้นดิน หรือบางครั้งอาจพบเป็นปรสิตกับไม้ยืนต้น ขึ้นเป็นดอกเดี่ยวและอยู่เป็นกลุ่มใกล้กันข้างขอนไม้ สามารถพบได้ในประเทศไทยทั่วทุกภาค ดอกของเห็ดกลุ่มนี้มีลักษณะแข็งกระด้างยากต่อการขบเคี้ยว จึงไม่นิยมนำมารับประทาน *P. sanguineus* มีความสามารถปลดปล่อยสารพอลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) มีการสร้างสารเบต้ากลูแคน (β-glucan) และมีการผลิตเอนไซม์แลกเคส ซึ่งเชื้อชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิห้องและเจริญเติบโตได้รวดเร็ว โดยโคโลนีด้านที่เริ่มเจริญขึ้นจะมีสีขาว ต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม

ตารางที่ 2-3 การจำแนกทางอนุกรมวิธาน (scientific classification) ของ *Pycnoporus sanguineus* [29]

Kingdom:	Fungi
Phylum:	Basidiomycota
Class:	Basidiomycetes
Subclass:	Agaricomycetidae
Order:	Polyporales
Family:	Polyporaceae
Genus:	*Pycnoporus*
Species:	***P. sanguineus***

ภาพที่ 2-24 ลักษณะของ *Pycnoporus sanguineus* [30]

2.1.9.2.2 **สมบัติของเอนไซม์แลกเคส**

แลกเคสส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 520-550 หมู่ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60-80 กิโลดาลตัน [31] มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วงระหว่าง 3.5-7.0 [32] มีสมบัติในการใช้สับสเตรตได้หลากหลาย ซึ่งแลกเคสส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นจากการถูกชักนำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะสร้างขึ้นในไซโทพลาสซึม (cytoplasm) แล้วหลั่งออกนอกเซลล์เพื่อย่อยสลายสับสเตรต สับสเตรตหรือสารที่ชักนำให้เกิดการผลิตแลกเคสส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มฟีนอลิกที่เป็นอนุพันธ์ของลิกนิน โดยทั่วไปสับสเตรตที่มีลักษณะคล้ายกับสารประกอบไดฟีนอล (diphenol) จะถูกออกซิไดซ์ด้วยแลกเคสได้ดี [28] อย่างไรก็ตาม สารประกอบที่ไม่ใช่สารฟีนอลิกก็มีรายงานว่าสามารถชักนำการผลิตแลกเคสได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน แต่อาจต้องใช้สารที่ทำหน้าที่เป็นมีเดียเอเตอร์ (mediator) ร่วมด้วย [33] โดยสารมีเดียเอเตอร์สามารถเป็นได้ทั้งสารจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ ซึ่งจะส่งผลให้แลกเคสสามารถที่จะออกซิไดซ์พวกเวราทิล (veratryl) และเบนซิลแอลกอฮอล์ (benzyl alcohol) ไปจนถึงพอลีเมอร์ของลิกนินได้ [34] จากสมบัติของแลคเคสที่มีความจำเพาะต่อสับสเตรตได้หลากหลายชนิดทำให้แลคเคสมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ

2.1.9.2.3 **ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการผลิตเอนไซม์แลกเคส**

เงื่อนไขในการที่เชื้อราจะผลิตเอนไซม์ออกมานั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการเจริญ ตัวอย่างเช่น สัดส่วนของแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนในสารละลาย ปริมาณสารอาหารที่จำกัดทั้งแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน [35] นอกจากสภาวะที่กระตุ้นให้มีการผลิตเอนไซม์แล้ว การย่อยสลายลิกนินนั้นจำเป็นต้องมีสภาวะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตและการทำงานของเอนไซม์ซึ่งอาจจะไม่ใช่สภาวะเดียวกับการผลิตเอนไซม์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ที่ถูกผลิตขึ้นได้แก่ ชนิดของสารอาหาร ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจน [36]

2.1.9.2.4 **การประยุกต์ใช้แลกเคส**

แลกเคสได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมากในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากความสามารถในการออกซิไดซ์ (oxidise) สารประกอบที่มีส่วนผสมของสารลิกนินที่เป็นกรดฟีโนลิก (phenolic) และไม่เป็นกรดฟีโนลิก (non-phenolic) ซึ่งทำให้เอนไซม์แลกเคสเป็นสิ่งที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับกรรมวิธีทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ จึงได้มีการนำเอนไซม์นี้มาประยุกต์ใช้ด้านการฟอกเยื่อกระดาษให้ขาวขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถนำแลกเคสประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน

อุตสาหกรรม โรงงานสิ่งทอ และโรงงานปิโตรเคมี ด้านการตรวจทางการแพทย์หรือเป็นตัวบำบัดยากำจัดวัชพืช ยาฆ่าแมลง สารวัตถุระเบิดต่างๆ ในดิน นอกจากนี้ยังสามารถนำแลกเคสมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พอลีเมอร์ที่ใช้ในการกำจัดสารเคมีโดยใช้วิธีทางชีวภาพ รวมถึงใช้ในระบบการทำน้ำให้สะอาดบริสุทธิ์ และนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอางค์ [37]

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zeyer และคณะ [17] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในการกำจัดหมึกออก และได้เสนอแบบจำลองการเข้าไปทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ในการกำจัดหมึกออก จากการทดลองพบว่าแรงกลและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในเครื่องตีกระจายเยื่อเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อการทำงานของเอนไซม์ ดังอธิบายได้จากแบบจำลองที่คณะนักวิจัยได้นำเสนอ กล่าวคือ แรงกลและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการตีกระจายเยื่อ ทำให้โครงสร้างของเส้นใยตรงบริเวณผิวหน้าของกระดาษที่มีอนุภาคหมึกปกคลุมอยู่เกิดการบิดเบี้ยวไป เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยตรงบริเวณนั้นได้ง่ายขึ้น การตัดสายโซ่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูเลสของเส้นใยโดยเอนไซม์ทำได้สะดวกขึ้น อนุภาคของหมึกจึงหลุดออกมาจากผิวหน้าของเส้นใยได้อย่างง่ายดายขึ้น

Prasad และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เอนไซม์ช่วยในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ด้วยระบบออฟเซต โดยใช้เซลลูเลสผสมกับเฮมิเซลลูเลส ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 5.5 จากการทดลองพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้เอนไซม์ เอนไซม์ที่เติมลงไปจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยเล็กๆ ได้ดีกว่า ส่งผลให้ปริมาณของเส้นใยเล็กๆ น้อยลง เมื่อพื้นที่ผิวของเส้นใยทั้งระบบลดน้อยลงจึงทำให้เยื่อมีค่าการระบายน้ำที่สูงขึ้น เพราะเยื่อมีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรงของเยื่อที่ผลิตได้พบว่าการใช้เอนไซม์ทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) และค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากในระบบมีเส้นใยขนาดยาวอยู่มาก จึงทำให้ความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความขาวสว่าง (brightness) นั้นพบว่าการใช้เอนไซม์มีผลทำให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่ไม่ได้มีการใช้เอนไซม์

Jeffries และคณะ [38] ได้ทดลองใช้เอนไซม์เซลลูเลส เอนไซม์ไซลาเนส และใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกัน ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษถ่ายเอกสาร จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ทำให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ (effective residual ink concentration; ERIC) หลังการกำจัดหมึกออกลดลงกว่ากรณีที่ใช้สารเคมี นอกจากนี้การใช้เอนไซม์ยังส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ (freeness) ของเยื่อมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ใช้เอนไซม์ ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์จะเข้าไป

ทำปฏิกิริยากับเส้นใยที่มีขนาดสั้นก่อน เพราะมีพื้นที่ผิวให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยามาก ส่งผลให้เยื่อที่เหลือในระบบมีปริมาณเส้นใยยาวอยู่มากกว่าเส้นใยสั้น ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของเยื่อจึงลดลง เนื่องจากพื้นที่ผิวของเยื่อโดยรวมลดลง ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อจึงเพิ่มขึ้น

Geng และ Li [39] ได้ศึกษาถึงการใช้เอนไซม์เอนโดกลูคาเนส (endoglucanase) 2 ชนิด ได้แก่ Cell B และ Cell E ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์ จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ทำให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อและค่าพื้นที่หมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ (residual ink area) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้เอนไซม์ นอกจากนี้การใช้เอนไซม์ยังส่งผลให้เยื่อที่ผลิตได้มีค่าความขาวสว่างสูงกว่าในกรณีที่ไม่ใช้เอนไซม์

Lee และคณะ [13] ศึกษากลไกการใช้เอนไซม์ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์ โดยควบคุมปัจจัยการกำจัดหมึกให้มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดหมึกจะใช้เซลลูเลสร่วมกับเฮมิเซลลูเลสทางการค้าที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* ที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 6 จากการทดลองพบว่ากระดาษรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออก 73% มีประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกเพิ่มมากขึ้นเป็น 95% ในระบบการลอยฟองอากาศเมื่อมีการใช้เอนไซม์

Zhang และคณะ [40] ศึกษาถึงการใช้เซลลูเลสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าผสมนิตยสารเก่า โดยใช้เซลลูเลส 3 ชนิดทางการค้า คือ NS613, NS476 และ NS342 โดยผสมหนังสือพิมพ์กับนิตยสารที่อัตราส่วน 70:30 ในความเข้มข้นของน้ำเยื่อ 10% เติมเอนไซม์ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ (repulping) โดยบ่มเป็นเวลา 3 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การกำจัดหมึกโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสยังมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้ด่างหรือซัลไฟต์ (sulphite) และถ้าใช้เซลลูเลส (Novozyme NS476) ร่วมกับด่างหรือซัลไฟต์จะช่วยในการกำจัดหมึกหนังสือพิมพ์เก่าดีที่สุด

Xu และคณะ [41] ศึกษาถึงประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าโดยใช้เซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลสร่วมกับแลกเคส-ไวโอลูริคแอซิด (Laccase-violuric acid system) จากนั้นนำเยื่อไปฟอกต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogenperoxide; H_2O_2) จากการทดลองพบว่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำลง ค่าความขาวสว่างสูงขึ้น และมีสมบัติด้านความแข็งแรงดีกว่าการกำจัดหมึกโดยใช้เอนไซม์ตัวเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของเส้นใยเฉลี่ยและความหยาบเส้นใยลดลงเล็กน้อย รวมถึงยังพบว่ามีการย่อยสลายลิกนินออกในระหว่างขั้นตอนการกำจัดหมึกออกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* แลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* และการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและที่มีต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก โดยการทดลองจะทำการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *A. niger* เพื่อผลิตเซลลูเลสและเพาะเลี้ยงเชื้อรา *P. sanguineus* เพื่อผลิตแลกเคส จากนั้นนำเซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้มากำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ซึ่งตัวแปรเกี่ยวกับเอนไซม์ที่ศึกษามี 3 ตัวแปรดังนี้ คือ

1. ชนิดของเอนไซม์ เพื่อศึกษาผลการทำงานของเซลลูเลสในการทำปฏิกิริยาย่อยสลายเซลลูโลส ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดหมึก และศึกษาผลการทำงานของแลคเคสในการทำปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบลิกนิน ช่วยเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อ

2. ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสที่ใช้ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในแต่ละภาวะการทดลอง

3. ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาหลังการตีกระจายเยื่อ โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ 0 และ 30 นาที

การทดลองเริ่มต้นจากการนำกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ออฟเซตโดยมีการตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณหมึกพิมพ์เท่ากันทุกแผ่น ด้วยการใช้หนังสือพิมพ์ยี่ห้อเดียวกันฉบับวันเดียวกัน และจากแหล่งพิมพ์เดียวกัน จากนั้นนำกระดาษไปเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 เดือน ก่อนที่จะนำมาทำการทดลอง หลังจากครบเวลาที่กำหนดแล้วนำกระดาษหนังสือพิมพ์มาทำการตีกระจายให้เป็นเยื่อโดยมีการใส่เอนไซม์ลงไปด้วยเพื่อแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย ก่อนที่จะนำเยื่อที่ได้มาเข้าสู่กระบวนการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ จากนั้นนำเยื่อที่ได้ทั้งในส่วนที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้วและส่วนที่ไม่ผ่านการกำจัดหมึกออก มาคำนวณหาปริมาณผลผลิต (yield) ของเยื่อที่ได้ มาทดลองหาค่าสภาพระบายได้ (freeness) และวิเคราะห์คุณภาพเส้นใย ก่อนที่จะนำเยื่อที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบ จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติเชิงแสง คือ หาค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ (effective residual ink concentration; ERIC) และค่าความขาวสว่าง (brightness) รวมถึงวัดสมบัติทางด้านความแข็งแรง ได้แก่ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) และค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) จากนั้นนำ

ผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออก

3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. หนังสือพิมพ์ (newspaper) Post Today
2. กระดาษกรองเบอร์ 1; ยี่ห้อ Whatman บริษัท Whatman International จำกัด ประเทศอังกฤษ
3. เซลลูเลส ที่ผลิตเองจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* ซึ่งมีค่า activity เท่ากับ 1.23 Unit/g
4. แลกเคส ที่ผลิตเองจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* ซึ่งมีค่า activity เท่ากับ 1.32 Unit/g
5. อาหารสูตร Potato Dextrose Agar (PDA), Production medium, Glucose Yeast Peptone (GYP) ที่เตรียมได้
6. 2,5-dinitrosalicylic acid (DNS)
7. Copper Sulphate Pentahydrate ($CuSO_4.5H_2O$)
8. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4); บริษัท LAB-SCAN จำกัด ประเทศโปแลนด์
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Merck บริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมนี
10. สารลดแรงตึงผิว (surfactant) Eka RF 4283 (non ionic surfactant); บริษัท Eka Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave); บริษัท Tai Chang Medical Instrument factory ประเทศไต้หวัน
2. เครื่องเขย่า (shaker) รุ่น SPL15 บริษัท Labcon ประเทศแอฟริกาใต้
3. เครื่องผสมวอร์เทกซ์ (vortex mixer) รุ่น Genie 2 G-560E บริษัท Scientific Industries ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. อ่างน้ำสำหรับต้ม (boiling waterbath) รุ่น SU5 บริษัท Instruments (Cambridge) Barrington ประเทศอังกฤษ

5. ตู้ถ่ายเชื้อสำหรับเชื้ออันตราย (laminar 2 for biohazard); รุ่น BVT 123 ยี่ห้อ Issoco Laminar flow
6. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV/VIS spectrophotometer) รุ่น 2800 บริษัท Unico ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV/VIS spectrophotometer) รุ่น HP8453 บริษัท Agilent ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper); ยี่ห้อ Formax รุ่น 450H บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เครื่องลอยฟองอากาศ (flotation Cell); ยี่ห้อ Voith รุ่น Delta 25 บริษัท Voith ประเทศเยอรมนี
10. เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (sheet former); รุ่น Rapid-Köthen Blattbildner บริษัท PTI Laboratory Equipment ประเทศออสเตรีย
11. เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness tester); รุ่น LTDA บริษัท Regmed Industria Technica de Frecisao ประเทศบราซิล
12. เครื่องวัดความขาวสว่างและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Brightness & ERIC tester); ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color-touch PC บริษัท Technidyne Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
13. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Elmendolf tearing resistance tester); รุ่น Protear ยี่ห้อ Thwing-Albert บริษัท Thwing-Albert Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength tester); รุ่น Strograph E-S บริษัท Toyoseiki Seisaku-SHO จำกัด ประเทศญี่ปุ่น
15. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength tester); ยี่ห้อ L&W บริษัท Lorentzen & Wettre ประเทศสวีเดน
16. เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer, FQA); ยี่ห้อ Optest บริษัท Optest Equipment ประเทศแคนาดา
17. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (0.1-21 kg); ยี่ห้อ AND รุ่น GX-20K ประเทศญี่ปุ่น
18. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002 บริษัท Denver Instrument ประเทศเยอรมนี
19. ตู้อบ (oven); ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมนี

20. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter); บริษัท Denver Instrument ประเทศเยอรมนี
21. ขวดรูปชมพู่ (flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
22. จานเพาะเชื้อ (petridish)
23. เข็มเขี่ยเชื้อ (needle)
24. คอร์ก บอเรอร์ (cork borer)
25. ปิเปต (pipettrips) บริษัท Treff AG, CH_9113 Degersheim ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
26. กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 25, 100 และ 1000 มิลลิลิตร
27. บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 25, 50 และ 250 มิลลิลิตร
28. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* แลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* และการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและที่มีต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก รวมถึงทำการเปรียบเทียบระหว่างการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) กับการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดมีดังนี้

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.2.1.1 การเตรียมกระดาษเพื่อใช้ในการทดลอง

นำกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ออฟเซตที่มีการตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณหมึกพิมพ์เท่ากันทุกแผ่น ด้วยการใช้หนังสือพิมพ์ยี่ห้อเดียวกัน ฉบับวันเดียวกัน และจากแหล่งพิมพ์เดียวกัน ไปเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะโดยไม่ให้ถูกแสงและความชื้นอย่างน้อย 1 เดือน ในแต่ละสภาวะการทดลองจะมีการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์จำนวน 1 ฉบับหรือ 222 กรัม (น้ำหนักแห้ง) เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำกระดาษมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 นิ้ว x 1 นิ้ว และแช่น้ำทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัวและง่ายต่อการตีกระจายให้เป็นเยื่อ

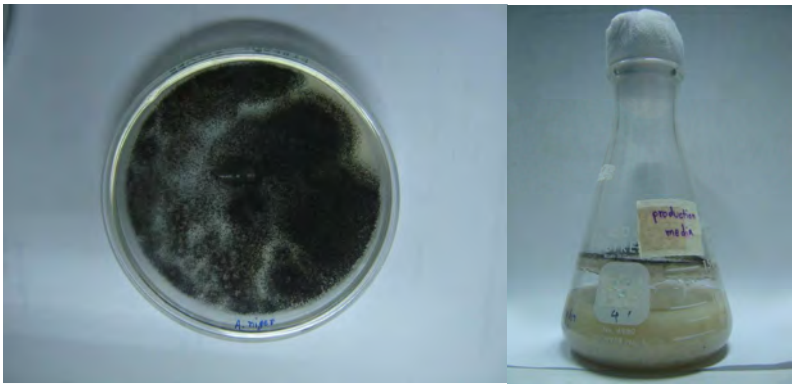
3.2.1.2 การผลิตเซลลูเลสและแลกเคสเพื่อใช้ในการกำจัดหมึก

การผลิตเซลลูเลสจากเชื้อรา *Aspergillus niger* และวิเคราะห์แอคติวิตี (activity) ของเอนไซม์

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร PDA (potato dextrose agar) และสูตร production medium และทำการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลานาน 15 นาที เทอาหารสูตร PDA ที่เตรียมได้และนึ่งฆ่าเชื้อแล้วลงในจานเพาะเชื้อ รอจนกระทั่งอาหารวุ้นแข็งตัว ทำการเพาะเชื้อรา *A. niger* โดยถ่ายเชื้อที่เลี้ยงไว้ในอาหารวุ้นแข็งเอียงลงไปในจานเพาะเชื้อที่เท PDA ไว้ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 7 วัน หรือจนกระทั่งเชื้อรามีการสร้างสปอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-1(ก)

2. เจาะชิ้นวุ้นที่มีเชื้อราเจริญอยู่ด้วยวิธีการปลอดเชื้อ (aseptic technique) บริเวณปลายเส้นใยราด้วย cork borer แล้วใช้เข็มเขี่ยตัดชิ้นวุ้น โดยนำชิ้นวุ้นที่เจาะได้มาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร production medium จำนวน 5 ชิ้น (5 Plugs) ต่อ production medium 100 มิลลิลิตร (1 ชิ้นวุ้นที่มี *A. niger* จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร) ซึ่งเตรียมไว้ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3-1(ข) ทำการบ่มและให้อากาศ โดยเลี้ยงบนเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำผลผลิตที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยเก็บเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวไว้ใช้ และเก็บไว้ในตู้เย็นช่องแช่แข็ง

3. ตรวจสอบแอคติวิตีของเซลลูเลสด้วยวิธี DNS assay ตามวิธีของ Miller และคณะ [42]



(ก) (ข)

ภาพที่ 3-1 ลักษณะของเชื้อราที่เจริญอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร (ก) PDA และ (ข) production medium เป็นเวลา 7 วัน เพื่อผลิตเป็นเซลลูเลส

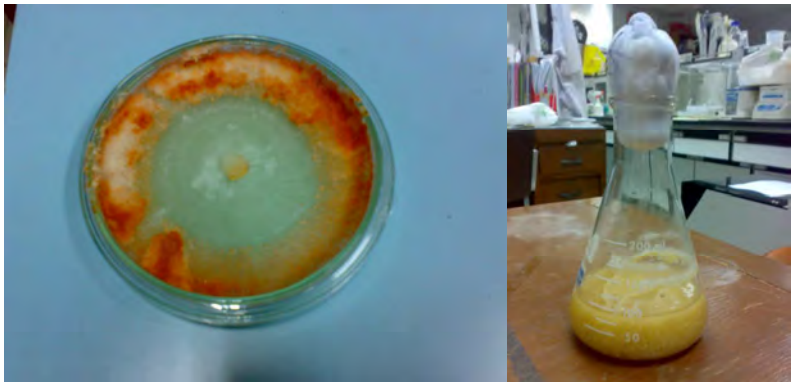
การผลิตแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* และวิเคราะห์แอคติวิตีของเอนไซม์

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร PDA (potato dextrose agar) และสูตร GYP (glucose yeast peptone) และทำการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 ^{o}C เป็นเวลานาน 15 นาที เทอาหารสูตร PDA ที่เตรียมได้และนึ่งฆ่าเชื้อแล้วลงในจานเพาะเชื้อ รอจนกระทั่งอาหารวุ้นแข็งตัว ทำการเพาะเชื้อรา *P. sanguineus* โดยถ่ายเชื้อที่เลี้ยงไว้ในอาหารวุ้นแข็งเอียงลงไปในจานเพาะเชื้อที่เท PDA ไว้ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 7 วัน หรือจนกระทั่งเชื้อรามีการสร้างสปอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-2(ก)

2. เจาะชิ้นวุ้นที่มีเชื้อราเจริญอยู่ด้วยวิธีการปลอดเชื้อ (aseptic technique) บริเวณปลายเส้นใยราด้วย cork borer แล้วใช้เข็มเขี่ยตัดชิ้นวุ้น โดยนำชิ้นวุ้นที่เจาะได้มาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร GYP จำนวน 10 ชิ้น (10 Plugs) ต่อ production medium 100 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมไว้ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3-2(ข) ทำการบ่มและให้อากาศ โดยเลี้ยงบนเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน

3. ทำการเติม $CuSO_4.5H_2O$ ที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน (membrane) ลงในขวดรูปชมพู่ที่บ่มเลี้ยงเชื้ออยู่ขวดละ 600 ไมโครลิตร แล้วทำการให้อากาศบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 วัน หลังจากนั้นนำผลผลิตที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยเก็บเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวไว้ใช้ และเก็บไว้ในตู้เย็นช่องแช่แข็ง

4. ตรวจสอบแอคติวิตีของแลกเคสด้วยวิธี Laccase assay ตามวิธีของ Prasongsuk และคณะ [43]



(ก) (ข)

ภาพที่ 3-2 ลักษณะของเชื้อราที่เจริญอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร (ก) PDA เป็นเวลา 7 วัน และ (ข) production medium; GYP เป็นเวลา 10 วัน เพื่อผลิตเป็นแลกเคส

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 1: การกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม)

1. นำกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ออฟเซต โดยมีการตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณหมึกพิมพ์เท่ากันทุกแผ่นและผ่านการเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะอย่างน้อย 1 เดือน ก่อนที่จะนำมาทำการทดลอง มาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 นิ้ว x 1 นิ้ว แล้วนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัวและง่ายต่อการตีกระจายให้เป็นเยื่อ

2. เมื่อครบเวลาในการแช่กระดาษ นำกระดาษมาทำการตีกระจายให้เป็นเยื่อเพื่อให้อนุภาคของหมึกแยกออกจากตัวเส้นใย โดยใช้ความเข้มข้นของเยื่อ (pulp consistency) ในการตีกระจายเยื่อร้อยละ 6 ทำการใส่สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (non-ionic surfactant) Eka RF 4283 ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เจือจางที่ความเข้มข้น 5% (เพื่อใช้ในการปรับ pH ให้ได้ค่าเท่ากับ 5.5±0.2)

3. ทำการตีกระจายเยื่อโดยใช้ความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อของเครื่อง 300 รอบต่อนาที เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C และที่ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 5.5±0.2 (กำหนดใช้ค่า pH เท่ากับ 5.5±0.2 เนื่องจากในการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งมีการใช้เอนไซม์นั้น เอนไซม์เซลลูเลสสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่ pH อยู่ในช่วง 4-5 และเอนไซม์แลคเคสสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่ pH อยู่ในช่วง 3.5-7)

4. ในระหว่างการตีกระจายเยื่อจะมีการหยุดเครื่องทุกๆ 5 นาที เพื่อทำการคนเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อเพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษเกาะกันเป็นก้อน แต่หลังจากการตีกระจายเยื่อผ่านไป 30 นาทีแล้ว จะไม่มีการหยุดเครื่องและทำการตีกระจายเยื่อไปจนครบ 60 นาที จากนั้นทำการเติมน้ำลงไป 1 ลิตร และปรับอุณหภูมิของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 90 ^{O}C ลดอัตราความเร็วในการตีกระจายเยื่อของเครื่องไปที่ 150 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อถึง 90 ^{O}C แล้ว ทำการหยุดเครื่อง แต่ยังคงตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90 ^{O}C ทิ้งไว้ 5 นาที (ทั้งนี้เพื่อเป็นการทำตามการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งมีการใช้เอนไซม์ที่เตรียมได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง 90 ^{O}C ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีนั้นเพื่อเป็นการหยุดการทำงานของเอนไซม์)

5. นำเยื่อที่ได้หลังจากขั้นตอนการตีกระจายเยื่อไปทำการเจือจางด้วยน้ำให้มีค่าความเข้มข้นของเยื่อเป็นร้อยละ 0.8 จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน

5.1 นำเยื่อส่วนที่ 1 (ไม่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออก) ไปวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 และวิเคราะห์คุณภาพเส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 g/m^2 นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น

ความขาวสว่าง (brightness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC) ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

5.2 นำเยื่อส่วนที่ 2 ไปเข้าสู่กระบวนการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ในเครื่องลอยฟองอากาศเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้วมาทำการวิเคราะห์คุณภาพของเยื่อหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออก โดยคำนวณหาปริมาณผลผลิต (%yield) ที่ได้ จากนั้นนำเยื่อหลังการกำจัดหมึกออกมาหาค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 และวิเคราะห์คุณภาพเส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065

นำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 g/m^2 จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง (brightness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC) ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

6. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) จากนั้นนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติต่อไป

7. ทำการทดลองอีกครั้งโดยใช้สภาวะการตีกระจายเยื่อและการกำจัดหมึกเหมือนกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น หากแต่ระยะเวลาในการพักเยื่อจาก 0 นาที จะกลายเป็น 30 นาที (ตารางที่ 3-1) คือ เมื่อตีกระจายเยื่อจนครบ 60 นาทีแล้ว แล้วจะพักเยื่อทิ้งไว้ 3 นาที สลับกับการกวนเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อ 2 นาที จนครบเวลา 30 นาที ก่อนที่จะนำเยื่อไปกำจัดหมึกออก (ทั้งนี้เป็นการทำตามการทดลองที่ใช้เอนไซม์ เนื่องจากเวลา 60 นาที อาจไม่เพียงพอให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับเยื่อ แต่หากทำการตีกระจายเยื่อต่อเนื่องไปอีก 30 นาที เส้นใยอาจถูกแรงกลในเครื่องตีกระจายเยื่อทำลายได้) หลังจากนั้นเติมน้ำลงไป 1 ลิตร และปรับอุณหภูมิของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 90 ^{O}C ลดอัตราความเร็วในการตีกระจายเยื่อของเครื่องไปที่ 150 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อถึง 90 ^{O}C แล้ว ทำการหยุดเครื่อง แต่ยังคงตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90 ^{O}C ทิ้งไว้ 5 นาที

(ทั้งนี้เพื่อเป็นการทำตามการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งมีการใช้เอนไซม์ที่เตรียมได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง 90 ^{O}C ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีนั้น เพื่อเป็นการหยุดการทำงานของเอนไซม์)

8. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) จากนั้นนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติต่อไป

ตารางที่ 3-1 การออกแบบการทดลองส่วนที่ 1

ตัวแปร	ระดับ	
เวลาในการพักเยื่อ (หลังตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 60 นาที)	0 นาที	30 นาที

3.2.3 การทดลองส่วนที่ 2: ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้

1. นำกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ออฟเซต โดยมีการตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณหมึกพิมพ์เท่ากันทุกแผ่นและผ่านการเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะอย่างน้อย 1 เดือน ก่อนที่จะนำมาทำการทดลอง มาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 นิ้ว x 1 นิ้ว แล้วนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัวและง่ายต่อการตีกระจายให้เป็นเยื่อ

2. เมื่อครบเวลาในการแช่กระดาษ นำกระดาษมาทำการตีกระจายให้เป็นเยื่อเพื่อให้อนุภาคของหมึกแยกออกจากตัวเส้นใย โดยใช้ความเข้มข้นของเยื่อ (pulp consistency) ในการตีกระจายเยื่อร้อยละ 6 ทำการใส่สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (non-ionic surfactant) Eka RF 4283 ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เจือจางที่ความเข้มข้น 5% (เพื่อใช้ในการปรับ pH ให้ได้ค่าเท่ากับ 5.5±0.2) โดยในการทดลองส่วนที่ 2 นี้จะมีการใส่เอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อด้วย โดยใช้ปริมาณร้อยละ 0.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการใช้เซลลูเลสและแลกเคสในการกำจัดหมึกออก โดยคำนึงถึงระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (reaction time) หลังการตีกระจายเยื่อด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3-2

3. ทำการตีกระจายเยื่อโดยใช้ความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อของเครื่อง 300 รอบต่อนาที เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C และที่ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 5.5±0.2 (กำหนดใช้ค่า pH เท่ากับ 5.5±0.2 เนื่องจากในการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งมีการใช้เอนไซม์นั้น เอนไซม์เซลลูเลสสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่ pH อยู่ในช่วง 4-5 และเอนไซม์แลคเคสสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่ pH อยู่ในช่วง 3.5-7)

ตารางที่ 3-2 การออกแบบการทดลองส่วนที่ 2 เพื่อหาระยะเวลาการพักเยื่อที่เหมาะสม

สภาวะ	เวลาในการพักเยื่อหลังตีกระจายเยื่อ (นาที)	ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง)
1	0	0.2	0
2	30	0.2	0
3	0	0	0.2
4	30	0	0.2

4. ในระหว่างการตีกระจายเยื่อจะมีการหยุดเครื่องทุกๆ 5 นาที เพื่อทำการคนเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อเพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษเกาะกันเป็นก้อน แต่หลังจากการตีกระจายเยื่อผ่านไป 30 นาทีแล้ว จะไม่มีการหยุดเครื่องและทำการตีกระจายเยื่อไปจนครบ 60 นาที จากนั้นทำการเติมน้ำลงไป 1 ลิตร และปรับอุณหภูมิของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 90 ^{O}C ลดอัตราความเร็วในการตีกระจายเยื่อของเครื่องไปที่ 150 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อถึง 90 ^{O}C แล้ว ทำการหยุดเครื่อง แต่ยังคงตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90 ^{O}C ทิ้งไว้ 5 นาที โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง 90 ^{O}C ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีนั้น เพื่อเป็นการหยุดการทำงานของเอนไซม์

5. นำเยื่อที่ได้หลังจากขั้นตอนการตีกระจายเยื่อไปทำการเจือจางด้วยน้ำให้มีค่าความเข้มข้นของเยื่อเป็นร้อยละ 0.8 จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน

5.1 นำเยื่อส่วนที่ 1 (ไม่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออก) ไปวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 และวิเคราะห์คุณภาพเส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 g/m^2 นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง (brightness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC) ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

5.2 นำเยื่อส่วนที่ 2 ไปเข้าสู่กระบวนการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ในเครื่องลอยฟองอากาศเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ใช้

เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้วมาทำการวิเคราะห์คุณภาพของเยื่อหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออก โดยคำนวณหาปริมาณผลผลิต (%yield) ที่ได้ จากนั้นนำเยื่อหลังการกำจัดหมึกออกมาหาค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 และวิเคราะห์คุณภาพเส้นใย (FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065

นำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 g/m^2 จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง (brightness) ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC) ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

6. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) จากนั้นนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติต่อไป

7. ทำการทดลองอีกครั้งโดยใช้สภาวะการตีกระจายเยื่อและการกำจัดหมึกเหมือนกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น หากแต่ระยะเวลาในการพักเยื่อจาก 0 นาที จะกลายเป็น 30 นาที คือ เมื่อตีกระจายเยื่อจนครบ 60 นาทีแล้ว แล้วจะพักเยื่อทิ้งไว้ 3 นาที สลับกับการกวนเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อ 2 นาที จนครบเวลา 30 นาที ก่อนที่จะนำเยื่อไปกำจัดหมึกออก หลังจากนั้นเติมน้ำลงไป 1 ลิตร และปรับอุณหภูมิของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 90 ^{O}C ลดอัตราความเร็วในการตีกระจายเยื่อของเครื่องไปที่ 150 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อถึง 90 ^{O}C แล้ว ทำการหยุดเครื่อง แต่ยังคงตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90 ^{O}C ทิ้งไว้ 5 นาที โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง 90 ^{O}C ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีนั้น เพื่อเป็นการหยุดการทำงานของเอนไซม์

8. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) จากนั้นนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติต่อไป

9. นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับการทดลองควบคุมและนำมาวิเคราะห์หาค่าระยะเวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ซึ่งจะเป็นการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ซึ่งจากตารางที่ 3-3 จะเห็นได้ว่าการทดลองที่เพิ่มขึ้นมา คือ การทดลองในสภาวะที่ 3 ถึงสภาวะที่ 6 เนื่องจากสภาวะที่ 1 และ 2 นั้นได้ทำการทดลองไปก่อนหน้านี้แล้ว

ตารางที่ 3-3 สภาวะในการทดลองส่วนที่ 2 โดยมีการใช้ปริมาณและชนิดของเอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสในระดับต่างๆ

สภาวะ	ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	เวลาในการพักเยื่อหลังการตีกระจายเยื่อ (นาที)
1	0.20	0	เวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม
2	0	0.20	เวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม
3	0.15	0.05	เวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม
4	0.10	0.10	เวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม
5	0.05	0.15	เวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม
6	0.20	0.20	เวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสม

10. ทำการทดลองตีกระจายเยื่อและการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์สำหรับสภาวะที่ 3 ถึง สภาวะที่ 6 โดยใช้ภาวะในการตีกระจายเยื่อและการกำจัดหมึกเช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น หากแต่ใช้ปริมาณของเอนไซม์ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-3 และใช้ reaction time ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองก่อนหน้านี้

11. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งทุกสภาวะการทดลอง จากนั้นนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติด้วยเทคนิค ANOVA จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการทดลองควบคุม เพื่อดูประสิทธิภาพของเอนไซม์ทั้งสองตัวในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์

3.3 วิธีการทดสอบสมบัติของเยื่อกระดาษและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 ปริมาณผลผลิต (%yield)

ปริมาณผลผลิต คือ ปริมาณของเยื่อที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออก เนื่องจากในกระบวนการกำจัดหมึกออกนั้น มีโอกาสที่เส้นใยจะหลุดออกมากับอนุภาคหมึกด้วย ทำให้ปริมาณของเยื่อที่เหลืออยู่อาจลดลง ปริมาณผลผลิตที่ได้สามารถคำนวณจากปริมาณน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศและปริมาณน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาพร้อมหมึกจากเครื่องลอยฟองอากาศ โดยคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{Feed} - \text{Reject}}{\text{Feed}} \times 100$$

โดย Feed คือ น้ำหนักของน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ

Reject คือ น้ำหนักของน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาพร้อมหมึกจากเครื่องลอยฟองอากาศ

3.3.2 สภาพระบายได้ (freeness)

สภาพระบายได้ คือ ความสามารถในการระบายน้ำ (drainage) ของเยื่อ หรือการอุ้มน้ำของเยื่อ โดยการทดสอบจะทำตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 [44] มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness tester) แสดงในภาพที่ 3-3

ภาพที่ 3-3 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness tester)

โดยในการทดลองจะนำเยื่อทั้งส่วนก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาทำการทดสอบค่าสภาพระบายได้ ซึ่งหากเยื่อมีค่าสภาพระบายได้สูง แสดงว่าเยื่อนั้นจะอุ้มน้ำได้น้อยและสามารถ

ระบายน้ำออกมาได้มาก แต่ถ้าเยื่อนั้นมีค่าสภาพระบายได้ต่ำ แสดงว่าเยื่อนั้นจะอุ้มน้ำได้มากและสามารถระบายน้ำออกมาได้น้อย

3.3.3 **ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย** (fiber morphology)

นำเยื่อก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาวัดค่าความยาวของเส้นใย (fiber length) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ดรรชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดรรชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) ความกว้างของเส้นใย (width) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ดังแสดงในภาพที่ 3-4 ตามมาตรฐาน ISO 16065 [45] โดยในการวัดเส้นใยแต่ละครั้งจะวัดจำนวน 5000 เส้น และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์เส้นใยสามารถวัดเส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 0.07 มิลลิเมตรขึ้นไป ดังนั้นการรายงานผลความยาวของเส้นใยในการทดลองนี้จะรายงานผลความยาวของเส้นใยเฉลี่ยที่ได้เป็นแบบ LWW (mean length-weight weighted) คือ เป็นความยาวเฉลี่ยของเส้นใยที่ไม่นำความยาวของพวกเส้นใยขนาดเล็กมาคิดเฉลี่ยด้วย ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าความยาวเฉลี่ยที่เป็นเส้นใยโดยเฉพาะที่ได้จากการผลิตเยื่อจากกระดาษในภาวะต่างๆ ส่วนค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเป็นลักษณะที่สำคัญของเส้นใยซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษได้ โดยเส้นใยที่มีการโค้งงอและหักงอเพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลดีและผลเสียต่อสมบัติกระดาษดังต่อไปนี้ ผลดีคือ ทำให้กระดาษมีความฟู ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้น มีความยืดขณะเปียก มีความพรุนและการดูดซับดีขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของพวกกระดาษชำระ ส่วนผลเสียคือ ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งตึงลดลง ซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่เป็นที่ต้องการในการผลิตกระดาษที่ใช้ความเร็วในการเดินกระดาษสูง

ภาพที่ 3-4 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer; FQA)

3.3.4 **การขึ้นแผ่นทดสอบ** (handsheet)

นำเยื่อทั้งส่วนที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดหมึกออกมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบแบบ Rapid-Kothen (Rapid-Kothen sheet former) ตามมาตรฐานการขึ้นแผ่นทดสอบ ISO 5269/2-1980 [46] โดยที่ตัวเครื่องของขึ้นแผ่นทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ (sheet forming) และส่วนอบแห้ง (dryer) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 โดยมีขั้นตอนการขึ้นแผ่นทดสอบดังนี้

1. นำเยื่อมาปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อ ให้ได้ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น

2. คำนวณปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นให้ได้แผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข

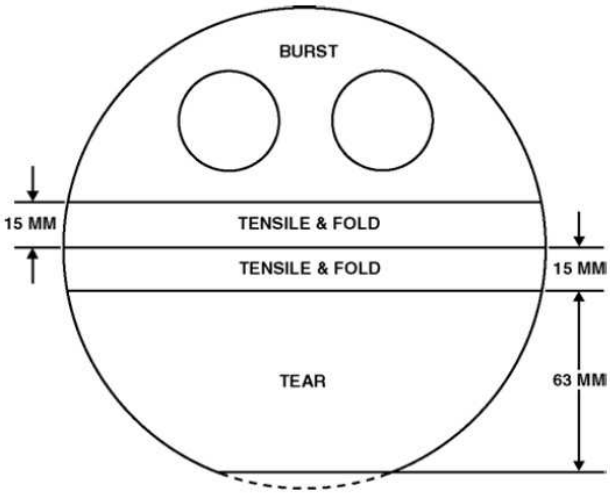
3. เทน้ำเยื่อที่คำนวณได้ลงในส่วนขึ้นแผ่นทดสอบ แล้วทำการระบายน้ำ (drainage) ออกซึ่งจะส่งผลให้เส้นใยเกิดการสานตัวกันกลายเป็นแผ่นทดสอบ โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นทดสอบวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร

4. นำแผ่นตัวอย่างที่ขึ้นแผ่นเรียบร้อยแล้วมาปิดประกบด้วยกระดาษที่ใช้ขึ้นแผ่น (blotting paper) แล้วนำมาอบแห้งในส่วนอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 7 นาที

ภาพที่ 3-5 เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (Rapid-Kothen sheet former)

3.3.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ISO (International Standard Organization) และ TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) โดยนำแผ่นทดสอบแต่ละภาวะมาทำการปรับสภาพในห้องควบคุมภาวะ หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบโดยไม่ทำให้แผ่นทดสอบเสียหาย (non-destructive test) ก่อน คือ สมบัติทั่วไปของกระดาษ (basic properties) เช่น น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) และสมบัติเชิงแสง (optical properties) คือ ความขาวสว่าง (brightness) และค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC) หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นตัวอย่างที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นทดสอบ (destructive test) คือ สมบัติในด้านความแข็งแรง (strength properties) ต่างๆ ดังนี้ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความต้านทานต่อแรงฉีก (tear resistance) โดยทำการตัดแผ่นทดสอบเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-6 หลังจากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่างๆ ไปคำนวณหาค่าดรรชนีความแข็งแรงนั้นๆ



ภาพที่ 3-6 ลักษณะของการตัดแผ่นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต่างๆ [47]

3.3.5.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight)

น้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนมากมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรืออาจเรียกว่าแกรม การหาน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษจะต้องมีการปรับสภาวะของกระดาษก่อน โดยการนำกระดาษมาเก็บในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (อุณหภูมิ 27±1 $^{\circ}$C ความชื้นสัมพัทธ์ 65±2% สำหรับประเทศเขตร้อน) เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นจะมีผลทำให้

น้ำหนักของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลจากการดูดหรือคายความชื้นของกระดาษตามสภาวะโดยรอบ [48] ทำการวัดโดยนำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนักแล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

3.3.5.2 **ความขาวสว่าง** (brightness)

ความขาวสว่างเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน 457 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับตัวกระจายแสงที่สมบูรณ์ (perfecting diffuser) ตามมาตรฐาน ISO 2469-I977 ความขาวสว่างเป็นสมบัติทางกายภาพโดยแท้จึงไม่สามารถบ่งบอกลักษณะที่เกี่ยวข้องกับสีได้ ค่าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับการกระเจิงแสง (light scattering) ของเยื่อกระดาษเท่านั้น ฉะนั้นความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์เฉพาะในการระบุสมบัติการฟอกเยื่อหรือสมบัติการกำจัดหมึกออกจากเยื่อเท่านั้น สาเหตุที่เลือกใช้ช่วงแสงสีน้ำเงินในการวัดค่าความขาวสว่างนั้นเป็นเพราะตามนุษย์และทางด้านจิตวิทยานั้นชอบสีน้ำเงินมากกว่าสีอื่นๆ เมื่อสิ่งของเริ่มเก่ามักมีสีเหลืองปนในสีเดิม ดังนั้นสีน้ำเงินที่เป็นคู่สีตรงข้ามของสีเหลืองที่แสดงถึงความใหม่จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่ไม่ได้ฟอกสี (unbleached paper) มีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล และการฟอกเยื่อ (bleaching) ก็คือการเพิ่มสีน้ำเงินให้กับกระดาษนั่นเอง เมื่อเก็บกระดาษเป็นเวลานานจะเกิดการเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ (brightness reversion) โดยอาจเกิดจากปัจจัยทางเคมีในตัวเยื่อเองและปัจจัยทางด้านกายภาพภายนอก เช่น ความชื้นและความร้อน เป็นต้น

นำแผ่นทดสอบที่ได้ทั้งจากเยื่อส่วนที่ผ่านและไม่ผ่านการกำจัดหมึกออกมาทำการวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง Technidyne color touch PC ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 [49] ทำการวัดค่าทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทดสอบ โดยทำการวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง วัดทั้งในแบบที่มีแผ่นทดสอบชนิดเดียวกันรองด้านหลังหลายแผ่น และแบบที่รองด้านหลังแผ่นทดสอบด้วยวัตถุสีดำ

3.3.5.3 **ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่** (effective residual ink concentration;ERIC)

ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ หากมีค่ามากแสดงว่า มีปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อมาก ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการวัดการสะท้อนแสงในช่วงอินฟาเรดที่ความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของหมึกจะมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเส้นใยและองค์ประกอบอื่นๆ ในการวัดค่าปริมาณของหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่ จะทำการวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง Technidyne color touch PC ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ตามมาตรฐาน TAPPI T567 om-04 [50] โดยใช้ทฤษฎี Kubellka-Munk ใน

