

การใช้อะไมเลสและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกฟลิกโซกราฟีฐานน้ำจากกระดาษหนังสือพิมพ์ด้วย
วิธีการลอยฟองอากาศ

รัฐศาสตร์ ติเพียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

USE OF AMYLASE AND CELLULASE IN FLOTATION DEINKING OF FLEXOGRAPHIC
WATER-BASED INK FROM NEWSPRINT

Mr.Rattasart Tipian

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

รัฐศาสตร์ ติเพียร : การใช้อะไมเลสและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกเพล็กโซกราฟีฐานน้ำ
จากกระดาษหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ(USE OF AMYLASE AND
CELLULASE IN FLOTATION DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED
INK FROM NEWSPRINT)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. สีนันท ประสงค์สุข, 170 หน้า.

หมึกพิมพ์เพล็กโซกราฟีฐานน้ำนั้น วิธีการกำจัดหมึกที่เหมาะสมคือการล้าง เนื่องจาก
หมึกพิมพ์มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งข้อเสียของการกำจัดหมึกโดยวิธีนี้คือ ใช้น้ำปริมาณมากและ
ได้ผลผลิตต่ำ จึงมีความพยายามใช้วิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศแทน
โดยปรับภาวะในการตีกระจายเยื่อให้มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วงกลางหรือกรดอ่อน ทั้งนี้
เพื่อให้อนุภาคหมึกพิมพ์มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถนำไปกำจัดออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศได้ แต่
วิธีการดังกล่าวยังให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกพิมพ์เพล็กโซกราฟีฐานน้ำไม่สูงนัก อย่างไรก็ตาม
ตามการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้โดยมีการ
ใช้เอนไซม์ร่วมด้วย งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะใช้อะไมเลส และเซลลูเลสช่วยในการกำจัด
หมึกเพล็กโซกราฟีฐานน้ำออกจากกระดาษ โดยใช้เอนไซม์ที่เตรียมได้เองจากเชื้อรา *Aspergillus
niger* ในการทดลองมีการใช้เซลลูเลส 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
และใช้อะไมเลส 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการทดลองพบว่า
การใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกดีขึ้นกว่าการทดลองที่ไม่ใช้
เอนไซม์ โดยเซลลูเลสให้ผลการทดลองดีกว่าอะไมเลส เนื่องจากค่าความขาวสว่างสูงกว่า ปริมาณ
หมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อน้อยกว่า ความยาวของเส้นใยสูงกว่า และความแข็งแรงต่อแรงดึง รวมถึง
ความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าส่วนอีกการทดลอง คือมีการใช้อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลสโดยเลือก
ภาวะที่ดีที่สุดของอะไมเลสกับเซลลูเลสมาใช้ร่วมกัน พบว่าการใช้อะไมเลสก่อนแล้วจึงใช้เซลลู
เลสตาม จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยให้ค่าผลการทดลองสูงกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ.....ลายมือชื่อนิติ.....

ปีการศึกษา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

รัฐศาสตร์ ติเพียร : การใช้อะไมเลสและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกเพล็กโซกราฟีฐานน้ำ
จากกระดาษหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ(USE OF AMYLASE AND
CELLULASE IN FLOTATION DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED
INK FROM NEWSPRINT)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. สีนันทา ประสงค์สุข, 170 หน้า.