การวัดจะทำการวัดค่าทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทดสอบ โดยวัดด้านละ 5 ตำแหน่ง วัดทั้งในแบบที่มีแผ่นทดสอบชนิดเดียวกันรองด้านหลังหลายแผ่น และแบบที่รองด้านหลังแผ่นทดสอบด้วยวัตถุสีดำ

ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ (Color touch PC)

3.3.5.4 **ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง** (tensile index)

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึงโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง จึงต้องใช้แรงดึงสูง ในการทดลองจะนำแผ่นทดสอบที่ได้ทั้งก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 3-8 ตามมาตรฐานของ TAPPI T494 om-01 [51] โดยในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยใช้สูตร

$$\text{Tensile index} = \frac{\text{Tensile strength}}{\text{Basis weight}}$$

โดยค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น Nm/g

ภาพที่ 3-8 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength tester)

3.3.5.5 **ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ** (burst strength)

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระทำต่อผิวหน้ากระดาษในแนวตั้งฉากที่กระดาษทนได้ก่อนที่แผ่นทดสอบจะเกิดการขาดทะลุจากยางไดอะแฟรม (rebber diaphragm) ที่บวมขึ้นมาเนื่องจากแรงดันข้างใต้กระดาษ โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูง จึงต้องใช้แรงดันทะลุสูง ในการทดลองจะนำแผ่นทดสอบทั้งก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาทำการวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดังแสดงในภาพที่ 3-9 ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 [52] โดยในแต่ละภาวะทำการทดสอบแผ่นชิ้นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 จุด จุดหนึ่งทำการวัดชิ้นทดสอบด้านตะแกงลวดขึ้นแผ่น (wire size) อีกจุดหนึ่งทำการวัดด้านผ้าสักหลาด (felt size) จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่ได้มาคำนวณหาค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) โดยใช้สูตร

$$\text{Burst index} = \frac{\text{Burst strength}}{\text{Basis weight}}$$

โดยค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีหน่วยเป็น kPa m^2/g

ภาพที่ 3-9 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength tester)

3.3.5.6 **ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก** (tear resistance)

ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก คือ ความสามารถของแผ่นทดสอบที่จะต้านแรงที่ใช้ในการฉีกแผ่นทดสอบต่อจากแนวตัดเริ่มต้นโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่ากระดาษมีความต้านทานแรงฉีกสูง จึงต้องใช้แรงฉีกสูง นำแผ่นทดสอบที่ได้จากก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีกดังแสดงในภาพที่ 3-10 โดยใช้วิธีแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [53] ในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นชิ้นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แต่ละแผ่นสามารถนำมาหาค่าความต้านทานแรงฉีกได้ 2 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการวัด 1 จุด จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index) ดังนี้

$$\text{Tear index} = \frac{\text{Tear strength}}{\text{Basis weight}}$$

โดยค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกมีหน่วยเป็น mN m^2/g

ภาพที่ 3-10 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Elmendolf tearing resistance tester)

3.3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศที่เป็นการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม) และการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่เตรียมได้ มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ และชนิดของเอนไซม์ ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออก ซึ่งได้แก่ ค่าร้อยละผลผลิตเยื่อ ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย รวมถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าความแข็งแรงต่างๆ รวมทั้งค่าสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงที่ทำการศึกษานั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน โดยตอนแรกจะนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองควบคุมมาเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ซึ่งจากการวิเคราะห์เอนไซม์ที่ผลิตได้พบว่า เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* มีปริมาณแอคติวิตี (activity) 1.23 Unit/g และแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* มีปริมาณแอคติวิตี 1.32 Unit/g ทั้งนี้เพื่อดูอิทธิพลของการใช้เอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อ (reaction time) หลังการตีกระจายเยื่อที่มีต่อประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออกจากหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและเพื่อเลือกระยะเวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป และในส่วนของตอนที่ 2 นั้น จะเป็นการเปรียบเทียบการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดในปริมาณต่างๆ รวมถึงเปรียบเทียบกับการทดลองควบคุม หากแต่ใช้ระยะเวลาในการพักเยื่อเพียงค่าเดียว

4.1 ผลของการใช้เอนไซม์และระยะเวลาในการพักเยื่อ (การวิเคราะห์ผลตอนที่ 1)

ในส่วนนี้จะนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองควบคุมมาเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที (ดังแสดงในตารางที่ 4-1) ทั้งนี้เพื่อดูอิทธิพลของการใช้เอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อ (reaction time) หลังการตีกระจายเยื่อที่มีต่อประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออกจากหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยพิจารณาจากปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้ ค่าสภาพระบายได้ รวมถึงทดสอบสมบัติเชิงแสง คือ หาค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อและค่าความขาวสว่าง อีกทั้งวัดสมบัติทางด้านความแข็งแรง ได้แก่ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก ซึ่งผลที่ได้จากการวิคราะห์ดังกล่าวจะนำมาพิจารณาเพื่อเลือกระยะเวลาในการพักเยื่อที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

นอกจากนี้ยังนำผลการทดลองที่ได้จากสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษหลังการกำจัดหมึกออกแล้วไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อดูว่าการใช้เอนไซม์และระยะเวลาในการพักเยื่อ (reaction time) มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและมีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษหลังจากการกำจัดหมึกออกแล้วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่และอย่างไร สำหรับ

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิตินั้นจะใช้เทคนิค ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้ค่า P-value อ้างอิงกับที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ (α=0.05) ในการพิจารณานั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า P-value และ ค่า F_{cal} กล่าวคือ ถ้าค่า P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และหากค่า F_{cal} (ค่า F ที่คำนวณได้) นั้นมีค่ามากกว่าค่า F_{crit} (ค่า F ที่ได้จากตาราง) แสดงว่าผลของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษนั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ในการพิจารณาผลวิเคราะห์ที่ได้จากสถิตินั้นจะพิจารณาผลจากตัวแปรหลักก่อน ซึ่งตัวแปรหลักในที่นี้คือ ชนิดการทดลอง (การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และการทดลองที่ใช้แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) และระยะเวลาพักเยื่อเพื่อให้เอนไซม์ได้ทำปฏิกิริยา (0 และ 30 นาที) จากนั้นต้องพิจารณาผลจากตัวแปรปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างตัวแปรหลักสองตัวนี้ด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากตัวแปรหลักไม่มีผลต่อสมบัติที่พิจารณาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแล้ว ตัวแปรปฏิสัมพันธ์ก็จะไม่มีผลต่อสมบัติที่พิจารณาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย

ตารางที่ 4-1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1

ชนิดการทดลอง	เวลาในการพักเยื่อ (reaction time)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม)	0 นาที
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม)	30 นาที
การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง	0 นาที
การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง	30 นาที
การทดลองที่ใช้แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง	0 นาที
การทดลองที่ใช้แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง	30 นาที

ตารางที่ 4-2 แสดงผลของการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกที่ได้สำหรับการทดลองควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที

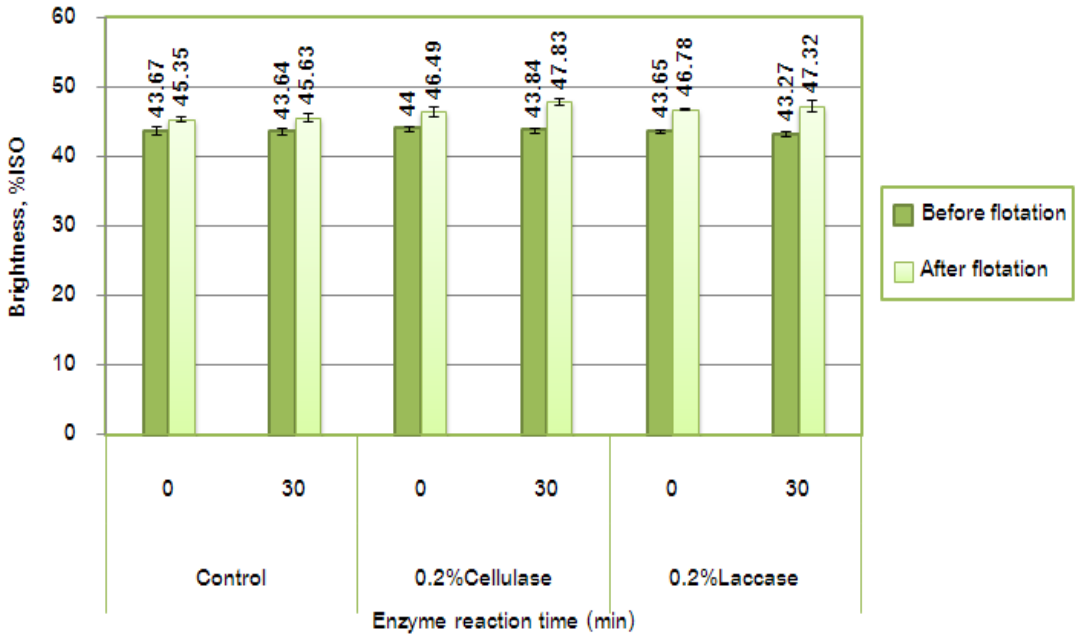
สมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ	ชนิดการทดลอง (treatment)			เวลาในการพักเยื่อ (reaction time)			Interaction		
	F_{cal}	P-value	F_{crit}	F_{cal}	P-value	F_{crit}	F_{cal}	P-value	F_{crit}
1. ความขาวสว่าง	58.829020	2.745×10^{-14}*	3.168245	26.234988	0.000004*	4.019540	5.199646	0.008606*	3.168245
2. ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	36.283823	1.027×10^{-10}*	3.168245	0.890866	0.349446	4.019540	0.313448	0.732243	3.168245
3. ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	2.722056	0.074763	3.168245	2.812870	0.099291	4.019540	1.131405	0.330105	3.168245
4. ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	11.845625	0.000054*	3.168245	3.679432	0.060381	4.019540	2.349987	0.105052	3.168245
5. ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก	1.551255	0.221279	3.168245	0.596778	0.443178	4.019540	1.317611	0.276244	3.168245
6. สภาพระบายได้ของเยื่อ	1.718905	0.256944	5.143252	3.980099	0.093066	5.987377	0.256218	0.782029	5.143252
7. ผลผลิตเยื่อ	0.916546	0.449421	5.143252	0.933511	0.371265	5.987377	0.671055	0.545746	5.143252

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05 และ $F_{cal} > F_{crit}$) และ interaction คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร คือ การทดลอง และระยะเวลาในการพักเยื่อ

4.1.1 **ความขาวสว่าง** (brightness)

ตารางที่ 4-3 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อความขาวสว่าง

การทดลอง	ความขาวสว่างก่อนกำจัดหมึกออก (%)	ความขาวสว่างหลังกำจัดหมึกออก (%)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	43.67 ± 0.62	45.35 ± 0.39
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	43.64 ± 0.55	45.63 ± 0.63
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	44.00 ± 0.44	46.49 ± 0.65
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	43.84 ± 0.37	47.83 ± 0.50
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	43.65 ± 0.28	46.78 ± 0.12
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	43.27 ± 0.37	47.32 ± 0.73



ภาพที่ 4-1 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-1 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าความขาวสว่าง

ของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอนุภาคของหมึกที่หลุดออกมาจากผิวหน้าของเส้นใยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อจะไปเกาะติดกับฟองอากาศแล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกต่อไป

เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาหลังการตีกระจายเยื่อที่มีต่อค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความขาวสว่างหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาพักเยื่อจาก 0 นาทีเป็น 30 นาที ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึกออกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกสภาวะการทดลอง ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าในการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์นั้นการคนเยื่อเป็นพักๆ ในช่วงเวลาพักเยื่อที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคของหมึกหลุดออกจากผิวหน้าของเส้นใยมากขึ้น หมึกจึงถูกกำจัดออกไปมากขึ้น ส่วนการทดลองที่ใช้เอนไซม์นั้นเมื่อทิ้งเยื่อให้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์นานขึ้น เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้นทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์มีต่อค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศ พบว่าการใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ทั้งกรณีพักเยื่อทิ้งไว้ 0 นาที และ 30 นาที โดยเซลลูเลสมีแนวโน้มให้ผลการทดลองดีกว่าแลกเคส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเซลลูเลสมีบทบาทในการช่วยกำจัดหมึกออกจากผิวหน้าของเส้นใยมากกว่าแลกเคส เพราะเซลลูเลสจะไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเส้นใย ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยของเส้นใย

เมื่อนำค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factors โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่าเอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ค่า P-value เท่ากับ 2.745×10^{-14} และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 58.829020) และเวลาในการพักเยื่อส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-value เท่ากับ 0.000004 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 26.234988) รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.008606 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 5.199646)

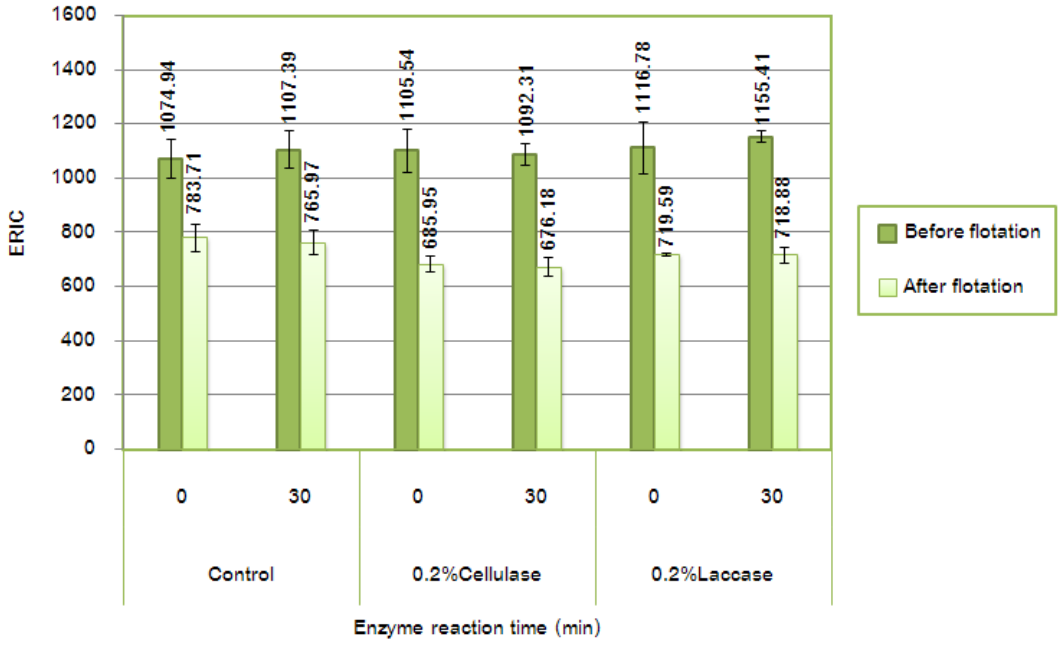
4.1.2 **ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่** (effective residual ink concentration; ERIC)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-2 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าต่ำกว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคของหมึกที่ถูกตีกระจายออกจากผิวหน้าของเส้นใยไปเกาะติดกับฟองอากาศและถูกกำจัดออกพร้อมกับฟองอากาศในที่สุด

ตารางที่ 4-4 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

การทดลอง	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก่อนกำจัดหมึกออก	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังกำจัดหมึกออก
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	1074.94 ± 70.25	783.71 ± 49.64
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	1107.39 ± 69.77	765.97 ± 43.63
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	1105.54 ± 80.39	685.95 ± 28.22
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	1092.31 ± 39.74	676.18 ± 32.99
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	1116.78 ± 95.81	719.59 ± 5.80
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	1155.41 ± 20.22	718.88 ± 29.21

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาหลังการตีกระจายเยื่อที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า ระยะเวลาพักเยื่อที่นานขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อมีแนวโน้มลดลงทุกสภาวะการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองที่ใช้เอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสเปรียบเทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ที่ระยะเวลาพักเยื่อ 0 นาทีและ 30 นาที พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง โดยเซลลูเลสมีแนวโน้มให้ผลการทดลองดีกว่าแลกเคส ทั้งนี้เนื่องจากหมึกถูกกำจัดออกมากขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายแล้วข้างต้นในกรณีของความขาวสว่าง



ภาพที่ 4-2 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

เมื่อนำค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factors โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า เอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ค่า P-value เท่ากับ 1.027×10^{-10} และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 36.283823) หากแต่เวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-value เท่ากับ 0.349446 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.890866) รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.732243 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.313448)

4.1.3 **ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง** (tensile index)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-3 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยที่มีขนาดสั้นถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในระหว่างการลอยฟองอากาศ จึงทำให้เยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้วเหลือเส้นใยยาวอยู่เป็นจำนวนมาก โดยปกติแล้วเส้นใยยาวมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยสั้น และเส้นใยยาวยังสามารถสร้างพันธะระหว่างเส้นใยได้มากกว่าเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้หลังจากการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้น

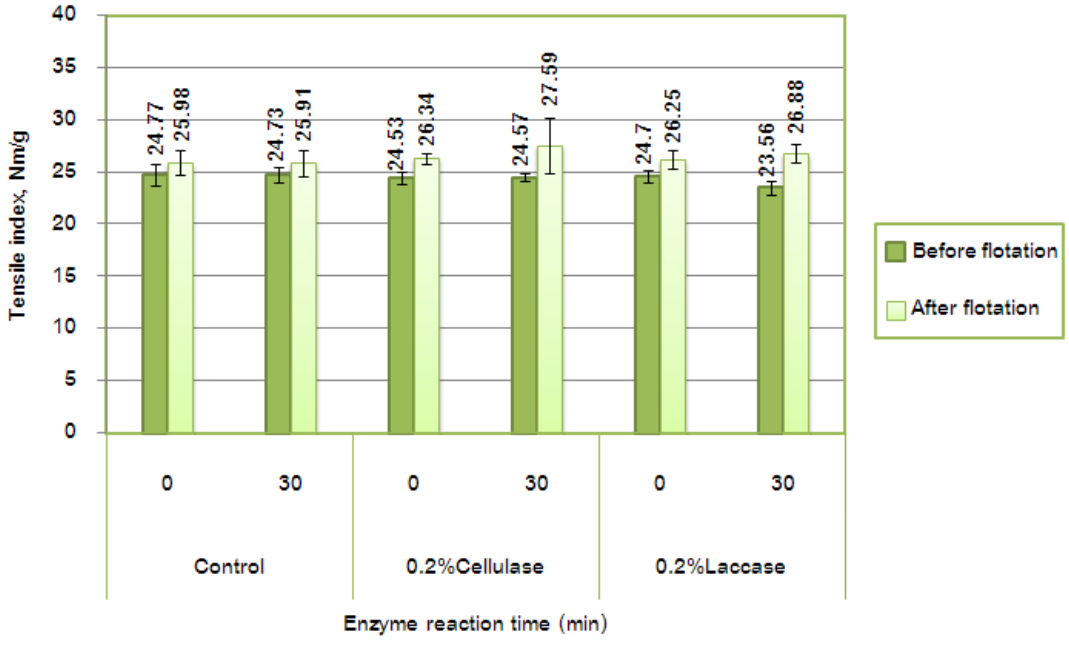
ตารางที่ 4-5 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

การทดลอง	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนกำจัดหมึกออก (Nm/g)	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังกำจัดหมึกออก (Nm/g)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	24.77 ± 1.09	25.98 ± 1.17
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	24.73 ± 0.73	25.91 ± 1.25
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	24.53 ± 0.56	26.34 ± 0.56
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	24.57 ± 0.35	27.59 ± 2.62
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	24.70 ± 0.59	26.25 ± 0.86
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	23.56 ± 0.68	26.88 ± 0.87

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาหลังการตีกระจายเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า ระยะเวลาพักเยื่อที่ 30 นาที มีแนวโน้มส่งผลให้เยื่อมีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเฉพาะในกรณีการทดลองที่ใช้

เอนไซม์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อให้เวลากับเอนไซม์ในการทำปฏิกิริยากับเส้นใยนานขึ้น เส้นใยสั้นและเส้นใยขนาดเล็กในระบบมีแนวโน้มถูกกำจัดออกมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยสั้นมีพื้นที่ผิวให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยามากกว่าเส้นใยยาว ในระบบจึงมีเส้นใยสั้นน้อยลงและมีเส้นใยยาวมากขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจึงเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ควรระวังไม่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับเส้นใยนานจนเกินไป เพราะที่สุดแล้วเอนไซม์อาจจะไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยยาว และส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลงได้เช่นกัน จากการทดลองยังพบว่าการพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อการทดลองควบคุม เนื่องจากเป็นการทดลองที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ทำให้ไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ทั้งกรณีพักเยื่อทิ้ง 0 นาที และ 30 นาที โดยเซลลูเลสมีแนวโน้มให้ผลการทดลองดีกว่าแลกเคส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเซลลูเลสจะไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเส้นใย ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยของเส้นใย เซลลูเลสจึงมีบทบาทในการเข้าไปทำลายเส้นใยสั้นหรือเส้นใยขนาดเล็กมากกว่าแลกเคส ส่งผลให้เหลือเส้นใยยาวในระบบมาก ความแข็งแรงของแผ่นทดสอบจึงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-3 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factors โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า เอนไซม์ทั้งสองชนิดและเวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ค่า P-value ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อเท่ากับ 0.074763 และ 0.099291 ตามลำดับ ส่วนค่า F_{cal} ที่คำนวณได้ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อมีค่าเท่ากับ 2.722056 และ 2.812870 ตามลำดับ) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.330105 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.131405)

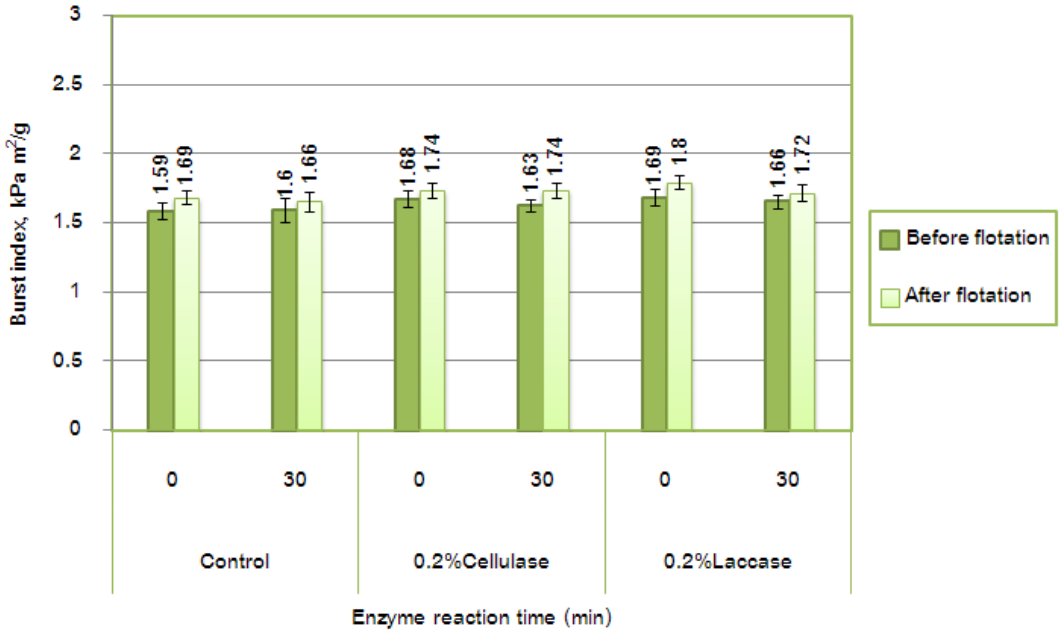
4.1.4 **ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ** (burst index)

ตารางที่ 4-6 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

การทดลอง	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุก่อนกำจัดหมึกออก (kPa m^2/g)	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุหลังกำจัดหมึกออก (kPa m^2/g)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	1.59 ± 0.06	1.69 ± 0.05
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	1.60 ± 0.09	1.66 ± 0.07
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	1.68 ± 0.06	1.74 ± 0.06
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	1.63 ±0.04	1.74 ± 0.06
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	1.69 ± 0.06	1.80 ± 0.05
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	1.66 ± 0.05	1.72 ± 0.06

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-4 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่า

จะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลอยฟองอากาศนั้นอาจทำให้เส้นใยที่มีขนาดสั้นหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศและอนุภาคหมึกในระหว่างการลอยฟองอากาศ ทำให้เหลือเส้นใยยาวอยู่มาก จึงส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้หลังจากการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงขึ้น ดังเหตุผลเดียวกับที่อธิบายไปแล้วข้างต้นในกรณีของดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง



ภาพที่ 4-4 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้เพื่อให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า เวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากนักในทุกกรณี (ในกรณีของการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ ค่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่เวลาพักเยื่อ 0 นาที และ 30 นาที เท่ากับ 1.69 kPa m^2/g และ 1.66 kPa m^2/g ตามลำดับ ในกรณีของการใช้เซลลูเลสที่เวลาพักเยื่อ 0 นาที และ 30 นาที ต่างมีค่าเท่ากับ 1.74 kPa m^2/g และในกรณีของการใช้แลกเคสที่เวลาพักเยื่อ 0 นาที และ 30 นาที เท่ากับ 1.80 kPa m^2/g เปรียบเทียบกับ 1.72 kPa m^2/g) ซึ่งผลที่ได้แตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ว่าผลของความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุควรมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง

เนื่องจากความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใยเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม อาจเป็นไปได้ว่าระยะเวลาที่เลือกใช้ในการทดลองอาจอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม จึงทำให้เห็นผลของระยะเวลาการพักเยื่อต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุไม่ชัดเจนนัก

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพียงเล็กน้อย โดยการใช้เอนไซม์มีแนวโน้มทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (ในกรณีของเวลาพักเยื่อเท่ากับ 0 นาที ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของการทดลองควบคุม การทดลองที่ใช้เซลลูเลส และการทดลองที่ใช้แลกเคส เท่ากับ 1.69 kPa m^2/g, 1.74 kPa m^2/g และ 1.80 kPa m^2/g ตามลำดับ ส่วนในกรณีของเวลาพักเยื่อเท่ากับ 30 นาที ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของการทดลองควบคุม การทดลองที่ใช้เซลลูเลส และการทดลองที่ใช้แลกเคส เท่ากับ 1.66 kPa m^2/g, 1.74 kPa m^2/g และ 1.72 kPa m^2/g ตามลำดับ) ทั้งนี้เป็นเพราะเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นในกรณีของดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

เมื่อนำค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factor โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า เอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ค่า P-value เท่ากับ 0.000054 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 11.845625) หากแต่เวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-value เท่ากับ 0.060381 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 3.679432) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.105052 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 2.349987)

4.1.5 **ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก** (tear index)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-7 และภาพที่ 4-5 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่น

ทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากการลอยฟองอากาศนั้นทำให้เส้นใยขนาดสั้นบางส่วนอาจถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศด้วย จึงส่งผลให้เหลือเส้นใยยาวอยู่มากในระบบหลังการลอยฟองอากาศ โดยปกติแล้วสำหรับค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกนั้นเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใย โดยอิทธิพลของความแข็งแรงของเส้นใยจะมีผลสูงกว่าพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยยาวมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยสั้น เมื่อเยื่อในระบบเหลือเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยสั้น แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น

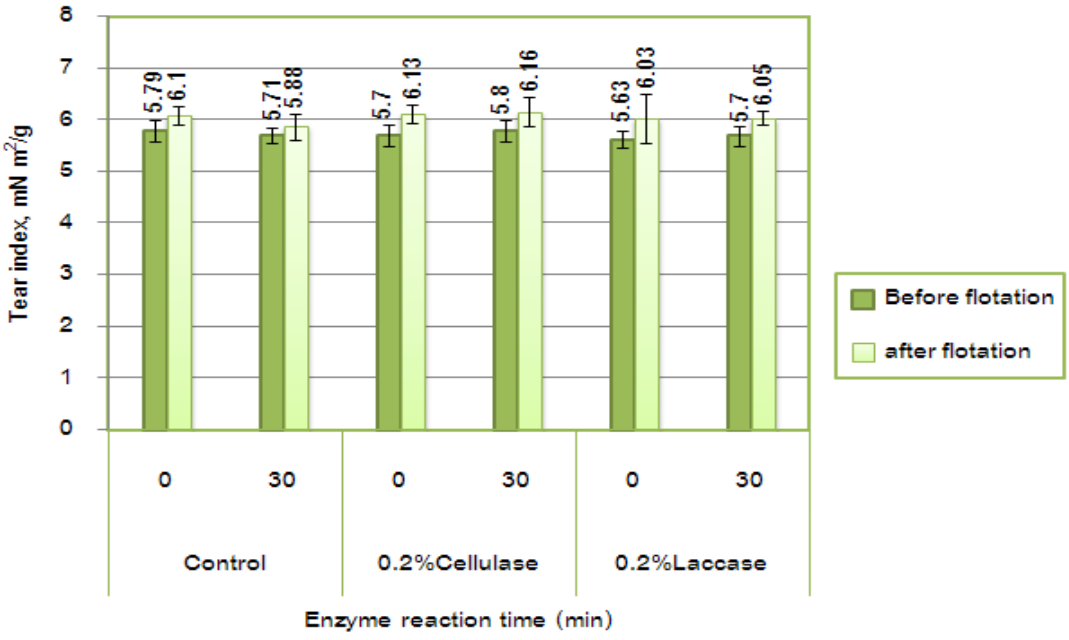
ตารางที่ 4-7 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อดรรชนีความต้านทานแรงฉีก

การทดลอง	ดรรชนีความต้านทานแรงฉีกก่อนกำจัดหมึกออก ($kPa\ m^2/g$)	ดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังกำจัดหมึกออก ($kPa\ m^2/g$)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	5.79 ± 0.21	6.10 ± 0.17
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	5.71 ± 0.16	5.88 ± 0.26
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	5.70 ± 0.21	6.13 ± 0.18
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	5.80 ± 0.22	6.16 ± 0.28
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	5.63 ± 0.17	6.03 ± 0.47
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	5.70 ± 0.19	6.05 ± 0.13

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้เพื่อให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า เวลาพักเยื่อที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกในกรณีของการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ โดยทำให้ค่าที่ได้ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเวลาในการพักเยื่อที่นานขึ้น ส่งผลให้เยื่อมีขนาดสั้นลงได้ เนื่องจากมีการคนเยื่อเป็นระยะๆ จึงอาจส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกลดลงได้ ในส่วนของการทดลองที่ใช้เอนไซม์นั้นส่งผลให้เยื่อมีค่า

ดรรชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อพักเยื่อให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากเส้นใยสั้นมีพื้นที่ผิวให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยามากกว่าเส้นใยยาว ในระบบจึงมีเส้นใยสั้นน้อยลงและมีเส้นใยยาวมากขึ้น ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจึงเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ควรระวังไม่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับเส้นใยนานจนเกินไป เพราะที่สุดแล้วเอนไซม์อาจจะไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยยาว และส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลงได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาผลของการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก พบว่า การใช้เอนไซม์มีแนวโน้มทำให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ โดยเซลลูเลสให้ผลค่อนข้างดีกว่าแลกเคส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเซลลูเลสจะไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเส้นใย ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยของเส้นใย เซลลูเลสจึงมีบทบาทในการเข้าไปทำลายเส้นใยสั้นหรือเส้นใยขนาดเล็กมากกว่าแลกเคส ส่งผลให้เหลือเส้นใยยาวในระบบมาก ความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-5 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factors โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า เอนไซม์ทั้งสองชนิดและเวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อย

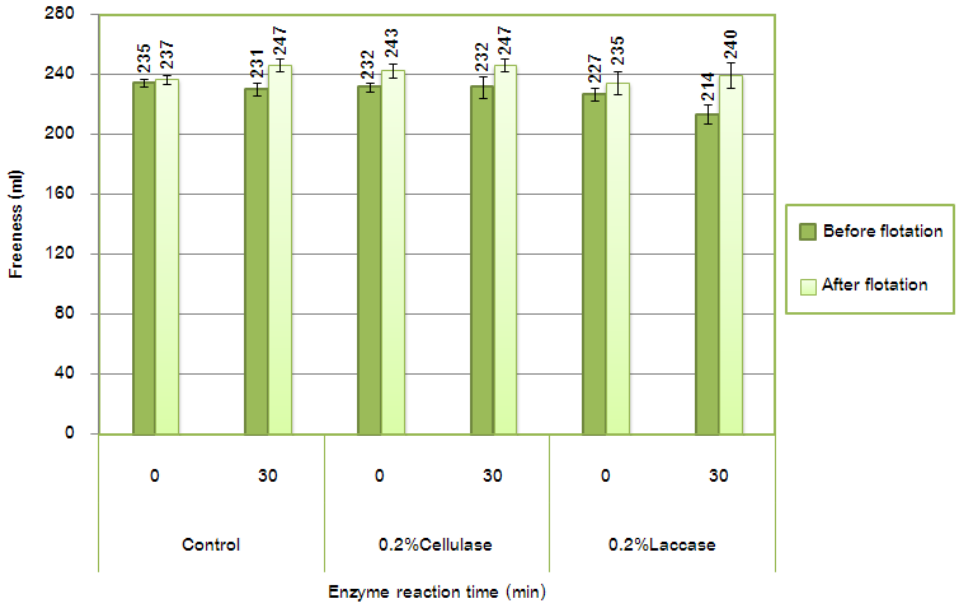
ละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ค่า P-value ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อเท่ากับ 0.221279 และ 0.443178 ตามลำดับ ส่วนค่า F_{cal} ที่คำนวณได้ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อมีค่าเท่ากับ 1.551255 และ 0.596778 ตามลำดับ) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.276244 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.317611)

4.1.6 *สภาพระบายได้ของเยื่อ* (freeness)

ตารางที่ 4-8 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ

การทดลอง	สภาพระบายได้ก่อนกำจัดหมึกออก (ml)	สภาพระบายได้หลังกำจัดหมึกออก (ml)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	235 ± 3	237 ± 3
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	231 ± 4	247 ± 4
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	232 ± 3	243 ± 5
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	232 ± 7	247 ± 4
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	227 ± 4	235 ± 8
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	214 ± 6	240 ± 8

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-6 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นเยื่อจากการทดลองควบคุม รวมถึงเยื่อจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากในการลอยฟองอากาศนั้นเส้นใยสั้นบางส่วนอาจเกาะติดกับฟองอากาศพร้อมกับอนุภาคหมึกแล้วถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ส่งผลให้เยื่อในระบบหลังการกำจัดหมึกออกมีเส้นใยยาวเหลืออยู่มากกว่าเส้นใยสั้น ซึ่งเส้นใยยาวมีพื้นที่ผิวในการอุ้มน้ำไว้น้อยกว่าเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้น้ำสามารถระบายออกได้มากกว่า ดังนั้นค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออกจึงมีค่าสูงกว่าก่อนการกำจัดหมึกออก



ภาพที่ 4-6 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่พักเยื่อและเอนไซม์ที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าสภาพระบายได้ของเยื่อที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า เวลาในการพักเยื่อที่เพิ่มขึ้นและการใช้เอนไซม์แทบไม่มีผลต่อค่าสภาพระบายได้ เนื่องจากค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศอยู่ในช่วง 235 ml ถึง 247 ml ซึ่งถือว่าแทบไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากการใช้เอนไซม์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์เซลลูเลสและการทิ้งเยื่อให้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์นานขึ้น เอนไซม์จะไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยขนาดสั้น ทำให้เยื่อในระบบเหลือเส้นใยยาวเป็นส่วนใหญ่ พื้นที่ผิวในการอุ้มน้ำของเส้นใยน้อยลง ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเพิ่มขึ้น [38] ส่วนในกรณีของแลกเคสนั้น การพักเยื่อทิ้งไว้ให้แลกเคสทำปฏิกิริยาอาจส่งผลทำให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อลดลงได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแลกเคสจะทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งลิกนินมีสภาพไม่ชอบน้ำ [20] เมื่อปริมาณลิกนินลดลง ทำให้เส้นใยมีความชอบน้ำมากขึ้น สามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น อาจส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อลดลง

เมื่อนำค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factor โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า เอนไซม์ทั้งสองชนิดและเวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้หลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่

คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ค่า P-value ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อเท่ากับ 0.256944 และ 0.093066 ตามลำดับ ส่วนค่า F_{cal} ที่คำนวณได้ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อมีค่าเท่ากับ 1.718905 และ 3.980099 ตามลำดับ) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ไม่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้หลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.782029 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.256218)

4.1.7 **ปริมาณผลผลิตของเยื่อ** (yield)

ตารางที่ 4-9 ผลของเอนไซม์และระยะเวลาพักเยื่อที่มีต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

การทดลอง	ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (%)
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 0 นาที	97.16 ± 1.68
การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ - 30 นาที	95.13 ± 1.23
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	95.02 ± 0.68
เซลลูเลส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	94.73 ± 0.18
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 0 นาที	95.23 ± 0.59
แลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง - 30 นาที	95.27 ± 2.43

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4-9 เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่พักเยื่อและเอนไซม์ที่มีต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้ พบว่า เวลาในการพักเยื่อที่เพิ่มขึ้นและการใช้เอนไซม์แทบไม่มีผลต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้ เนื่องจากค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้อยู่ในช่วง 94.73% ถึง 97.16% ซึ่งถือว่าแทบไม่แตกต่างกัน และเมื่อนำค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA: two factors โดยพิจารณาค่า P-value ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า เอนไซม์ทั้งสองชนิดและเวลาในการพักเยื่อไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ค่า P-value ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อเท่ากับ 0.449421 และ 0.371265 ตามลำดับ ส่วนค่า F_{cal} ที่คำนวณได้ของเอนไซม์และเวลาในการพักเยื่อมีค่าเท่ากับ 0.916546 และ 0.933511 ตามลำดับ) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดการทดลองและเวลาในการพักเยื่อก็ไม่ส่งผลต่อค่า

ปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน (ค่า P-value เท่ากับ 0.545746 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.671055)

จากผลการศึกษาในตอนที่ 1 นี้ ซึ่งศึกษาตัวแปรอันได้แก่ การใช้เอนไซม์และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ โดยทำการวิเคราะห์จากผลข้อมูลค่าความขาวสว่าง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ และปริมาณผลผลิตที่ได้ ทำให้สรุปได้ว่าเมื่อทิ้งเยื่อให้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์นานขึ้นส่งผลให้สมบัติด้านต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีแนวโน้มดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า P-value (α=0.05) พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลต่อความขาวสว่าง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ และดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ระยะเวลาในการพักเยื่อส่งผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากแต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงระยะเวลาพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาที่เลือกใช้ในการทดลองอาจยังไม่ใช่ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุด หากแต่ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มดีขึ้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [54] ซึ่งได้ศึกษาถึงผลของการใช้ไคโทซานและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้น ส่งผลให้ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกระยะเวลาพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้น คือ 30 นาที มาใช้ในการทดลองต่อไป

4.2 ศึกษาผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (การวิเคราะห์ผลตอนที่ 2)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* แลกเคสจากเชื้อราเน่าขาว ชนิด *Pycnoporus sanguineus* และการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในปริมาณแตกต่างกัน โดยมีระยะเวลาพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา 30 นาทีทุกภาวะการทดลอง (ดังแสดงในตารางที่ 4-10) ทั้งนี้เพื่อดูอิทธิพลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ที่มีต่อประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออกจากหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยพิจารณาจากปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้ ค่าสภาพระบายได้ คุณภาพเส้นใย รวมถึงทดสอบสมบัติเชิงแสง คือ หาค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อและค่าความขาวสว่าง อีกทั้งวัดสมบัติทางด้านความ

แข็งแรง ได้แก่ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก

นอกจากนี้ยังนำผลการทดลองที่ได้จากสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษหลังการกำจัดหมึกออกแล้วไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อดูว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและมีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษหลังจากการกำจัดหมึกออกแล้วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่และอย่างไร

ตารางที่ 4-10 การทดลองตอนที่ 2

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง
E0	การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม)
E1	การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.20% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
E2	การทดลองที่ใช้แลกเคส 0.20% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
E3	การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.15% ร่วมกับแลกเคส 0.05% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
E4	การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.10% ร่วมกับแลกเคส 0.10% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
E5	การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.05% ร่วมกับแลกเคส 0.15% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
E6	การทดลองที่ใช้เซลลูเลส 0.20% ร่วมกับแลกเคส 0.20% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายเหตุ: ทุกการทดลองมีการใช้เวลาในการพักเยื่อเท่ากับ 30 นาที

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิตินั้นจะใช้เทคนิค ANOVA: single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้ค่า P-value อ้างอิงกับที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ (α=0.05) ในการพิจารณานั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า P-value และ ค่า F_{cal} กล่าวคือ ถ้าค่า P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และหากค่า F_{cal} (ค่า F ที่คำนวณได้) นั้นมีค่ามากกว่าค่า F_{crit} (ค่า F ที่ได้จากตาราง) แสดงว่าผลของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษนั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4-11 แสดงผลของการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ที่ได้ สำหรับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคสในปริมาณต่างๆ กัน โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจาย

เท่ากับ 30 นาที ทุกกรณี ซึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิตินี้จะพิจารณาการทดลองทั้ง 7 การทดลอง (การทดลองที่ E0 ถึง E6) เป็นการทดลอง (treatment) ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อสมบัติเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออก

สมบัติต่างๆ ของเยื่อ	F_{cal}	P-value	F_{crit}
1. ความขาวสว่าง	35.016858	2.825×10^{-18}*	2.246407
2. ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	31.206905	4.206×10^{-17}*	2.246407
3. ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	3.908973	0.002211*	2.246407
4. ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	10.571149	4.310×10^{-8}*	2.246407
5. ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก	1.465998	0.204383	2.246407
6. สภาพระบายได้ของเยื่อ	4.256816	0.039697*	3.865969
7. ความยาวของเส้นใย	11.162697	0.002768*	3.865969
8. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	0.706844	0.655778	3.865969
9. ความโค้งงอของเส้นใย	3.489247	0.063367	3.865969
10. ดรรชนีการหักงอของเส้นใย	2.354445	0.143662	3.865969
11. ความกว้างของเส้นใย	0.443502	0.829382	3.865969
12. ปริมาณผลผลิตของเยื่อ	0.880599	0.553566	3.865969

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05 และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.2.1 **ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย** (fiber morphology)

4.2.1.1 **ความยาวของเส้นใย** (fiber length)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-12 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ความยาวของเส้นใยของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าความยาวของเส้นใยของเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณแตกต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากในการลอยฟองอากาศนั้น เส้นใยสั้นบางส่วนเกาะติดกับฟองอากาศพร้อมกับอนุภาคหมึก แล้วถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้เยื่อส่วนที่ผ่าน

การกำจัดหมึกออกแล้วมีเส้นใยยาวเหลืออยู่ในระบบมากกว่าเมื่อเทียบกับจำนวนเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้ความยาวของเส้นใยของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออกสูงกว่าก่อนการกำจัดหมึกออก

ตารางที่ 4-12 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความยาวเส้นใย (LWW)

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ความยาวเส้นใยก่อนก่อนกำจัดหมึกออก (mm)	ความยาวเส้นใยหลังกำจัดหมึกออก (mm)
E0	control	1.369 ± 0.04	1.454 ± 0.04
E1	0.20%C	1.460 ± 0.05	1.543 ± 0.01
E2	0.20%L	1.476 ± 0.09	1.508 ± 0.06
E3	0.15%C:0.05%L	1.454 ± 0.01	1.523 ± 0.01
E4	0.10%C:0.10%L	1.515 ± 0.00	1.538 ± 0.01
E5	0.05%C:0.15%L	1.494 ± 0.03	1.517 ± 0.07
E6	0.20%C:0.20%L	1.550 ± 0.07	1.592 ± 0.04

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าความยาวของเส้นใยหลังการลอยฟองอากาศซึ่งเป็นค่าความยาวเส้นใยที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นความยาวของเส้นใยหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ความยาวเส้นใยสูงกว่าการทดลองควบคุมในทุกกรณี โดยการใช้เซลลูเลสอย่างเดียวให้ค่าความยาวของเส้นใยสูงกว่าการใช้แลกเคสอย่างเดียว (1.543±0.01 mm เปรียบเทียบกับ 1.508±0.06 mm) และเมื่อมีการใช้เอนไซม์ร่วมกันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดย เฉพาะอย่างยิ่งการใช้เซลลูเลสในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยการใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งส่งผลให้ค่าความยาวของเส้นใยสูงสุด (1.592±0.04 mm) ทั้งนี้อาจอธิบายอิทธิพลของเอนไซม์ต่อความยาวของเส้นใยได้ว่า เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยขนาดสั้นมากกว่าเส้นใยขนาดยาว เนื่องจากเส้นใยขนาดสั้นมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากกว่า ส่งผลให้เยื่อที่เหลืออยู่ในระบบมีค่าความยาวของเส้นใยสูงกว่า และอาจเป็นเพราะว่าภายในองค์ประกอบของเส้นใยนั้นมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมากกว่าปริมาณลิกนิน ทำให้เซลลูเลสไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยมากกว่าแลกเคส ส่งผลให้ค่าความยาวของเส้นใยที่ได้จากการใช้เซลลูเลสสูงกว่าแลกเคส