หมึกพิมพ์เพล็กโซกราฟีฐานน้ำนั้น วิธีการกำจัดหมึกที่เหมาะสมคือการล้าง เนื่องจาก
หมึกพิมพ์มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งข้อเสียของการกำจัดหมึกโดยวิธีนี้คือ ใช้น้ำปริมาณมากและ
ได้ผลผลิตต่ำ จึงมีความพยายามใช้วิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศแทน
โดยปรับภาวะในการตีกระจายเยื่อให้มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วงกลางหรือกรดอ่อน ทั้งนี้
เพื่อให้อนุภาคหมึกพิมพ์มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถนำไปกำจัดออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศได้ แต่
วิธีการดังกล่าวยังให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกพิมพ์เพล็กโซกราฟีฐานน้ำไม่สูงนัก อย่างไรก็ตาม
ตามการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้โดยมีการ
ใช้เอนไซม์ร่วมด้วย งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะใช้อะไมเลส และเซลลูเลสช่วยในการกำจัด
หมึกเพล็กโซกราฟีฐานน้ำออกจากกระดาษ โดยใช้เอนไซม์ที่เตรียมได้เองจากเชื้อรา *Aspergillus
niger* ในการทดลองมีการใช้เซลลูเลส 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
และใช้อะไมเลส 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการทดลองพบว่า
การใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกดีขึ้นกว่าการทดลองที่ไม่ใช้
เอนไซม์ โดยเซลลูเลสให้ผลการทดลองดีกว่าอะไมเลส เนื่องจากค่าความขาวสว่างสูงกว่า ปริมาณ
หมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อน้อยกว่า ความยาวของเส้นใยสูงกว่า และความแข็งแรงต่อแรงดึง รวมถึง
ความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าส่วนอีกการทดลอง คือมีการใช้อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลสโดยเลือก
ภาวะที่ดีที่สุดของอะไมเลสกับเซลลูเลสมาใช้ร่วมกัน พบว่าการใช้อะไมเลสก่อนแล้วจึงใช้เซลลู
เลสตาม จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยให้ค่าผลการทดลองสูงกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ.....ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ อาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำอีกท่านหนึ่ง ที่ได้สละเวลาชี้แนะและให้ คำปรึกษาถึงแนวทางในการทำงานวิจัยและเขียนอ้อมวิทยานิพนธ์ และการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาล คุร์พิพัฒน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาดำเนินการสอบ ให้คำแนะนำ รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในการช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องพิมพ์เพลทโซกราฟี บริษัท เฉลิมชัยชาญ จำกัด ในการอนุเคราะห์หมึกพิมพ์เพลทโซกราฟี สุวาน้ำ บริษัท ดับบลิวพีเอส (ประเทศไทย) จำกัด ในการอนุเคราะห์กระดาษขี้ผึ้ง

ขอขอบคุณหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ และภาควิชาพฤกษศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่อง

ขอขอบคุณพี่สมชาย ภวชินวร และ พี่ๆ เพื่อนๆ ในหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ และภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาการศึกษา จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ คุณพ่อ และครอบครัว ที่คอยเลี้ยงดู เป็นกำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
กระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษ (Deinking process).....	6
เคมีของการลอยฟองอากาศ (Deinking chemistry).....	12
สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ (Deinking chemicals).....	15
การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก (Ink redeposition).....	21
หมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำกับการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ.....	22
เคมีของเส้นใย.....	23
สารเคลือบผิว (Sizing agent).....	25
เอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดหมึก(Enzyme).....	26
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	30
อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
วิธีในการทดสอบสมบัติต่างๆของกระดาษ.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	50
ผลการการให้คะแนนโพลและเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	51
- ความขาวสว่าง(Brightness).....	51
- ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective Residual Ink Content, ERIC).....	53
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index).....	55
- ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index).....	57
- สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness).....	59
- ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (yield).....	61
- ความยาวของเส้นใย(fiber length).....	62
- ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fine content).....	64
- ความโค้งงอของเส้นใย (mean curl).....	66
- ดรรชนีการหักงอของเส้นใย (kink index).....	67
- ความกว้างของเส้นใย (fiber width).....	67
ผลการการให้คะแนนโพลร่วมกับเซลลูโลสในภาวะที่ต่างกัน.....	70
- ความขาวสว่าง(Brightness).....	70
- ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective Residual Ink Content, ERIC).....	71
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index).....	72
- ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index).....	73
- สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness).....	74
- ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (yield).....	75
- ความยาวของเส้นใย(fiber length).....	76
- ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fine content).....	77
- ความโค้งงอของเส้นใย (mean curl).....	78
- ดรรชนีการหักงอของเส้นใย (kink index).....	78

ความกว้างของเส้นใย (fiber width).....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	80
สรุปผลการวิจัย.....	80
ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและเตรียมเยื่อ.....	86
ภาคผนวก ข การเตรียมอาหารและวิธีการเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตเอนไซม์.....	89
ภาคผนวก ค ตารางข้อมูลและผลวิเคราะห์ทางสถิติ.....	93
ภาคผนวก ง ข้อมูลดิบการทดลอง.....	159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	170