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.002768 และค่า F_{cal} เท่ากับ 11.162697 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสในระดับต่างๆ ส่งผลต่อค่าความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.2.1.2 **ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก** (fines content)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-13 พบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในเยื่อหลังการลอยฟองอากาศลดลงกว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นเยื่อจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) รวมถึงเยื่อจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสในปริมาณแตกต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้น อาจมีเส้นใยขนาดเล็กบางส่วนเกาะติดกับฟองอากาศแล้วถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในที่สุด ทำให้เยื่อส่วนที่ผ่านการกำจัดหมึกแล้วมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเหลืออยู่ระบบน้อยกว่าก่อนการกำจัดหมึกออก

ตารางที่ 4-13 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนกำจัดหมึกออก (%)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังกำจัดหมึกออก (%)
E0	control	34.54 ± 0.93	33.62 ± 0.42
E1	0.20%C	34.70 ± 1.08	33.25 ± 0.02
E2	0.20%L	35.85 ± 0.50	33.33 ± 1.82
E3	0.15%C:0.05%L	35.24 ± 0.47	33.24 ± 0.32
E4	0.10%C:0.10%L	35.83 ± 1.07	33.34 ± 0.15
E5	0.05%C:0.15%L	34.83 ± 0.42	33.23 ± 0.43
E6	0.20%C:0.20%L	33.46 ± 1.03	32.21 ± 0.41

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า การใช้เอนไซม์ทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการลอยฟองอากาศมีแนวโน้มลดลงกว่า

การทดลองควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้เซลลูเลสและแลกเคสร่วมกันในปริมาณเพิ่มขึ้น (ใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) มีแนวโน้มทำให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลงมากที่สุด (32.21±0.41%) อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์ต่างชนิดกันกลับส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กน้อยมาก เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.655778 และค่า F_{cal} เท่ากับ 0.706844 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสในระดับต่างๆ ไม่ส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

4.2.1.3 **ลักษณะของเส้นใย** (fiber characteristics)

ตารางที่ 4-14 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความโค้งงอของเส้นใย

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ความโค้งงอของเส้นใยก่อนกำจัดหมึกออก	ความโค้งงอของเส้นใยหลังกำจัดหมึกออก
E0	control	0.091 ± 0.001	0.084 ± 0.001
E1	0.20%C	0.092 ± 0.003	0.091 ± 0.001
E2	0.20%L	0.090 ± 0.002	0.089 ± 0.002
E3	0.15%C:0.05%L	0.091 ± 0.001	0.090 ± 0.002
E4	0.10%C:0.10%L	0.097 ± 0.003	0.091 ± 0.004
E5	0.05%C:0.15%L	0.089 ± 0.005	0.087 ± 0.001
E6	0.20%C:0.20%L	0.093 ± 0.004	0.092 ± 0.003

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-14 ตารางที่ 4-15 และจากตารางที่ 4-16 พบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ความโค้งงอของเส้นใย (mean curl) ดรรชนีการหักงอของเส้นใย (kink index) และความกว้างของเส้นใย (fiber width) หลังการลอยฟองอากาศมีแนวโน้มน้อยกว่าก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี โดยจะเห็นชัดจากในกรณีของดรรชนีการหักงอของเส้นใยมากกว่าความโค้งงอของเส้นใยและความกว้างของเส้นใย ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเส้น

ใยลักษณะดังกล่าวบางส่วนอาจเกาะติดกับฟองอากาศพร้อมกับอนุภาคหมึกแล้วถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในระหว่างการลอยฟองอากาศ ทำให้เยื่อส่วนที่ผ่านการกำจัดหมึกแล้วมีเส้นใยลักษณะดังกล่าวเหลืออยู่ในระบบน้อยลง โดยสาเหตุการเกิดเส้นใยลักษณะดังกล่าวอาจเนื่องมาจากเส้นใยผ่านขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือผ่านเครื่องตีกระจายเยื่อแล้ว เส้นใยมีการโค้งงอเกิดขึ้นได้เมื่อมีแรงเฉือนสูงและความเข้มข้นของเยื่อสูง เมื่อเส้นใยเกิดการโค้งงอมากขึ้น เส้นใยสามารถดึงยืดได้ดีขึ้น ลักษณะของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้จะมีความฟู (bulky) สูงขึ้นและความหนาแน่นต่ำ ความต้านทานต่อแรงฉีกมีค่าสูงขึ้นแต่ความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าต่ำลง [20]

เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อความโค้งงอของเส้นใย ดรรชนีการหักงอของเส้นใยและความกว้างของเส้นใยหลังการลอยฟองอากาศ พบว่า การใช้เอนไซม์ทำให้ความโค้งงอของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใช้เอนไซม์ อย่างไรก็ตามชนิดและปริมาณของเอนไซม์มีผลต่อความโค้งงอของเส้นใยน้อยมาก ส่วนผลของการใช้เอนไซม์ต่อดรรชนีการหักงอของเส้นใยนั้นพบว่าการใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าดรรชนีการหักงอของเส้นใยสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์อย่างชัดเจน โดยการใช้เซลลูเลสทำให้ค่าดรรชนีการหักงอของเส้นใยสูงกว่าการใช้แลกเคส ในขณะที่อิทธิพลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่อความกว้างของเส้นใยนั้นกลับไม่มีทิศทางชัดเจน ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองชี้ให้เห็นว่า การใช้เอนไซม์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์เซลลูเลสอาจส่งผลทำให้เส้นใยมีการหักงอเพิ่มขึ้นได้ ทั้งนี้อาจเพราะเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยลดน้อยลง ทำให้เส้นใยอาจรับน้ำและมีการยืดหยุ่นตัวได้น้อยลง

ตารางที่ 4-15 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีการหักงอของเส้นใย

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ดรรชนีการหักงอของเส้นใยก่อนกำจัดหมึกออก	ดรรชนีการหักงอของเส้นใยหลังกำจัดหมึกออก
E0	control	1.704 ± 0.02	1.624 ± 0.02
E1	0.20%C	1.735 ± 0.03	1.719 ± 0.03
E2	0.20%L	1.704 ± 0.07	1.645 ± 0.04
E3	0.15%C:0.05%L	1.717 ± 0.02	1.701 ± 0.02
E4	0.10%C:0.10%L	1.782 ± 0.02	1.720 ± 0.06
E5	0.05%C:0.15%L	1.691 ± 0.08	1.679 ± 0.04
E6	0.20%C:0.20%L	1.722 ± 0.00	1.717 ± 0.33

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

ตารางที่ 4-16 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความกว้างของเส้นใย

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ความกว้างของเส้นใยก่อนกำจัดหมึกออก (μm)	ความกว้างของเส้นใยหลังกำจัดหมึกออก (μm)
E0	control	19.53 ± 0.71	19.51 ± 0.19
E1	0.20%C	19.47 ± 0.28	19.47 ± 0.21
E2	0.20%L	19.41 ± 0.27	19.40 ± 0.13
E3	0.15%C:0.05%L	19.43 ± 0.05	19.39 ± 0.16
E4	0.10%C:0.10%L	19.59 ± 0.19	19.53 ± 0.26
E5	0.05%C:0.15%L	19.66 ± 0.10	19.52 ± 0.21
E6	0.20%C:0.20%L	19.65 ± 0.31	19.54 ± 0.35

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ไม่มีผลต่อความโค้งงอของเส้นใย ดรรชนีการหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 (ค่า P-value ของความโค้งงอของเส้นใย ดรรชนีการหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย เท่ากับ 0.063367, 0.143662 และ 0.829382 ตามลำดับ และค่า F_{cal} ของความโค้งงอของเส้นใย ดรรชนีการหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย เท่ากับ 3.489247, 2.354445 และ 0.443502 ตามลำดับ)

4.2.2 **สมบัติเชิงแสง** (optical properties)

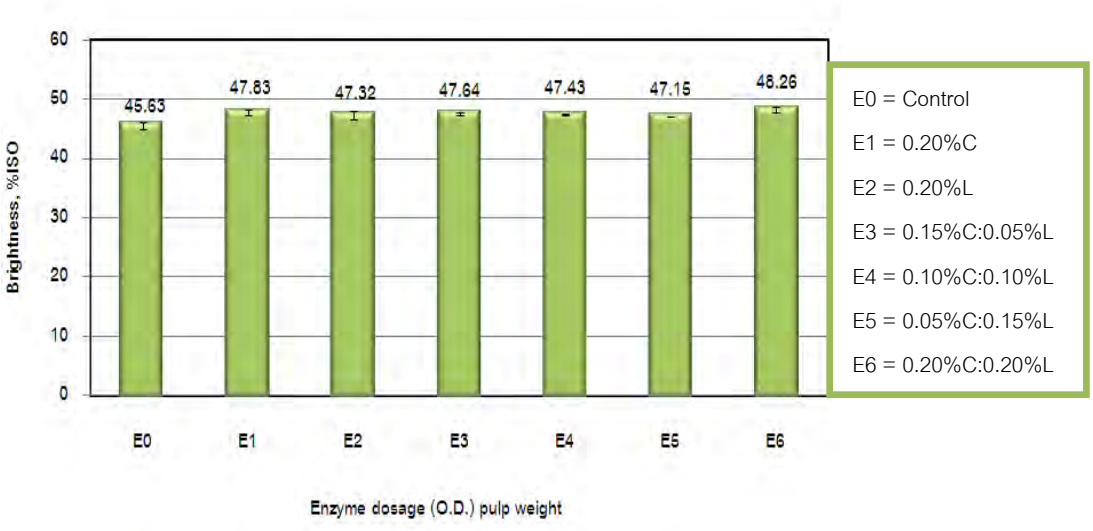
4.2.2.1 **ความขาวสว่าง** (brightness)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-17 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณต่างๆ กัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอนุภาคของหมึกที่หลุดออกมาจากผิวหน้าของเส้นใยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อจะไปเกาะติดกับฟองอากาศแล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกต่อไป

ตารางที่ 4-17 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อความขาวสว่าง

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ความขาวสว่างก่อนกำจัดหมึกออก (%)	ความขาวสว่างหลังกำจัดหมึกออก (%)
E0	control	43.64 ± 0.55	45.63 ± 0.63
E1	0.20%C	43.84 ± 0.37	47.83 ± 0.50
E2	0.20%L	43.27 ± 0.37	47.32 ± 0.73
E3	0.15%C:0.05%L	44.84 ± 0.19	47.64 ± 0.20
E4	0.10%C:0.10%L	44.73 ± 0.11	47.43 ± 0.08
E5	0.05%C:0.15%L	44.74 ± 0.07	47.15 ± 0.06
E6	0.20%C:0.20%L	44.83 ± 0.10	48.26 ± 0.39

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์



ภาพที่ 4-7 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-17 และจากภาพที่ 4-7 เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าความขาวสว่างหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) ในทุกกรณี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเซลลูเลสเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยตรง

บริเวณผิวหน้า หลังจากเส้นใยถูกเปิดผิวหน้าด้วยแรงกลจากเครื่องตีกระจายเยื่อ ซึ่งเอนไซม์สามารถไปย่อยสลายหรือตัดพันธะของน้ำตาลที่ต่อเรียงกันเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย ทำให้หมึกที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของเส้นใยหลุดออกมาด้วย [17] ในขณะที่แลกเคสไปทำปฏิกิริยากับลิกนินโดยจะไปเปลี่ยนแปลงหรือทำลายโครงสร้างย่อยของลิกนิน [55] ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่อความขาวสว่างพบว่า การใช้เซลลูเลสให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าแลกเคส (47.83±0.50% เปรียบเทียบกับ 47.32±0.73%) และในกรณีของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสนั้นพบว่าการใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าความขาวสว่างสูงสุด (48.26±0.39%) ซึ่งผลที่ได้ไปในทางเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเมื่อใช้เอนไซม์ร่วมกันจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เอนไซม์เพียงตัวเดียว เนื่องจากส่งผลให้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้น [41]

จากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณของเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าความขาวสว่างของกระดาษนั้นค่อนข้างขึ้นอยู่กับอนุภาคของหมึกพิมพ์มากกว่าลิกนิน ในกรณีนี้เซลลูเลสอาจไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยซึ่งมีปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมากกว่าลิกนิน ทำให้สามารถกำจัดหมึกออกจากบริเวณผิวหน้าของเส้นใยได้มากกว่า ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าเซลลูโลสและเฮมิ-เซลลูโลสของเส้นใย จึงส่งผลให้ค่าความขาวสว่างน้อยกว่าเซลลูเลส นอกจากนี้การใช้แลกเคสในปริมาณมากอาจไปลดค่าความขาวสว่างของเยื่อทั้งระบบได้เช่นกัน เนื่องจากสีของแลกเคสที่ใช้ซึ่งมีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาล

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 2.825×10^{-18} และค่า F_{cal} เท่ากับ 35.016858 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.2.2.2 **ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่** (effective residual ink concentration; ERIC)

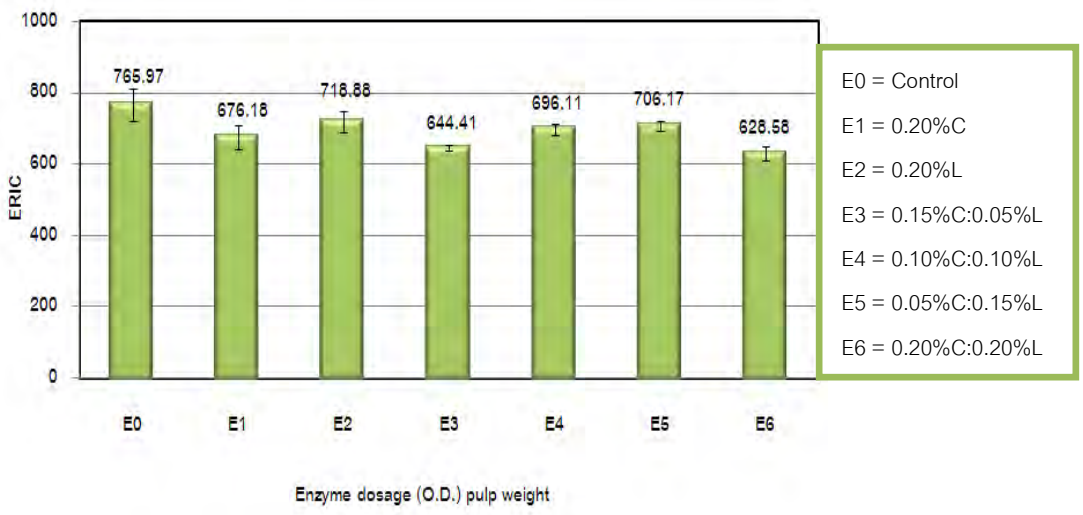
จากผลการทดลองในตารางที่ 4-18 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าลดลงกว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการ

ทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณต่างๆ กัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าอนุภาคของหมึกที่หลุดออกมาจากผิวหน้าของเส้นใยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อจะไปเกาะติดกับฟองอากาศแล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกต่อไป

ตารางที่ 4-18 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก่อนกำจัดหมึกออก	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังกำจัดหมึกออก
E0	control	1107.39 ± 69.77	765.97 ± 43.63
E1	0.20%C	1092.31 ± 39.74	676.18 ± 32.99
E2	0.20%L	1155.41 ± 20.22	718.88 ± 29.21
E3	0.15%C:0.05%L	1047.97 ± 14.24	644.41 ± 8.62
E4	0.10%C:0.10%L	1096.96 ± 16.66	696.11 ± 16.98
E5	0.05%C:0.15%L	1139.23 ± 7.44	706.17 ± 13.92
E6	0.20%C:0.20%L	1072.00 ± 30.03	628.58 ± 20.14

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์



ภาพที่ 4-8 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-18 และจากภาพที่ 4-8 เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังการลอยฟองอากาศน้อยกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) ในทุกกรณี ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นในกรณีของความขาวสว่าง

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ พบว่า การใช้เซลลูเลสให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อน้อยกว่าแลกเคส (676.18±32.99 เปรียบเทียบกับ 718.88±29.21) และในกรณีของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสนั้นพบว่า การใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อน้อยสุด (628.58±20.14) โดยปริมาณของเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในกรณีของความขาวสว่าง

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 4.206×10^{-17} และค่า F_{cal} เท่ากับ 31.206905 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์ ส่งผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.2.3 **สมบัติด้านความแข็งแรง** (strength properties)

4.2.3.1 **ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง** (tensile index)

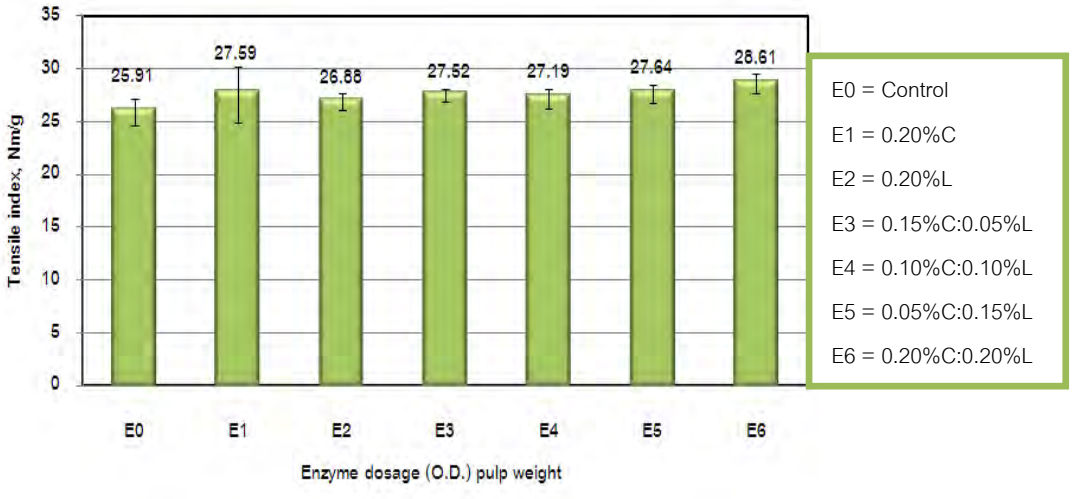
จากผลการทดลองในตารางที่ 4-19 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณต่างๆ กัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยที่มีขนาดสั้นถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศในระหว่างการลอยฟองอากาศ จึงทำให้เยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้วเหลือเส้นใยยาวอยู่เป็นจำนวนมาก โดยปกติแล้วเส้นใยยาวมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยสั้น และเส้นใยยาวยังสามารถ

สร้างพันธะระหว่างเส้นใยได้มากกว่าเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้หลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้น

ตารางที่ 4-19 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนกำจัดหมึกออก (Nm/g)	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังกำจัดหมึกออก (Nm/g)
E0	control	24.73 ± 0.73	25.91 ± 1.24
E1	0.20%C	24.57 ± 0.35	27.59 ± 2.62
E2	0.20%L	23.56 ± 0.68	26.88 ± 0.81
E3	0.15%C:0.05%L	25.10 ± 0.45	27.52 ± 0.63
E4	0.10%C:0.10%L	25.19 ± 1.35	27.19 ± 0.96
E5	0.05%C:0.15%L	25.89 ± 1.21	27.64 ± 0.89
E6	0.20%C:0.20%L	26.57 ± 0.88	28.61 ± 0.95

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์



ภาพที่ 4-9 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-19 และจากภาพที่ 4-9 เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าดรรชนีความ

แข็งแรงต่อแรงดึงที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) ในทุกกรณี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเอนไซม์ไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยขนาดสั้นก่อน เนื่องจากเส้นใยขนาดสั้นมีพื้นที่ผิวให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้มาก ส่งผลให้ระบบมีเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยสั้น ซึ่งเส้นใยยาวมีความแข็งแรงกว่าและการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยดีกว่าเส้นใยสั้น นอกจากนี้อาจเป็นเพราะว่าการที่เอนไซม์แลกเคสไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ส่งผลให้เส้นใยเป็นอิสระมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงแผ่นทดสอบที่ได้จึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง พบว่า การใช้เซลลูเลสให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าแลกเคส (27.59±2.62 Nm/g เปรียบเทียบกับ 26.88±0.81 Nm/g) ทั้งนี้อาจเนื่องจากภายในเส้นใยนั้นมีปริมาณลิกนินน้อยกว่าปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จึงส่งผลให้การใช้เซลลูเลสให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าแลกเคส และในกรณีของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสนั้นพบว่า ผลปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นมีทิศทางที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ดีการใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสูด (28.61±0.95 Nm/g)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.002211 และค่า F_{cal} เท่ากับ 3.908973 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.2.3.2 **ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ** (burst index)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-20 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ รวมถึงแผ่นทดสอบจากการใช้เซลลูเลสและแลกเคสที่ปริมาณต่างๆ กัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลอยฟองอากาศนั้นอาจทำให้เส้นใยที่มีขนาดสั้นหลุดออกไปพร้อมกับอนุภาคหมึกในระหว่างการลอยฟองอากาศ ทำให้เหลือเส้นใยยาวอยู่มาก จึง

ส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้หลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงขึ้น ดังเหตุผลเดียวกับที่อธิบายไปแล้วข้างต้นในกรณีของดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

ตารางที่ 4-20 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

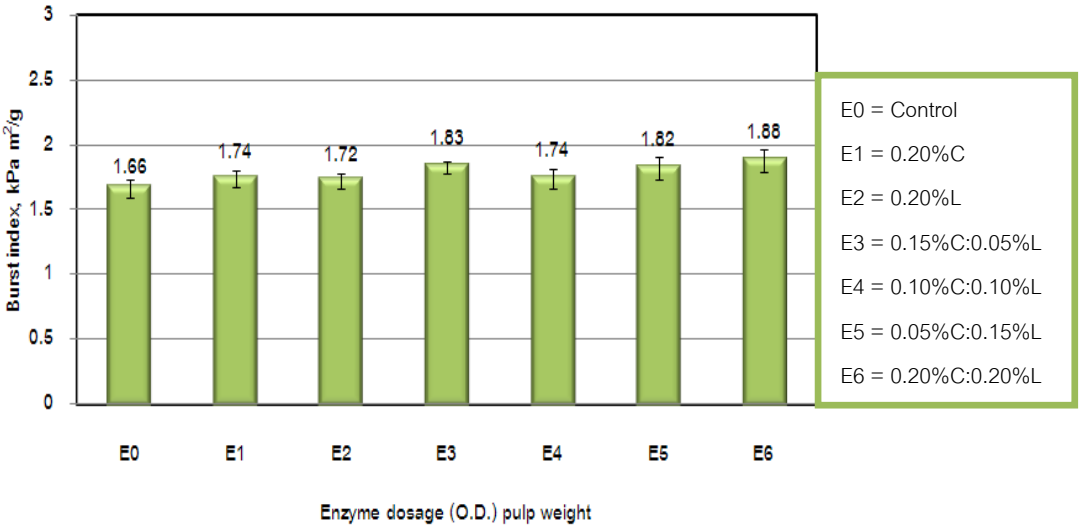
การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุก่อนกำจัดหมึกออก (kPa m^2/g)	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุหลังกำจัดหมึกออก (kPa m^2/g)
E0	control	1.60 ± 0.09	1.66 ± 0.07
E1	0.20%C	1.63 ± 0.04	1.74 ± 0.06
E2	0.20%L	1.66 ± 0.05	1.72 ± 0.06
E3	0.15%C:0.05%L	1.64 ± 0.06	1.83 ± 0.05
E4	0.10%C:0.10%L	1.69 ± 0.08	1.74 ± 0.08
E5	0.05%C:0.15%L	1.69 ± 0.08	1.82 ± 0.09
E6	0.20%C:0.20%L	1.72 ± 0.05	1.88 ± 0.09

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-20 และจากภาพที่ 4-10 เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่นำไปใช้ได้จริง เพราะเป็นค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่าการใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) ในทุกกรณี ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุพบว่า การใช้เซลลูเลสให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุไม่แตกต่างไปจากการใช้แลกเคส (1.74±0.06 kPa m^2/g เปรียบเทียบกับ 1.72±0.06 kPa m^2/g) และในกรณีของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสนั้นพบว่า ผลปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุนั้นมีทิศทางที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม การใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่

ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงสุด (1.88 ±0.09 kPa m^2/g)



ภาพที่ 4-10 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 4.310×10^{-8} และค่า F_{cal} เท่ากับ 10.571149 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์ส่งผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.2.3.3 **ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก** (tear index)

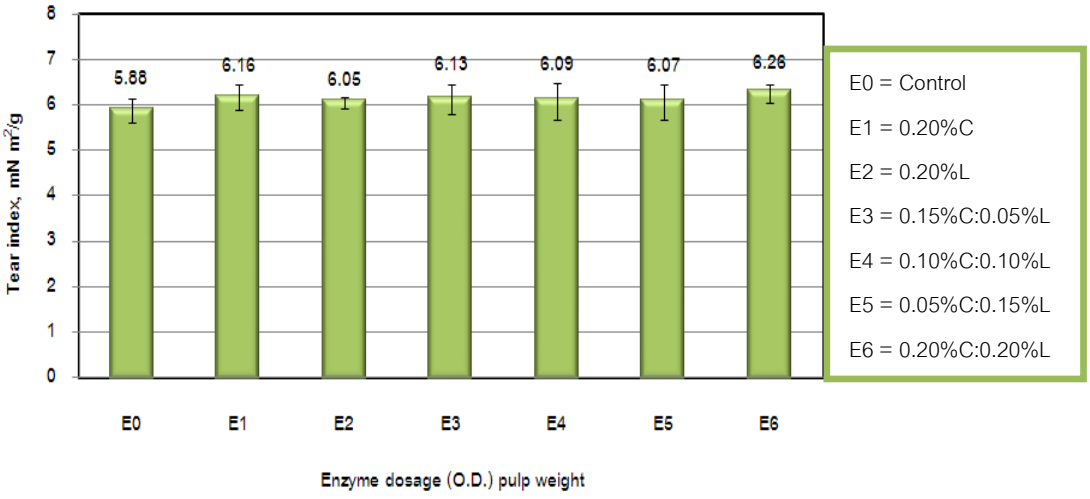
จากผลการทดลองในตารางที่ 4-21 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลอยฟองอากาศนั้นทำให้เส้นใยขนาดสั้นบางส่วนอาจถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศด้วย จึงส่งผลให้เหลือเส้นใยยาวอยู่มากในระบบหลังการลอยฟองอากาศ โดยปกติแล้วค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกนั้นเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใย โดยอิทธิพลของความแข็งแรงของเส้นใยจะมีผลสูงกว่าพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใย

ยาวมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยสั้น เมื่อเยื่อในระบบเหลือเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยสั้น แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น

ตารางที่ 4-21 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อดรรชนีความต้านทานแรงฉีก

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ดรรชนีความต้านทานแรงฉีกก่อนกำจัดหมึกออก (mN m^2/g)	ดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังกำจัดหมึกออก (mN m^2/g)
E0	control	5.71 ± 0.16	5.88 ± 0.26
E1	0.20%C	5.80 ± 0.22	6.16 ± 0.28
E2	0.20%L	5,70 ± 0.19	6.05 ± 0.13
E3	0.15%C:0.05%L	5.80 ± 0.18	6.13 ± 0.32
E4	0.10%C:0.10%L	5.67 ± 0.33	6.09 ± 0.40
E5	0.05%C:0.15%L	5.89 ± 0.30	6.07 ± 0.39
E6	0.20%C:0.20%L	5.92 ± 0.15	6.26 ± 0.20

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์



ภาพที่ 4-11 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-21 และจากภาพที่ 4-11 เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นดรรชนีความต้านทานแรงฉีกที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังจากผ่านการ

กำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศสูงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) ในทุกกรณี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเอนไซม์ไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยขนาดสั้นก่อน เนื่องจากเส้นใยสั้นมีพื้นที่ผิวให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้มากกว่า ส่งผลให้ในระบบเหลือเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยสั้น ซึ่งสำหรับค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกนั้นความแข็งแรงของเส้นใยค่อนข้างมีบทบาทสูงกว่าพันธะระหว่างเส้นใย โดยเส้นใยยาวมีความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าเส้นใยสั้น ฉะนั้นความต้านทานแรงฉีกจึงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เอนไซม์แลกเคสยังไปช่วยกำจัดลิกนินออกไปจากเส้นใย ส่งผลให้เส้นใยเป็นอิสระมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น ซึ่งอาจมีผลทำให้ความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ได้สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก พบว่า การใช้เซลลูเลสให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกใกล้เคียงกับการใช้แลกเคส (6.16±0.28 mN m^2/g เปรียบเทียบกับ 6.05±0.13 mN m^2/g) และในกรณีของการใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสนั้นพบว่า การใช้เซลลูเลสในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น โดยการใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งให้ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงสุด (6.26±0.20 mN.m^2/g)

โดยทั่วไปแล้วค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกผลที่ได้จะค่อนข้างเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ หากแต่ผลที่ได้จากผลการทดลองนี้กลับพบว่า ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้เอนไซม์ ซึ่ง Xu และคณะ [56] รายงานว่าการกำจัดหมึกเมื่อใช้แลกเคส-ไวโอลูริคแอซิด จะให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงขึ้น โดยให้ค่าสูงขึ้นเท่ากับ 20% และ 13% ตามลำดับ ซึ่งการใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยส่วนใหญ่แล้วพบว่าเอนไซม์จะให้ค่าความแข็งแรงโดยรวมของเยื่อเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.204383 และค่า F_{cal} เท่ากับ 1.465998 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์ไม่ส่งผลต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

4.2.4 การวิเคราะห์คุณภาพของเยื่อ

4.2.4.1 สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

ตารางที่ 4-22 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ

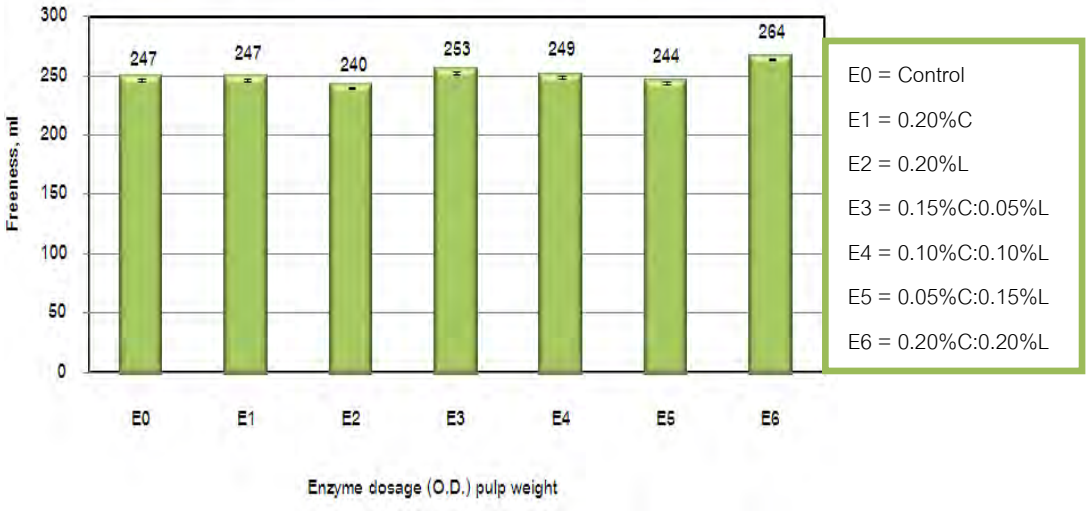
การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	สภาพระบายได้ก่อนกำจัดหมึกออก (ml)	สภาพระบายได้หลังกำจัดหมึกออก (ml)
E0	control	231 ± 4	247 ± 4
E1	0.20%C	232 ± 7	247 ± 4
E2	0.20%L	214 ± 6	240 ± 8
E3	0.15%C:0.05%L	240 ± 1	253 ± 6
E4	0.10%C:0.10%L	242 ± 0	249 ± 1
E5	0.05%C:0.15%L	238 ± 0	244 ± 5
E6	0.20%C:0.20%L	248 ± 7	264 ± 5

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-22 พบว่า อิทธิพลของการลอยฟองอากาศทำให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากในการลอยฟองอากาศนั้นเส้นใยสั้นบางส่วนอาจเกาะติดกับฟองอากาศพร้อมกับอนุภาคหมึกแล้วถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ส่งผลให้เยื่อในระบบหลังการกำจัดหมึกออกมีเส้นใยยาวเหลืออยู่มากกว่าเส้นใยสั้น ซึ่งเส้นใยยาวมีพื้นที่ผิวในการอุ้มน้ำไว้น้อยกว่าเส้นใยสั้น จึงส่งผลให้น้ำสามารถระบายออกได้มากกว่า ดังนั้นค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออกจึงมีค่าสูงกว่าก่อนการกำจัดหมึกออก

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-22 และจากภาพที่ 4-12 เมื่อพิจารณาถึงการใช้เอนไซม์ต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศ ซึ่งเป็นค่าสภาพระบายได้ของเยื่อที่นำไปใช้จริง เพราะเป็นค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังจากผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว พบว่า การใช้เอนไซม์มีผลต่อค่าสภาพระบายได้น้อยมาก เนื่องจากค่าสภาพระบายได้ของเยื่อในกรณีที่ไม่ใช้เอนไซม์แทบไม่แตกต่างจากกรณีที่ใช้เอนไซม์ (การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ให้ค่าสภาพระบายเยื่อ 247±4 ml ในขณะที่การทดลองที่มีการใช้เอนไซม์นั้นให้ค่าสภาพระบายเยื่อต่ำสุดเท่ากับ 240±8 ml และสูงสุดเท่ากับ 264±5 ml) อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ว่า

เซลลูเลสน่าจะส่งผลให้สภาพระบายได้เพิ่มขึ้น ส่วนแลกเคสอาจทำให้ค่าสภาพระบายได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเซลลูเลสอาจไปทำปฏิกิริยากับเส้นใย โดยเซลลูเลสจะไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยสั้นได้ดีกว่าเส้นใยยาว ปริมาณเส้นใยสั้นจึงลดลง ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อสูงขึ้น ในขณะที่แลกเคสจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งลิกนินมีสภาพไม่ชอบน้ำ [20] เมื่อปริมาณลิกนินลดลง ทำให้เส้นใยมีความชอบน้ำมากขึ้น สามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อลดลง และจากการทดลองพบว่า การใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อสูงสุด (264±5 ml)



ภาพที่ 4-12 ผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.039697 และค่า F_{cal} เท่ากับ 4.256816 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์เซลลูเลสและแลกเคสในระดับต่างๆ ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.2.4.2 **ปริมาณผลผลิตของเยื่อ** (yield)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-23 พบว่า การใช้เอนไซม์ต่างชนิดกัน ในปริมาณที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้มากนัก เนื่องจากค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้จากการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ (การทดลองควบคุม-control) มีค่าเท่ากับ 95.13±1.23% ในขณะที่การทดลองที่ใช้เอนไซม์ให้ค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อต่ำสุดเท่ากับ 94.14±0.21% และให้ค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อสูงสุดเท่ากับ 96.82±1.59% ซึ่งถือว่าแทบไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-23 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์ที่มีต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (%)
E0	control	95.13±1.23
E1	0.20%C	94.73±0.18
E2	0.20%L	95.27±2.43
E3	0.15%C:0.05%L	94.26±1.16
E4	0.10%C:0.10%L	95.19±1.09
E5	0.05%C:0.15%L	96.82±1.59
E6	0.20%C:0.20%L	94.14±0.21

หมายเหตุ: C = เซลลูเลส, L = แลกเคส และ control = การทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA: single factor และพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลชนิดและปริมาณของเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.553566 และค่า F_{cal} เท่ากับ 0.880599 แสดงว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F_{crit} และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลของการใช้เซลลูเลสจากเชื้อราชนิด *Aspergillus niger* และแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยตัวแปรสำคัญในการศึกษามี 3 ตัวแปรคือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ปริมาณของเอนไซม์ และชนิดของเอนไซม์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของเอนไซม์ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดหมึก สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ผลของการใช้เอนไซม์และระยะเวลาในการพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อและกระดาษ

การกำจัดหมึกพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ ดังนี้ ทำให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ค่าความโค้งงอของเส้นใย ค่าดรรชนีการหักงอของเส้นใยและค่าความกว้างของเส้นใยลดลง ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก และค่าสภาพระบายได้ของแผ่นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการลอยฟองอากาศ

ผลของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่อพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้น ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้น ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติของระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (reaction time) พบว่า ระยะเวลาในการพักเยื่อส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น โดยเซลลูเลสให้ผลดีกว่าแลกแคส ทั้งกรณีพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา 0 นาทีและ 30 นาที อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการใช้เซลลูเลสและแลกเคส พบว่า การใช้เอนไซม์ส่งผลต่อค่าความขาวสว่าง ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5.1.2 ผลของปริมาณและชนิดของเอนไซม์เมื่อใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

ในการใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสนั้นพบว่า เมื่อใช้เอนไซม์ในปริมาณที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบดีขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณเซลลูเลสส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษส่วนใหญ่มากกว่าการเพิ่มปริมาณแลกเคส ซึ่งการเพิ่มปริมาณของเซลลูเลสทำให้ความยาวของเส้นใยสูงกว่า ดรรชนีการหักงอของเส้นใยสูงกว่า ความขาวสว่างสูงกว่า ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำกว่า และดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าการเพิ่มปริมาณของแลก-เคส อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณของเอนไซม์ทั้งสองชนิด (การใช้เซลลูเลสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ร่วมกับแลกเคสที่ปริมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด คือ ให้ค่าความขาวสว่างสูงสุด ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำสุด ค่าความแข็งแรงของกระดาษสูงสุด ค่าความยาวของเส้นใยสูงสุด และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กต่ำสุด อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อดูอิทธิพลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ พบว่าปริมาณและชนิดของเอนไซม์มีผลต่อความขาวสว่าง ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ สภาพระบายได้ของเยื่อ และความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การปรับค่า pH ควรทำการปรับค่าให้ค่าคงที่ก่อนที่จะเติมเอนไซม์เนื่องจาก ค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ โดยในขั้นตอนก่อนการตีกระจายเยื่อจะมีการวัดค่า pH ในช่วง 10 นาทีแรก เพื่อให้มั่นใจว่าค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากที่กำหนดใช้ในการทดลอง

5.2.2 อาจมีการกำจัดหมึกในสภาวะที่เป็นด่าง (pH=11) และมีการใช้เอนไซม์ร่วมกำจัดหมึกด้วย เนื่องจากเส้นใยอาจมีแนวโน้มเกิดการกำจัดหมึกได้ดี เนื่องจากเส้นใยพองตัว รับน้ำได้มากและมีการยืดหยุ่นตัวได้มาก ทำให้ขจัดหมึกออกได้ดีขึ้นด้วยแรงเสียดทาน

5.2.3 ควรเก็บกระดาษให้มีระยะเวลาที่เท่ากัน และทำการทดลองทันทีเมื่อครบกำหนดเวลา โดยเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะไม่ให้ถูกแสง และความชื้น เนื่องจากเมื่อเก็บกระดาษเป็นเวลานานขึ้นหมึกอาจจะเกาะติดกับกระดาษแน่นขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดหมึกออกมีประสิทธิภาพลดลง

5.2.4 ควรทำการทดลองในสภาวะที่มีการพักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 60 นาทีหรือ 120 นาทีด้วย และศึกษาสมบัติต่างๆ ของกระดาษว่าเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีกว่าพักเยื่อที่ 30 นาที หรือ 40 นาที หรือไม่อย่างไร

5.2.5 ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษา เป็นผลการทดลองที่อยู่ในขอบเขตที่ศึกษาเท่านั้น (pH = 5.5±0.2 และเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นเองด้วยวิธีการทางชีวภาพ) สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเบื้องต้นสู่การพัฒนาทดลองต่อไป

5.2.6 ควรทำการวัดความเข้มสีของหมึก (ink density) ของกระดาษหนังสือพิมพ์ก่อนและหลังการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาว่าปริมาณหมึกของกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้เท่ากันทุกแผ่นหรือไม่

รายการอ้างอิง

[1] เราหันมาใช้กระดาษรีไซเคิลกันเถอะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.oknation.net/blog/print.php?id=38824 [2553, กรกฎาคม 19]

[2] Gottsching, L., and Pakarinen, H. Papermaking Science and Technology 7 :Recycled Fiber and Deinking. Atlanta : TAPPI PRESS, 2000.

[3] Carre, B., Magnin, L., Galland, G., and Vernac, Y. Deinking Difficulties Related to Ink Formulation, Printing Process and Type of Paper. TAPPI Journal 83(6) (2000): 1-33.

[4] Ferguson, L.D. Deinking Chemistry: Part 2. TAPPI Journal 75(7) (August 1992): 49-58.

[5] Ferguson, L.D.The Role of Pulper Chemistry in Deinking : 1991 Pulping Conference. Atlanta: TAPPI PRESS, 1991, pp 793-799.

[6] Ferguson, L.D. Deinking Chemistry: Part 1. TAPPI Journal 75(7) (July 1992): 75-83.

[7] กรดกำมะถัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://board.dserver.org/s/studysc/00000005.html [2553, กรกฎาคม 19]

[8] Horacek, R.G., and Jarrehult, B. Chemistry Application Expands in Washing/Flotation Deinking Systems. in Paper Recycling: Strategies, Economics, and Teachnology, Edited by K.L. Patrick, Miller Freeman Publications, San Francisco, 1991, pp 139-141.

[9] Ben, Y., Dagenais, M., and Dorris, G.M. Irreversible Ink Redeposition During Re-pulping Part 1. Journal of Pulp and Paper Science 26(3) (2000): 83-89.

[10] Heindel, T.J. Fundamentals of Flotation Deinking. TAPPI Journal 82(3) (March 1999): 115-124.

[11] Ferguson, L.D. Flotation Deinking Chemistry: 1994 Deinking Short Course. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994, pp. 227.

[12] พรทวี พึ่งรัศมี และอรัญ หาญสืบสาย. สาระน่ารู้เรื่องกระดาษพิมพ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ด่านสุทธาการพิมพ์, 2537.

[13] Lee, C.K., Darah, I., and Ibrahim, C.O. Enzymatic Deinking of Laser Printed Office Waste Papers: Some Governing Parameters on Deinking Efficiency. Bioresource Technology 98 (2007): 1684-1689.

[14] Cell, H.P., Strittmatter, G. Application of Lignolytic Enzymes in the Paper and Pulp Industry-Recent Results. Papier 46(10A) (1992): v32-v37.

[15] Kim, T-J, OW, S. S-K., and EOM, T-J. Enzyme Deinking Method of Wastepaper. Pulping Conference Proceedings. Atlanta : TAPPI PRESS, 1991.

[16] Prasad, D., Heimann, J., and Joyce, T. Enzymatic Deinking of Colored Offset Newsprint. Nordic Pulp and Paper Resesrch Journal 8(2) (1993): 284-286.

[17] Zeyer, C., Joyce, T.W., Heitmann, J.A., and Rucker, J.W. Factors Influencing Enzyme Deinking of Recyced Fiber. TAPPI Journal 77(10) (1994): 169-177.

[18] Welt, T., and Dinus, R.J. Enzymatic Deinking-A Review. Progress in Paper Recycling 5(2) (1995): 36.

[19] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper technologists. 2nd edition. Vancouver: Angus Wilde, 1994.

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

[21] Sasaki, I. Enzymatic Saccharification of Rice Hull Cellulose. JARQ 16(2) (1982): 144-150.

[22] *Aspergillus niger*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Aspergillus_niger [2553, สิงหาคม 13]

[23] Montenecourt, B. *Trichoderma reesei* Cellulases. Trends in Biotechnology 1(5) 1983: 156-161.

[24] Ryu, D., and Mandels, M. Cellulase: Biosynthesis and Applications. Enzyme and Microbial Technology 2 (1980): 91-102.

[25] Duff,S.J.B. Use of Surface-immobilized Trichoderma in Batch and Fed-batch Fermentation. Biotechnology and Bioengineering 31 (1988): 345-351.

[26] Reese, E.T. Summary Statement on the Enzyme System in Cellulose as a Chemical and Energy Resource. Biotechnology and Bioengineering Symposium 5 (1975): 77 -80.

[27] Camarero, S., Ibarra, D., Martinez, M.J., and Martinez, A.T. Lignin-Derived Compound as Efficient Laccase Mediators for Decolorization of Different Types of Recalcitrant Dyes. Applied and Environmontal Microbiology 71(2005): 1775-1784.

[28] Mayer, A.M., and Staple, R. C. Laccase:New Function for an Old Enzyme Phtochemistry 60 (2002): 551-565.

[29] *Pycnoporus sanguineus*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/ Pycnoporus_sanguineus [2553, สิงหาคม 13]

[30] *Pycnoporus sanguineus* [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.forestry.sarawak.gov.my/for web/wildlife/sanc/lanjak/psangu.jpg [2553, สิงหาคม 13]

[31] Couto, S.R., and Herrera, J.L.T. Laccase Production at Reactor Scale by Filamentous Fungi. Biotechnology Advances 25 (2007): 558-569.