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4-1	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก	51
4-2	ค่าทางสถิติของความขาวสว่างจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	52
4-3	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการกำจัดหมึก.....	53
4-4	ค่าทางสถิติของปริมาณหมึกที่เหลืออยู่จากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	54
4-5	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการกำจัดหมึก.....	55
4-6	ค่าทางสถิติของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	56
4-7	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการกำจัดหมึก.....	57
4-8	ค่าทางสถิติของดัชนีความต้านทานแรงฉีกจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	58
4-9	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึก.....	59
4-10	ค่าทางสถิติของสภาพระบายได้ของเยื่อจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	60
4-11	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อเยื่อหลังการกำจัดหมึก.....	61
4-12	ค่าทางสถิติของปริมาณผลผลิตของเยื่อจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	61
4-13	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความยาวของเส้นใยเฉลี่ยหลังการกำจัดหมึก.....	62

4-14	ค่าทางสถิติของความยาวของเส้นใยเฉลี่ยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆ ของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	63
4-15	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัด หมึก.....	64
4-16	ค่าทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะ ไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	65
4-17	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความโค้งงอของเส้นใยหลังการกำจัด หมึก.....	66
4-18	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อดรรชนีการหักงอของเส้นใยหลังการ กำจัดหมึก.....	66
4-19	ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ยหลังการ กำจัดหมึก.....	67
4-20	ค่าทางสถิติของความโค้งงอของเส้นใยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะ ไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	68
4-21	ค่าทางสถิติของดรรชนีการหักงอของเส้นใยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆ ของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	68
4-22	ค่าทางสถิติของความกว้างของเส้นใยเฉลี่ยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆ ของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม.....	69
4-23	ค่าทางสถิติของสมบัติต่างๆของเยื่อและแผ่นทดสอบจากการทดลองการ ใช้อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลสในภาวะที่ต่างกัน.....	70
4-24	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก.....	70
4-25	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการกำจัดหมึก...	71
4-26	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการกำจัด หมึก.....	72
4-27	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการกำจัด หมึก.....	73
4-28	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อสภาพระบายไ้ของเยื่อก่อนและหลังการ กำจัดหมึก.....	74
4-29	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อหลังการกำจัดหมึก....	75

4-30	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความยาวของเส้นใยเฉลี่ยหลังการกำจัด หมึก.....	76
4-31	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัด หมึก.....	77
4-32	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความโค้งงอของเส้นใยหลังการกำจัด หมึก.....	78
4-33	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อ दरชนีการหักงอของเส้นใยหลังการกำจัด หมึก.....	78
4-34	ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ยหลังการกำจัด หมึก.....	79

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	เครื่องตีกระจายเยื่อ.....	7
2-2	เครื่องกรองเยื่อ.....	8
2-3	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning และ Forward cleaning.....	9
2-4	การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง.....	10
2-5	การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ.....	11
2-6	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหมึกพิมพ์และวิธีที่ใช้ในการกำจัด.....	13
2-7	การไหลของอนุภาคหมึกตามแนวเส้นกระแส.....	14
2-8	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	19
2-9	ลักษณะของ Micelle.....	20
2-10	ลักษณะการทำงานของสารรวบรวม.....	20
2-11	ลักษณะการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก.....	22
2-12	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	24
2-13	โครงสร้างของลิกนิน	24
3-1	เครื่องวัดความชื้น (moisture balance).....	33
3-2	เซ็นเซอร์ที่เจริญอยู่บนอาหารสูตร PDA ในการเตรียมอะไมเลส.....	34
3-3	เซ็นเซอร์ที่เจริญอยู่บนอาหารสูตร PDA ในการเตรียมเซลลูเลส.....	35
3-4	เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA).....	42
3-5	เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness tester).....	43
3-6	เครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell).....	44
3-7	เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (rapid-Kothen sheet former).....	45
3-8	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Technidyne color touch PC).....	47
3-9	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index).....	48
3-10	เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (tear resistance).....	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอัตราการใช้กระดาษในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตกระดาษเพื่อสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มขึ้น การนำกระดาษที่ใช้แล้วกลับมาผลิตเป็นกระดาษเพื่อนำไปใช้ใหม่ หรือที่เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการรีไซเคิลกระดาษ จึงกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะนอกจากช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากปริมาณขยะและการตัดไม้ทำลายป่าแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตกระดาษ เนื่องจากช่วยลดพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการรีไซเคิลกระดาษจึงเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ผลิตกระดาษได้ อย่างไรก็ตาม การนำกระดาษที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษใหม่นั้นควรมีการกำจัดหมึกออกก่อน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของกระดาษสำหรับกระดาษที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำนั้น วิธีการกำจัดหมึกที่เหมาะสม คือ การล้าง เนื่องจากหมึกพิมพ์มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งข้อเสียของการกำจัดหมึกโดยวิธีการล้างคือ ใช้น้ำปริมาณมากและได้ผลผลิตต่ำ ดังนั้นจึงมีความพยายามใช้วิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศแทน โดยปรับภาวะในการตีกระจายเยื่อให้มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วงกลางหรือกรดอ่อน ทั้งนี้เพื่อให้อนุภาคหมึกพิมพ์มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถนำไปกำจัดออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศได้ แต่วิธีการดังกล่าวยังให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำไม่สูงนัก