[32] Salas, C., Larraín. J., Salas, L., Cullen, D., and Vicuña R. Properties of Laccase Isoenzymes Produced by the Basidiomycete *Ceriporiopsis subvermispora.* Biotechnol. Appl. Biochem. 21 (1995): 323-333.

[33] Valderrama, B., Oliver, P., Medrano-Soto, A., and Vazquez-Duhalt R. Evolutionary and Structural Diversity of Fungal Laccases. Antonie Van Leeuwenhoek 84 (2003): 289-299.

[34] Pozdnyakova, N. N., Rodakiewicz-Nowak, J., Turkovskaya, O. V. and Haber J. Oxidative Degradation of Polyaromatic Hydrocarbons Catalyzed by Blue Laccase from Pleurotus Ostreatus D1 in the Presence of Synthetic Mediators. Enzyme and Microbial Technology 39 (2006): 1242-1249.

[35] Jeffries, T.W., CHOI, S., and Kirk, T.K. Nutritional Regulation of Lignin Degradation by *Phanerochaete chrysosporium.* Applied and Environmental Microbiology 42(2) (August 1981): 290-296.

[36] Reid and Seifert K.A. Effect of an Atmosphere of Oxygen on Growth Respiration, and Lignin Degradation by White rot fungi. Can. J. Botany 60 (1982): 252–260.

[37] Couto, S.R., and Herrera, J.L.T. Industrial and Biotechnological Application of Laccases : A Review. Biotechnology Advances 24 (2006): 500-513.

[38] Jeffries, T.W., Klungness, J.H., Sykes, M.S., and Rutledge-Cropsey, K.R. Comparison of Enzyme-Enhanced with Conventional Deinking of Xerographic and Laser-Printed Paper. TAPPI Journal 77(4) (1994): 173-179.

[39] Geng, X., and Li, K. Deinking of Recycled Mixed Office Paper Using Two Endoglucanases, CelB and CelE, form the Anaerobic Fungus Orpinomyces PC-2.

TAPPI Journal 86(7) (2003): 29-32.

[40] Zhang, X., Renaud, S., and Paice, M. Celluase Deinking of Fresh and Aged Recycled Newsprint/ magazines(ONP/OMG). Enzyme and Microbial Teachnology 43 (2008): 103-108.

[41] Xu, Q., Fu, Y., Gao, Y., and Qin, M. Performance and Efficiency of Old Newspaper Deinking by Combining Cellulase/hemicellulase with Laccase-violuric acid system. Waste Management 29 (2009): 1486-1490.

[42] Miller, G.L., Blum, R., Glennon, W.E., and Burton, A.L. Measurement of Carboxy-methylcellulase Activity. Analytical Biochemistry 1(2) (1959): 127-132.

[43] Prasongsuk, S., Lotrakul, P., Imai, T., and Punnapayak, H. Decolourization of Pulp Mill Wastewater Using Thermotolerant White rot fungi. ScienceAsia 35 (2009): 37 -41.

[44] T 227 om-04. Freeness of Pulp (Canadian Standard Method). Atlanta: TAPPI Press, 2004.

[45] ISO16065-1. Pulps-Determination of Fibre Length by Automated Optical. International Organization for Standardization, Switzerland, 2001.

[46] ISO5269-2. Pulp Preparation of Laboratory Sheets for Physical Testing. International Organization for Standardization, Switzerland, 1998.

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

[48] Scott E W. Properties of Paper, An Introduction. Atlanta: TAPPI Press, 2000.

[49] T452 om-98. Brightness of Pulp: Paper and Paperboard (Directional Reflectance at 457 nm. Atlanta: TAPPI Press, 1998.

[50] T567 pm-04. Determination of Effective Residual Ink Concentation by Infrared Reflectance Measurement. Atlanta: TAPPI Press, 2004.

[51] T 494 om-01. Tensile Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus). Atlanta: TAPPI Press, 2001.

[52] T 403 om-97. Bursting Strength of Paper. Atlanta: TAPPI Press, 1997.

[53] T 414 om-98. Internal Tearing Resistance of Paper (Elmendorf-Type Method). Atlanta: TAPPI Press, 1998.

[54] ปนัดดา กลิ่นบัว. การใช้ไคโตซานและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยโทนเนอร์ด้วยวิธีลอยฟองอากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[55] Xu, Q., Qin, M., Shi, S., Jin, L., and Fu, Y. Structural Changes in Lignin During the Deinking of Old Newsprint with Laccase–Violuric Acid System. Enzyme and Microbial Technology 39 (2006): 969–975.

[56] Xu, Q.H., Fu, Y.J., Qin, M.H., Qiu, H.Y. Surface Properties of Old Newsprint Laccase-Violuric Acid System Deinked Pulp. Appita J 60 (2007): 372-377.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและการคำนวณแอคติวิตีของเอนไซม์

1. การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตเซลลูเลส

อาหารสูตร (PDA) Potato Dextrose Agar ประกอบด้วย

มันฝรั่ง	200	กรัม
กลูโคส	20	กรัม
วุ้น	15	กรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

เตรียมโดยนำมันฝรั่ง 200 กรัม มาหั่นให้เป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋า แล้วนำไปต้มด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร เมื่อมันฝรั่งสุกจะกรองเอาเฉพาะน้ำของมันฝรั่งมาใส่ผงวุ้น 15 กรัม และกลูโคส 20 กรัม หลังจากคนจนเป็นเนื้อเดียวกันจะนำอาหารเลี้ยงเชื้อมาใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วทำการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 ^{o}C เป็นเวลานาน 15 นาที เทอาหารสูตร PDA ที่เตรียมและนึ่งฆ่าเชื้อแล้วลงในจานเพาะเชื้อและรอจนกระทั่งอาหารวุ้นแข็งตัว เพื่อเตรียมเพาะเชื้อต่อไป

อาหารเหลวเพื่อใช้ในการผลิตเอนไซม์สูตร Production medium ประกอบด้วย

$MgSO_4$	0.1%
CaH_2PO_4	0.5%
$(NH_4)_2SO_4$	0.4%
Comsteep liquor	0.7%
Tween 80	0.2%
เซลลูโลส	3.0%
แร่ธาตุเสริมได้แก่	
$FeSO_4$	0.005%
$ZnSO_4$	0.0014%
$MnSO_4$	0.00156%
$CoCl_2$	0.00366%

เตรียมในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมไว้ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับ pH สุดท้ายของอาหารเลี้ยงเชื้อให้ได้ 5.0 ด้วย 1 N NaOH หรือ HCL ก่อนทำการนึ่งฆ่าเชื้อ

2. การคำนวณหาค่า unit of enzyme ตามวิธีการของ The International Union of Biochemistry

กำหนดให้ 1 หน่วยของเอนไซม์ คือ ปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายซับสเตรตให้เป็นน้ำตาลกลูโคส 1 ไมโครโมล ในเวลา 1 นาที ภายใต้ภาวะที่ใช้ทดสอบ นั่นคือ

1 หน่วยของเอนไซม์ (Unit)

= 1 μM ของซับสเตรตที่ถูกย่อยภายใน 1 นาทีภายใต้สภาวะที่ใช้ทดสอบ

= 1 μM ของปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 1 นาทีภายใต้สภาวะที่ใช้ทดสอบ

= 0.180 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 1 นาทีภายใต้สภาวะที่ใช้ทดสอบ

ในกรณีการคำนวณค่า FPA (filter paper activity) จะได้ว่า

ถ้า 0.180 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 1 นาที มีค่า = 1 หน่วย

1.000 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 60 นาที มีค่า = $\frac{1}{0.180 \times 60}$ = 0.093 หน่วย

สมมุติปริมาณกลูโคส A มิลลิกรัม ที่เกิดขึ้นใน 60 นาที มีค่า

= A x 0.093 หน่วย

จากการทดลองใช้เอนไซม์ 0.5 ml มีน้ำตาลกลูโคส = A x 0.093 หน่วย

ถ้าใช้เอนไซม์ 1.0 ml มีน้ำตาลกลูโคส = $\frac{A \times 0.093}{0.5}$ หน่วย

หรือ $\frac{\text{(มิลลิกรัมกลูโคส) x (0.093)}}{\text{มิลลิกรัมของเอนไซม์}}$ = หน่วย/มล.

การคำนวณค่ากิจกรรมการทำงานของเซลลูเลสที่ผลิตได้

ถ้า 0.180 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 1 นาที มีค่า = 1 หน่วย

1.000 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 60 นาที มีค่า = $\frac{1}{0.180 \times 60}$ = 0.093 หน่วย

จากการทดลองปริมาณกลูโคส 6.6504 มิลลิกรัม ที่เกิดขึ้นใน 60 นาที มีค่า

= 6.6504 x 0.093 หน่วย

จากการทดลองใช้เอนไซม์ 0.5 ml มีน้ำตาลกลูโคส = 0.618 หน่วย

ถ้าใช้เอนไซม์ 1.0 ml มีน้ำตาลกลูโคส = $\frac{1 \times 0.618}{0.5}$ หน่วย

ดังนั้นเซลลูเลสที่ผลิตได้มีแอคติวีตี 1.23 Unit/ml

หรือเซลลูเลสที่ผลิตได้มีแอคติวีตี 1.23 Unit/g (เซลลูเลส 1 ml หนัก 1 g)

3. การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตแลกเคส

อาหารสูตร (PDA) Potato Dextrose Agar เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตเซลลูเลส ซึ่งประกอบด้วย

มันฝรั่ง	200	กรัม
กลูโคส	20	กรัม
วุ้น	15	กรัม
น้ำกลั่น	1	ลิตร

อาหารเหลวเพื่อใช้ในการผลิตเอนไซม์สูตร Glucose Yeast Peptone (GYP) ประกอบด้วย

Glucose	4 g
Yeast extract	0.5 g
Peptone	0.5 g
KH_2PO_4	0.04 g
K_2HPO_4	0.1 g
$MgSO_4$. $7H_2O$	0.05 g
แร่ธาตุเสริมได้แก่	
$CuSO_4.5H_2O$	600 µl
น้ำกรอง 1000 ลิตร	

เตรียมในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมไว้ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml ปรับ pH สุดท้ายของอาหารเลี้ยงเชื้อให้ได้ 6.5 ด้วย 1 N NaOH หรือ HCL ก่อนทำการนึ่งฆ่าเชื้อ

4. การคำนวณค่ากิจกรรมการทำงานของแลกเคสที่ผลิตได้

เมื่อทำการตรวจวัดค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์แลกเคส ตามวิธีของ Prasongsuk และคณะแล้ว ทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงเป็น 0.950 หาค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์แลกเคส โดยคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{activity (Unit/ml)} = \frac{\Delta A \times 0.001 \times 10^6 \times 1}{\varepsilon \times V \times t} \times 1000$$

$\varepsilon_{420\ nm}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ ABTS ซึ่งเท่ากับ 36,000 M^{-1}. cm^{-1}

ΔA = ผลต่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 nm

t = เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (min)

V = ปริมาตรของเอนไซม์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (µl)

$$= \frac{0.950 \times 0.001 \times 10^6 \times 1}{36000 \times 200 \times 1} \times 1000$$

เอนไซม์มีการเจือจาง 100 เท่า

ดังนั้นแลกเคสที่ผลิตได้มีแอคติวีตี 1.32 Unit/ml

หรือแลกเคสที่ผลิตได้มีแอคติวีตี 1.32 Unit/g (แลกเคส 1 ml หนัก 1 g)

ภาคผนวก ข

การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและการเตรียมเยื่อ

1 วิธีการคำนวณหาปริมาณความชื้น

นำกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าที่ตัดไว้มาทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบ หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้น โดยคำนวณได้จาก

$$\text{ความชื้น (\% moisture content)} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ-น้ำหนักกระดาษหลังอบ}}{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ}} \times 100$$

2 การคำนวณหาน้ำหนักเยื่อแห้ง

กระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 8.36% และน้ำหนักของกระดาษที่นำ มาใช้ในการทดลองต่อ 1 สภาวะมีน้ำหนักที่ยังไม่ได้ลบค่าความชื้นออกเท่ากับ 222 กรัม

น้ำหนักกระดาษ 100 กรัม จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 100 - 8.36 = 91.64 กรัม

ถ้าน้ำหนักกระดาษ 222 กรัม จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ $\frac{222 \times 91.64}{100}$ กรัม

ดังนั้นน้ำหนักเยื่อแห้ง (oven dried pulp weight) คือ 203.44 กรัม

ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในกระดาษคือ 222 – 203.44 = 18.56 กรัม

3 การคำนวณการเติมน้ำให้ได้ 6% consistency ในเครื่องตีเยื่อ

เข้มข้นของเยื่อ (% consistency) ในเครื่องตีเยื่อเท่ากับ 6%

เยื่อแห้ง 6 กรัม มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด 100 กรัม

เยื่อแห้ง 203.44 กรัม มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด = $\frac{203.44 \times 100}{6}$ = 3390.67 ml

เนื่องจากมีปริมาณน้ำอยู่ในกระดาษ 18.56 กรัม ปริมาณน้ำที่ต้องเติม 3390.67 - 18.56 = 3372.11 ml

ดังนั้นปริมาณน้ำที่เติมจริง 3372 ml

4 วิธีการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้

4.1 การคำนวณ Surfactant ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่ง Surfactant เท่ากับ 0.3 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้ง 203.44 กรัม จะต้องชั่ง Surfactant เท่ากับ

$$\frac{203.44 \times 0.3}{100} = 0.61 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้ Surfactant เท่ากับ 0.61 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 203.44 กรัม

4.2 การคำนวณปริมาณเซลลูเลสและแลกแคส

ยกตัวอย่างของภาวะที่มีการใช้ปริมาณเซลลูเลสร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และแลกเคส ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยเซลลูเลสจากเชื้อรา *Aspergillus niger* มีปริมาณแอคติวิตี 1.23 Unit/g และแลกเคสจากเชื้อราเน่าขาวชนิด *Pycnoporus sanguineus* มีปริมาณแอคติวิตี 1.32 Unit/g

4.2.1 การคำนวณเซลลูเลส ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่งเซลลูเลส เท่ากับ 0.2 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้ง 203.44 กรัม จะต้องชั่งเซลลูเลส เท่ากับ

$$\frac{203.44 \times 0.2}{100} = 0.41 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้เซลลูเลส เท่ากับ 0.41 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 203.44 กรัม

4.2.2 การคำนวณแลกเคส ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่งแลกเคส เท่ากับ 0.2 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้ง 203.44 กรัม จะต้องชั่งแลกเคส เท่ากับ

$$\frac{203.44 \times 0.2}{100} = 0.41 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องใช้แลกเคส เท่ากับ 0.41 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 203.44 กรัม

หมายเหตุ การชั่งสารเคมีจะชั่งสารที่ได้ทำการเจือจางไว้แล้วเพื่อลดความผิดพลาดจากการชั่งสารในปริมาณน้อยๆ

5 การคำนวณการเติมน้ำให้ได้ 0.8% consistency

เยื่อแห้ง 0.8 กรัม มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด 100 กรัม

เยื่อแห้ง 203.44 กรัม มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด = $\frac{203.44 \times 100}{0.8}$ = 25430 กรัม

น้ำหนักรวมเดิมในเครื่องตีเยื่อ = น้ำหนักกระดาษปกติ + น้ำหนักน้ำ

= 203.44 + 3372 = 3575.44 กรัม (น้ำ 1 ml หนัก 1 g)

ฉะนั้นต้องเติมน้ำ = น้ำหนักน้ำเยื่อทั้งหมด – น้ำหนักรวมเดิมในเครื่องตีเยื่อ

= 25430 – 3575.44 = 21854.56 ml

ดังนั้นปริมาณน้ำที่เติมจริง 21855 ml

6 วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร ในการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อและในการหาจะตวงน้ำเยื่อก่อนและหลังการลอยฟองอากาศซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 0.8% ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในกระบวนการลอยฟองอากาศคือ ร้อยละ 0.8

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ คือ 1000 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องลอยฟองอากาศ

$$0.3 \times 1000 = 0.8 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{0.3 \times 1000}{0.8}$$

$$V_2 = 375 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 0.8 มา 375 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

7 วิธีการคำนวณน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ถ้าจะทำการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับดังนี้

แผ่นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 60 กรัมถ้าแผ่นทดสอบมีขนาด 0.0315 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ 60×0.0315 = 1.89 กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 1.89 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร แต่ละภาวะจะทำการขึ้นแผ่นทดสอบ 15 แผ่น นำปริมาตรน้ำเยื่อที่คำนวณได้จากเครื่องลอยฟองอากาศ มาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นทดสอบ หลังจากนั้นทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น เนื่องจากแผ่นทดสอบขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อ 1.89 กรัม ดังนั้นจะต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 1.89 โดยการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 1.89 ต้องตวงมาจากน้ำเยื่อเท่ากับ $\frac{1.89\times100}{0.3}$ = 630 มิลลิลิตร

ดังนั้นตวงน้ำเยื่อจำนวน 630 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นทดสอบที่มีขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร

8 การคำนวณค่าผลผลิตของเยื่อ

feed = ปริมาตรน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่อง flotation = 24 ลิตร หรือ 24 กิโลกรัม (เนื่องจากน้ำเยื่อเจือจางมากเปรียบเสมือนได้กับน้ำ จึงสมมุติให้มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 กิโลกรัม/ลิตร)น้ำเยื่อ reject ที่ออกมาจากเครื่อง flotation หนัก 1.37 กิโลกรัม

$$\%\text{yield} = \frac{\text{feed} - \text{reject}}{\text{feed}} \times 100$$

$$= \frac{24 - 1.37}{24} \times 100 = 94.29$$

ดังนั้นปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้เท่ากับ 94.29 %

ภาคผนวก ค

ตารางข้อมูลดิบผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% L	Total
0 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	453.52	464.85	467.76	1386.13
Average	45.352	46.485	46.776	46.20433
Variance	0.151262	0.427028	0.014427	0.574308
30 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	456.28	478.24	473.15	1407.67
Average	45.628	47.824	47.315	46.92233
Variance	0.396307	0.24696	0.532539	1.276108
Total				
Count	20	20	20	
Sum	909.8	943.09	940.91	
Average	45.49	47.1545	47.0455	
Variance	0.279421	0.791079	0.335542	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	7.73286	1	7.73286	26.23498841	4.15464E-06	4.019540907
Columns	34.68014	2	17.34007	58.82902046	2.74599E-14	3.168245967
Interaction	3.06523	2	1.532615	5.199646283	0.008606804	3.168245967
Within	15.9167	54	0.294754			
Total	61.39493	59				

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% L	Total
0 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	7837.1	6859.48	7195.88	21892.46
Average	783.71	685.948	719.588	729.7487
Variance	2463.967	796.1318	33.69364	2723.44
30 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	7659.67	6791.75	7188.85	21640.27
Average	765.967	679.175	718.885	721.3423
Variance	1903.929	1088.181	853.1929	2495.26
Total				
Count	20	20	20	
Sum	15496.77	13651.23	14384.73	
Average	774.8385	682.5615	719.2365	
Variance	2151.849	904.641	420.2342	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	1059.997	1	1059.997	0.890866381	0.349446634	4.019540907
Columns	86344.55	2	43172.28	36.28382307	1.02782E-10	3.168245967
Interaction	745.9123	2	372.9562	0.313448279	0.73224304	3.168245967
Within	64251.85	54	1189.849			
Total	152402.3	59				

ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% L	Total
0 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	259.81	263.38	262.5	785.69
Average	25.981	26.338	26.25	26.18967
Variance	1.375877	0.317062	0.739067	0.778617
30 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	259.07	275.87	268.83	803.77
Average	25.907	27.587	26.883	26.79233
Variance	1.556846	6.877512	0.754734	3.34266
Total				
Count	20	20	20	
Sum	518.88	539.25	531.33	
Average	25.944	26.9625	26.5665	
Variance	1.390625	3.818483	0.813034	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	5.448107	1	5.448107	2.812870232	0.099291051	4.019540907
Columns	10.54443	2	5.272215	2.722056952	0.074763971	3.168245967
Interaction	4.382723	2	2.191362	1.131405161	0.330105788	3.168245967
Within	104.5899	54	1.93685			
Total	124.9651	59				

ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% L	Total
0 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	16.87	17.29	18	52.16
Average	1.687	1.729	1.8	1.738667
Variance	0.002757	0.00361	0.002756	0.005081
30 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	16.6	17.39	17.28	51.27
Average	1.66	1.739	1.728	1.709
Variance	0.004711	0.00401	0.003684	0.005113
Total				
Count	20	20	20	
Sum	33.47	34.68	35.28	
Average	1.6735	1.734	1.764	
Variance	0.003729	0.003636	0.004415	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.013202	1	0.013202	3.679432258	0.060381553	4.019540907
Columns	0.085003	2	0.042502	11.84562581	5.42731E-05	3.168245967
Interaction	0.016863	2	0.008432	2.349987097	0.105052874	3.168245967
Within	0.19375	54	0.003588			
Total	0.308818	59				

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% L	Total
0 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	60.99	61.24	60.28	182.51
Average	6.099	6.124	6.028	6.083667
Variance	0.030099	0.032027	0.22484	0.090769
30 นาที-1				
Count	10	10	10	30
Sum	58.82	61.56	60.49	180.87
Average	5.882	6.156	6.049	6.029
Variance	0.069351	0.076938	0.017432	0.063961
Total				
Count	20	20	20	
Sum	119.81	122.8	120.77	
Average	5.9905	6.14	6.0385	
Variance	0.0595	0.051884	0.114877	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	0.044827	1	0.044827	0.596778249	0.443178039	4.019540907
Columns	0.233043	2	0.116522	1.551255122	0.221279461	3.168245967
Interaction	0.197943	2	0.098972	1.317611644	0.276244	3.168245967
Within	4.05618	54	0.075114			
Total	4.531993	59				

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% L	Total
0 นาที-1				
Count	2	2	2	6
Sum	474	485	469	1428
Average	237	242.5	234.5	238
Variance	8	24.5	60.5	32
30 นาที-1				
Count	2	2	2	6
Sum	494	494	480	1468
Average	247	247	240	244.6667
Variance	18	18	72	34.66667
Total				
Count	4	4	4	
Sum	968	979	949	
Average	242	244.75	237.25	
Variance	42	20.91667	54.25	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	133.3333	1	133.3333	3.980099502	0.09306651	5.987377584
Columns	115.1667	2	57.58333	1.718905473	0.256944858	5.14325285
Interaction	17.16667	2	8.583333	0.256218905	0.782029226	5.14325285
Within	201	6	33.5			
Total	466.6667	11				

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออก สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้เซลลูเลสและแลกเคส 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยที่มีระยะเวลาในการพักเยื่อหลังจากการตีกระจายเยื่อ คือ 0 และ 30 นาที ต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อ

Anova: Two-Factor With Replication

SUMMARY	Control	0.2% C	0.2% Lac	Total
0 นาที-1				
Count	2	2	2	6
Sum	194.32	190.03	190.46	574.81
Average	97.16	95.015	95.23	95.80167
Variance	2.8322	0.47045	0.3528	1.847377
30 นาที-1				
Count	2	2	2	6
Sum	190.25	189.46	190.54	570.25
Average	95.125	94.73	95.27	95.04167
Variance	1.53125	0.0338	5.9168	1.558857
Total				
Count	4	4	4	
Sum	384.57	379.49	381	
Average	96.1425	94.8725	95.25	
Variance	2.834892	0.195158	2.0904	

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Sample	1.7328	1	1.7328	0.933511713	0.371265142	5.987377584
Columns	3.402617	2	1.701308	0.916546201	0.449421663	5.14325285
Interaction	2.49125	2	1.245625	0.671055821	0.545746299	5.14325285
Within	11.1373	6	1.856217			
Total	18.76397	11				

ตารางที่ ค-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	10	456.28	45.628	0.396306667
0.20%Cellulase	10	478.24	47.824	0.24696
0.20%Laccase	10	473.15	47.315	0.532538889
0.15%C:0.05%Lac	10	476.33	47.633	0.040867778
0.10%C:0.10%Lac	10	474.3	47.43	0.006133333
0.05%C:0.15%Lac	10	471.53	47.153	0.003267778
0.20%C:0.20%Lac	10	482.56	48.256	0.150248889

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	41.30959	6	6.884931	35.01685893	2.82589E-18	2.246407983
Within Groups	12.38691	63	0.196618			
Total	53.6965	69				

ตารางที่ ค-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	10	7659.67	765.967	1903.928601
0.20%Cellulase	10	6761.75	676.175	1088.180606
0.20%Laccase	10	7188.85	718.885	853.1929167
0.15%C:0.05%Lac	10	6444.11	644.411	74.27125444
0.10%C:0.10%Lac	10	6961.11	696.111	288.4619211
0.05%C:0.15%Lac	10	7061.68	706.168	193.8856622
0.20%C:0.20%Lac	10	6285.82	628.582	405.5633289

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	128594.3	6	21432.38679	31.20690541	4.20615E-17	2.246407983
Within Groups	43267.36	63	686.78347			
Total	171861.7	69				

ตารางที่ ค-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	10	259.07	25.907	1.556845556
0.20%Cellulase	10	275.87	27.587	6.877512222
0.20%Laccase	10	268.83	26.883	0.754734444
0.15%C:0.05%Lac	10	275.18	27.518	0.399128889
0.10%C:0.10%Lac	10	270.98	27.098	0.916351111
0.05%C:0.15%Lac	10	276.41	27.641	0.799765556
0.20%C:0.20%Lac	10	286	28.6	0.898888889

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	40.88751	6	6.814584762	3.908973801	0.002211205	2.246407983
Within Groups	109.829	63	1.743318095			
Total	150.7165	69				

ตารางที่ ค-11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	10	16.6	1.66	0.004711111
0.20%Cellulase	10	17.39	1.739	0.00401
0.20%Laccase	10	17.28	1.728	0.003684444
0.15%C:0.05%Lac	10	18.26	1.826	0.002071111
0.10%C:0.10%Lac	10	17.32	1.732	0.005973333
0.05%C:0.15%Lac	10	18.22	1.822	0.007928889
0.20%C:0.20%Lac	10	18.72	1.872	0.007484444

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.324957	6	0.05416	10.57114974	4.31079E-08	2.246407983
Within Groups	0.32277	63	0.005123			
Total	0.647727	69				

ตารางที่ ค-12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	10	58.82	5.882	0.069351111
0.20%Cellulase	10	61.56	6.156	0.076937778
0.20%Laccase	10	60.49	6.049	0.017432222
0.15%C:0.05%Lac	10	61.28	6.128	0.107928889
0.10%C:0.10%Lac	10	60.92	6.092	0.162128889
0.05%C:0.15%Lac	10	60.76	6.076	0.154537778
0.20%C:0.20%Lac	10	62.57548	6.257548	0.040390657

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.790015	6	0.131669	1.465998429	0.204383426	2.246407983
Within Groups	5.658366	63	0.089815			
Total	6.448381	69				

ตารางที่ ค-13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	494	247	18
0.20%Cellulase	2	494	247	18
0.20%Laccase	2	480	240	72
0.15%C:0.05%Lac	2	506	253	32
0.10%C:0.10%Lac	2	497	248.5	0.5
0.05%C:0.15%Lac	2	487	243.5	24.5
0.20%C:0.20%Lac	2	527	263.5	24.5

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	691.4286	6	115.2381	4.256816	0.039697	3.865969
Within Groups	189.5	7	27.07143			
Total	880.9286	13				

ตารางที่ ค-14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	190.25	95.125	1.53125
0.20%Cellulase	2	189.46	94.73	0.0338
0.20%Laccase	2	190.54	95.27	5.9168
0.15%C:0.05%Lac	2	188.51	94.255	1.36125
0.10%C:0.10%Lac	2	190.37	95.185	1.20125
0.05%C:0.15%Lac	2	193.64	96.82	2.5538
0.20%C:0.20%Lac	2	188.27	94.135	0.04805

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	9.545343	6	1.59089	0.880599	0.553566	3.865969
Within Groups	12.6462	7	1.8066			
Total	22.19154	13				

ตารางที่ ค-15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความยาวของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	2.907	1.4535	0.001201
0.20%Cellulase	2	3.086	1.543	3.2E-05
0.20%Laccase	2	3.016	1.508	0.000162
0.15%C:0.05%Lac	2	3.046	1.523	9.8E-05
0.10%C:0.10%Lac	2	3.076	1.538	7.2E-05
0.05%C:0.15%Lac	2	3.035	1.5175	4.05E-05
0.20%C:0.20%Lac	2	3.184	1.592	0.000578

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.020887	6	0.003481	11.162697	0.002769	3.865969
Within Groups	0.002183	7	0.000312			
Total	0.02307	13				

ตารางที่ ค-16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	67.247	33.6235	0.201613
0.20%Cellulase	2	66.51	33.255	5E-05
0.20%Laccase	2	66.663	33.3315	3.556445
0.15%C:0.05%Lac	2	66.497	33.2485	0.122513
0.10%C:0.10%Lac	2	66.683	33.3415	0.005725
0.05%C:0.15%Lac	2	66.472	33.236	0.040328
0.20%C:0.20%Lac	2	64.428	32.214	0.009248

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	2.384643	6	0.397441	0.706844	0.655778	3.865969
Within Groups	3.93592	7	0.562274			
Total	6.320563	13				

ตารางที่ ค-17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความโค้งงอของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	0.168	0.084	0.000002
0.20%Cellulase	2	0.182	0.091	0.000002
0.20%Laccase	2	0.179	0.0895	4.5E-06
0.15%C:0.05%Lac	2	0.179	0.0895	5E-07
0.10%C:0.10%Lac	2	0.182	0.091	0.000018
0.05%C:0.15%Lac	2	0.174	0.087	0.000002
0.20%C:0.20%Lac	2	0.184	0.092	0.000002

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	9.27E-05	6	1.55E-05	3.489247	0.063367	3.865969
Within Groups	3.1E-05	7	4.43E-06			
Total	0.000124	13				

ตารางที่ ค-18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าดรรชนีการหักงอของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	3.249	1.6245	2.45E-05
0.20%Cellulase	2	3.438	1.719	0.001568
0.20%Laccase	2	3.29	1.645	0.001922
0.15%C:0.05%Lac	2	3.401	1.7005	4.05E-05
0.10%C:0.10%Lac	2	3.44	1.72	0.00405
0.05%C:0.15%Lac	2	3.359	1.6795	0.001201
0.20%C:0.20%Lac	2	3.433	1.7165	4.5E-06

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.017779	6	0.002963	2.354445	0.143662	3.865969
Within Groups	0.00881	7	0.001259			
Total	0.026589	13				

ตารางที่ ค-19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของการทดลองที่มีการใช้ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ต่างๆ กันที่มีต่อค่าความกว้างของเส้นใยหลังการกำจัดหมึกออก

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*
Control	2	39.027	19.5135	0.017113
0.20%Cellulase	2	38.94	19.47	0.019208
0.20%Laccase	2	38.814	19.407	0.013448
0.15%C:0.05%Lac	2	38.782	19.391	0.023328
0.10%C:0.10%Lac	2	39.056	19.528	0.008978
0.05%C:0.15%Lac	2	39.04	19.52	0.004418
0.20%C:0.20%Lac	2	39.09	19.545	0.032258

ANOVA

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.045142	6	0.007524	0.443502	0.829382	3.865969
Within Groups	0.118751	7	0.016964			
Total	0.163893	13				

ภาคผนวก ง

ข้อมูลดิบของผลการทดลอง

ตารางที่ ง-1 ค่าความขาวสว่าง (brightness) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	Brightness (%) ก่อน Flotation ±S.D			Brightness (%)หลัง Flotation ±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	44.21 ±0.08	43.13 ±0.37	43.67 ±0.62	45.68 ±0.16	45.02 ±0.2	45.35 ±0.39
0-0-30(Control)	44.13 ±0.24	43.14 ±0.06	43.64 ±0.55	46.02 ±0.65	45.24 ±0.29	45.63 ±0.63
0.2-0-0	44.12 ±0.09	43.87 ±0.62	44.00 ±0.44	46.30 ±0.89	46.67 ±0.29	46.49 ±0.65
0.2-0-30	44.16 ±0.22	43.51 ±0.06	43.84 ±0.37	48.28 ±0.16	47.37 ±0.1	47.83 ±0.50
0-0.2-0	43.59 ±0.27	43.71 ±0.3	43.65 ±0.28	46.79 ±0.17	46.76 ±0.04	46.78 ±0.12
0-0.2-30	43.20 ±0.08	43.33 ±0.07	43.27 ±0.37	47.87 ±0.41	46.76 ±0.49	47.32 ±0.73
0.15-0.05-30	44.78 ±0.26	44.89 ±0.06	44.84 ±0.19	47.61 ±0.29	47.66 ±0.03	47.64 ±0.20
0.1-0.1-30	44.64 ±0.08	44.81 ±0.03	44.73 ±0.11	47.39 ±0.08	47.47 ±0.03	47.43 ±0.08
0.05-0.15-30	44.76 ±0.07	44.73 ±0.07	44.74 ±0.07	47.17 ±0.06	47.13 ±0.05	47.15 ±0.06
0.2-0.2-30	44.88 ±0.12	44.78 ±0.04	44.83 ±0.10	48.47 ±0.16	48.05 ±0.44	48.26 ±0.39

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-2 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ในเยื่อ ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	ERIC ก่อน Flotation±S.D			ERIC หลัง Flotation ±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	1009.34 ±11.34	1140.53 ±14.74	1074.94 ±70.25	767.99 ±9.60	799.43 ±69.52	783.71 ±49.64
0-0-30 (Control)	1042.26 ±18.39	1172.52 ±3.03	1107.39 ±69.77	756.04 ±13.65	775.90 ±62.05	765.97 ±43.63
0.2-0-0	1033.63 ±38.54	1177.45 ±11.19	1105.54 ±80.39	700.82 ±34.32	671.08 ±7.75	685.95 ±28.21
0.2-0-30	1055.01 ±7.77	1129.60 ±3.86	1092.31 ±39.74	672.32 ±5.06	686.03 ±48.01	676.18 ±32.99
0-0.2-0	1026.42 ±8.00	1207.13 ±13.28	1116.78 ±95.81	714.93 ±3.03	724.25 ±3.51	719.59 ±5.80
0-0.2-30	1137.16 ±7.07	1173.66 ±6.11	1155.41 ±20.22	702.83 ±14.07	734.93 ±32.83	718.88 ±29.21
0.15-0.05-30	1035.24 ±5.54	1060.69 ±4.54	1047.97 ±14.24	642.87 ±8.75	645.95 ±9.18	644.41 ±8.62
0.1-0.1-30	1109.13 ±9.99	1084.78 ±12.39	1096.96 ±16.66	702.98 ±11.36	689.24 ±20.04	696.11 ±16.98
0.05-0.15-30	1142.61 ±8.86	1135.84 ±4.15	1139.23 ±7.44	710.38 ±14.19	701.96 ±13.80	706.17 ±13.92
0.2-0.2-30	1063.74 ±36.56	1080.26 ±22.83	1072.00 ±30.03	623.86 ±28.95	633.31 ±4.25	628.58 ±20.14

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-3 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออก เมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	Tensile ก่อน Flotation (Nm/g) ±S.D			Tensile (Nm/g) หลัง Flotation ±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	25.40 ±0.40	24.14 ±0.82	24.77 ±1.09	26.81 ±0.77	25.15 ±0.55	25.98 ±1.17
0-0-30 (Control)	25.19 ±1.17	24.26 ±0.63	24.73 ±0.73	26.97 ±1.37	24.84 ±0.57	25.91 ±1.25
0.2-0-0	24.85 ±1.00	24.63 ±0.49	24.53 ±0.56	26.14 ±0.23	26.53 ±0.75	26.34 ±0.56
0.2-0-30	24.59 ±1.51	24.55 ±0.50	24.57 ±0.35	28.10 ±3.76	27.07 ±0.79	27.59 ±2.62
0-0.2-0	24.75 ±0.56	24.64 ±0.66	24.70 ±0.59	26.20 ±0.75	26.29 ±1.05	26.25 ±0.86
0-0.2-30	23.65 ±1.22	23.46 ±0.44	23.56 ±0.68	27.05 ±1.45	26.71 ±1.08	26.88 ±0.87
0.15-0.05-30	25.05 ±0.48	25.16 ±0.45	25.10 ±0.45	27.13 ±0.46	27.91 ±0.54	27.52 ±0.63
0.1-0.1-30	25.52 ±1.54	24.86 ±1.20	25.19 ±1.35	27.34 ±0.86	26.85 ±1.14	27.19 ±0.96
0.05-0.15-30	25.84 ±1.74	25.93 ±0.49	25.89 ±1.21	27.42 ±1.11	27.86 ±0.64	27.64 ±0.89
0.2-0.2-30	26.17 ±0.96	26.97 ±0.59	26.57 ±0.87	28.57 ±0.76	28.64 ±1.17	28.61 ±0.95

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-4 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	Burst (kPa m^2/g) ก่อน Flotation ±S.D			Burst (kPa m^2/g) หลัง Flotation ±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	1.62 ±0.13	1.56 ±0.03	1.59 ±0.06	1.69 ±0.10	1.68 ±0.06	1.69 ±0.05
0-0-30 (Control)	1.63 ±0.04	1.56 ±0.01	1.60 ±0.09	1.69 ±0.05	1.63 ±0.07	1.66 ±0.07
0.2-0-0	1.65 ±0.07	1.71 ±0.02	1.68 ±0.06	1.71 ±0.07	1.76 ±0.03	1.74 ±0.06
0.2-0-30	1.65 ±0.06	1.61 ±0.04	1.63 ±0.04	1.79 ±0.10	1.69 ±0.03	1.74 ±0.06
0-0.2-0	1.68 ±0.07	1.69 ±0.04	1.69 ±0.06	1.78 ±0.05	1.82 ±0.05	1.80 ±0.05
0-0.2-30	1.67 ±0.05	1.64 ±0.06	1.66 ±0.05	1.71 ±0.12	1.73 ±0.07	1.72 ±0.06
0.15-0.05-30	1.63 ±0.03	1.64 ±0.09	1.64 ±0.06	1.84 ±0.03	1.82 ±0.05	1.83 ±0.05
0.1-0.1-30	1.66 ±0.07	1.71 ±0.06	1.69 ±0.08	1.72 ±0.05	1.75 ±0.09	1.74 ±0.08
0.05-0.15-30	1.68 ±0.04	1.69 ±0.07	1.69 ±0.08	1.84 ±0.05	1.80 ±0.03	1.82 ±0.09
0.2-0.2-30	1.71 ±0.03	1.72 ±0.05	1.72 ±0.05	1.84 ±0.07	1.91 ±0.09	1.88 ±0.09

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-5 ค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	Tear (mN m^2/g) ก่อน Flotation ±S.D			Tear (mN m^2/g) หลัง Flotation±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	5.69 ±0.18	5.88 ±0.17	5.79 ±0.21	6.22 ±0.12	5.98 ±0.13	6.10 ±0.17
0-0-30 (Control)	5.61 ±0.18	5.80 ±0.17	5.71 ±0.16	5.76 ±0.13	6.00 ±0.30	5.88 ±0.26
0.2-0-0	5.67 ±0.20	5.73 ±0.23	5.70 ±0.21	6.03 ±0.13	6.22 ±0.17	6.13 ±0.18
0.2-0-30	5.97 ±0.21	5.63 ±0.19	5.80 ±0.22	6.23 ±0.53	6.08 ±0.14	6.16 ±0.28
0-0.2-0	5.58 ±0.20	5.67 ±0.13	5.63 ±0.17	6.08 ±0.57	5.98 ±0.41	6.03 ±0.47
0-0.2-30	5.55 ±0.19	5.84 ±0.14	5.70 ±0.19	6.01 ±0.78	6.09 ±0.11	6.05 ±0.13
0.15-0.05-30	5.80 ±0.20	5.79 ±0.17	5.80 ±0.18	6.07 ±0.30	6.18 ±0.37	6.13 ±0.32
0.1-0.1-30	5.61 ±0.20	5.72 ±0.44	5.67 ±0.33	6.01 ±0.30	6.17 ±0.50	6.09 ±0.40
0.05-0.15-30	5.85 ±0.33	5.93 ±0.28	5.89 ±0.30	6.15 ±0.54	6.00 ±0.20	6.07 ±0.39
0.2-0.2-30	5.86 ±0.11	5.97 ±0.17	5.92 ±0.15	6.30 ±0.22	6.22 ±0.18	6.26 ±0.20

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-6 ค่าสภาพระบายได้ (freeness) ของเยื่อ ก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	Freeness (ml) ก่อน Flotation ±S.D			Freeness (ml) หลัง Flotation ±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	237	233	235±2.82	239	235	237±2.82
0-0-30 (Control)	234	228	231±4.24	250	244	247±4.24
0.2-0-0	234	230	232±2.82	246	239	243±4.94
0.2-0-30	237	227	232±7.07	250	244	247±4.24
0-0.2-0	224	230	227±4.24	240	229	235±7.77
0-0.2-30	218	209	214±6.36	246	234	240±8.48
0.15-0.05-30	239	241	240±1.41	257	249	253±5.65
0.1-0.1-30	242	242	242±0.00	248	249	249±0.70
0.05-0.15-30	238	238	238±0.00	247	240	244±4.94
0.2-0.2-30	253	243	248±7.07	267	260	264±4.94

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-7 ค่าปริมาณผลผลิตของเยื่อที่ได้ (yield) เมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

C-Lac-Time	Yield ±S.D		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0-0-0 (Control)	98.35	95.97	97.16±1.68
0-0-30 (Control)	96.00	94.25	95.13±1.23
0.2-0-0	95.50	94.53	95.02±0.68
0.2-0-30	94.60	94.86	94.73±0.18
0-0.2-0	95.65	94.81	95.23±0.59
0-0.2-30	93.55	96.99	95.27±2.43
0.15-0.05-30	93.43	95.08	94.26±1.16
0.1-0.1-30	95.96	94.41	95.19±1.09
0.05-0.15-30	97.95	95.69	96.82±1.59
0.2-0.2-30	94.29	93.98	94.14±0.21

หมายเหตุ: C คือ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

Lac คือ ปริมาณแลกเคสที่ใช้ (ร้อยละ) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

Time คือ ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (นาที)

ตารางที่ ง-8 ค่าเฉลี่ยลักษณะสันฐานวิทยาของเส้นใยก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกเมื่อใช้ตัวแปรในระดับต่างๆ

Condition	ก่อน flotation	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร±S.D)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%±S.D)	ดรรชนีความโค้งงอของเส้นใย±S.D	ดรรชนีความหักงอของเส้นใย ±S.D	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร±S.D)
Control		1.369±0.04	35.85±0.50	0.091±0.001	1.704±0.02	19.53±0.71
0.20%Cellulase		1.460±0.05	35.24±0.47	0.092±0.003	1.735±0.03	19.47±0.28
0.20%Laccase		1.476±0.09	35.83±1.07	0.090±0.002	1.704±0.07	19.41±0.27
0.15%C:0.05%Lac		1.454±0.01	34.83±0.42	0.091±0.001	1.717±0.02	19.43±0.05
0.10%C:0.10%Lac		1.515±0.00	34.70±1.08	0.097±0.003	1.782±0.02	19.59±0.19
0.05%C:0.15%Lac		1.494±0.03	34.54±0.93	0.089±0.005	1.691±0.08	19.66±0.10
0.20%C:0.20%Lac		1.550±0.07	33.46±1.03	0.093±0.004	1.722±0.00	19.65±0.31
Condition	หลัง flotation	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร±S.D)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%±S.D)	ดรรชนีความโค้งงอของเส้นใย±S.D	ดรรชนีความหักงอของเส้นใย±S.D	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร±S.D)
Control		1.454±0.04	33.62±0.42	0.084±0.001	1.624±0.02	19.51±0.19
0.20%Cellulase		1.543±0.01	33.25±0.02	0.091±0.001	1.719±0.03	19.47±0.21
0.20%Laccase		1.508±0.06	33.33±1.82	0.089±0.002	1.645±0.04	19.40±0.13
0.15%C:0.05%Lac		1.523±0.01	33.24±0.32	0.090±0.002	1.701±0.02	19.39±0.16
0.10%C:0.10%Lac		1.538±0.01	33.34±0.15	0.091±0.004	1.720±0.06	19.53±0.26
0.05%C:0.15%Lac		1.517±0.07	33.23±0.43	0.087±0.001	1.679±0.04	19.52±0.21
0.20%C:0.20%Lac		1.592±0.04	32.21±0.41	0.092±0.003	1.717±0.33	19.54±0.35

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาววัจนา พัสดุ สถานที่เกิด โรงพยาบาลคริสเตียน จังหวัดฉะเชิงเทรา

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ (สัตวบาล) คณะวิทยาศาตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาปี 2550
- ปริญญาศิลปศาสตรบัณฑิต สาขาวิชารัฐศาสตร์ คณะรัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง สำเร็จการศึกษาปี 2551

ผลงานวิชาการ

วัจนา พัสดุ, สีหนาท ประสงค์สุข และสมพร ชัยอารีย์กิจ. (2553). การใช้เซลลูเลสร่วมกับแลกเคสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ. การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 20 ประจำปี 2553 “พัฒนาสังคมไทยด้วยงานวิจัยเชิงสร้างสรรค์”. 16-18 กันยายน 2553. ณ โรงแรม เจ บี หาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. นำเสนอผลงานในภาคบรรยาย.