อย่างไรก็ตามด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีชีวภาพ ทำให้มีการนำเอนไซม์มาใช้ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ระบบต่างๆ มากขึ้น เช่น การใช้อะไมเลสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกโทนเนอร์ ซึ่งพบว่าอะไมเลสจะไปย่อยสลายแป้งที่เคลือบอยู่ที่ผิวหน้ากระดาษ ทำให้หมึกพิมพ์ที่อยู่บนผิวกระดาษหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น การใช้เซลลูเลส เฮมิเซลลูเลส รวมถึงแลกเคสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ ซึ่งพบว่าการใช้เอนไซม์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดหมึก รวมถึงเพิ่มสมบัติต่างๆ ของกระดาษ เช่น ความขาวสว่างและความแข็งแรงได้ ทั้งนี้เนื่องจากเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลสจะไปย่อยสลายหรือตัดพันธะของน้ำตาลที่ต่อเรียงกันเป็น

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย ในขณะที่แล็กเคสจะไปตัดสายโซ่ของลิกนินในเส้นใย จึงทำให้หมึกหลุดออกจากผิวหน้าของเส้นใยและถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้มีความสนใจทดลองนำอะไมเลสมาใช้ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเพลติกโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยเปรียบเทียบกับการใช้เซลลูเลส ซึ่งเอนไซม์ทั้งสองชนิดเป็นเอนไซม์ที่เตรียมเองในห้องทดลองจากเชื้อรา *Aspergillus niger* ทั้งนี้เพื่อดูว่าเอนไซม์ชนิดไหนมีประสิทธิภาพมากกว่ากันในการกำจัดดังกล่าวด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลส ที่เตรียมเองได้จากเชื้อรา *Aspergillus niger* ต่อประสิทธิภาพหลังการกำจัดหมึกเพลติกโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของอะไมเลสและเซลลูเลส ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกพิมพ์เพลติกโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองควบคุม ซึ่งเป็นการทดลองที่ไม่มีการใส่เอนไซม์ มีการใช้ค่าความเป็นกรด-เบส ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่ออยู่ในช่วงกรด คือ $\text{pH } 5.0 \pm 0.2$ และใช้อุณหภูมิ 50°C เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที และพักเยื่ออีก 30 นาที สำหรับการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองที่มีการใส่อะไมเลสและเซลลูเลส ที่ 3 ความเข้มข้น คือ 0.1, 0.2, 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ใช้ค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิ เวลาในการตีกระจายเยื่อและพักเยื่อเหมือนกับการทดลองที่ 1 สำหรับการทดลองที่ 3 ใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกัน โดยเลือกจากความเข้มข้นของเอนไซม์ในภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาใช้ร่วมกันใน 3 ภาวะ คือ ใช้อะไมเลสก่อน 30 นาทีในการตีกระจายเยื่อ แล้วจึงใช้เซลลูเลสอีก 30 นาที, ใช้เซลลูเลสก่อน 30 นาที แล้วจึงใช้อะไมเลสอีก 30 นาที และใช้ทั้งอะไมเลสและเซลลูเลสพร้อมกัน 60 นาทีในการตีกระจายเยื่อ โดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิเหมือนกับการทดลองที่ 1

สำหรับตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกพิมพ์เพลติกโซกราฟีฐานน้ำ

ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยในแต่ละสภาวะจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลสถิติ

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

เซลลูโลส (cellulose) คือกลุ่มของเอนไซม์เชิงซ้อน (complex enzymes) ที่ทำงานร่วมกันในการย่อยสลายเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใย โดยเซลลูโลสประกอบด้วยเอนไซม์ 3 กลุ่มหลักได้แก่ เอกโซกลูคาเนส (exoglucanase) เอนโดกลูคาเนส (endoglucanase) และเบต้า-กลูโคซิเดส (β -glucosidase) โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือ น้ำตาลกลูโคส เซลลูโลสสามารถผลิตได้จากเชื้อรา แบคทีเรีย และแอคโตนิมัยซิส โดยเชื้อราจะสะดวกต่อการแยกสกัดเอนไซม์มากกว่า

อะไมเลส (amylase) เป็น เอนไซม์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายแป้ง (starch) ให้มีโมเลกุลเล็กลง ทำให้ได้น้ำตาลเช่น กลูโคส (glucose) มอลโตส (maltose) และ เด็กซ์ตริน (dextrin) โดยอะไมเลสประกอบด้วยเอนไซม์ 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เบต้าอะไมเลส (β -amylase) จะตัดแป้งที่พันธะไกลโคซิลที่ตำแหน่ง แอลฟา 1-4 เฉพาะส่วนปลายสายที่ไม่รีดิวซ์ (non reducing end) เข้ามาที่ละ 2 หน่วย ทำให้ได้น้ำตาลมอลโตส แอลฟาอะไมเลส (α -amylase) ซึ่งจะตัดภายในสายโพลีเมอร์ของแป้งที่พันธะไกลโคซิลที่ตำแหน่ง α 1-4 แบบสุ่ม ทำให้ย่อยแป้งเป็นน้ำตาลอย่างรวดเร็ว ได้เป็น น้ำตาลกลูโคส และมอลโตส แกมมาอะไมเลส (γ -amylase) จะตัดภายในสายโพลีเมอร์ของแป้งได้หลายพันธะ ทั้งที่พันธะไกลโคซิลที่ตำแหน่ง α 1-4 และ α 1-6 จึงสามารถย่อยอะไมโลเปคติน (amylopectin) ซึ่งมีโมเลกุลเป็นกิ่งก้านสาขา โดยจะตัดส่วนปลายสายที่ไม่รีดิวซ์ เข้ามาที่ละ 1 หน่วย ได้น้ำตาลกลูโคส

การลอยฟองอากาศ คือ การทำให้อุณหภูมิแก๊สติดกับฟองอากาศ แล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไป

ค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของหมักที่เหลืออยู่ในเยื่อ หากมีค่ามากแสดงว่า มีปริมาณหมักที่เหลืออยู่ในเยื่อมาก

ค่าความขาวสว่าง คือ ร้อยละการสะท้อนแสงของวัตถุโดยเทียบกับช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 457 นาโนเมตร โดยค่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงร้อยละความสะอาดของเยื่อ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า เยื่อมีความสะอาดปราศจากสิ่งเจือปนสูง และมีปริมาณหมักที่เหลืออยู่น้อย

ค่าสภาพระบายได้ คือ ค่าที่บอกถึงความสามารถในการระบายน้ำได้ของเยื่อ โดยหากค่าสภาพระบายได้มีค่าสูง หมายถึง เยื่อสามารถอุ้มน้ำได้น้อย และสามารถระบายน้ำออกมาได้มาก

ปริมาณผลผลิตที่ได้ คือ ปริมาณของเยื่อที่เหลือจากกระบวนการกำจัดหมึกออก หลังขั้นตอนการลอยฟองอากาศ เนื่องจากในกระบวนการกำจัดหมึกออกนั้น เส้นใยบางส่วนมีโอกาสที่จะหลุดออกมาพร้อมกับอนุภาคของหมึก ทำให้ปริมาณของเส้นใยที่เหลืออยู่ลดลง

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษสามารถทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกแรงดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง จึงต้องใช้แรงดึงสูง โดยค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น Nm/g

ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก คือ การวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีความต้านทานแรงฉีกสูง จึงต้องใช้แรงในการฉีกสูง โดยค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีกมีหน่วยเป็น mN m²/g

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลผลของการใช้ของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลส ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกเพ็คโซกราฟีฐานน้ำออกจากกระดาษด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.6.1 สืบค้นข้อมูล จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.6.2 วางแผนการทดลอง และเตรียมวัสดุอุปกรณ์
- 1.6.3 ผลิตเซลล์และอะไมเลส ที่ใช้ในการกำจัดหมึก
- 1.6.4 ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (การทดลองควบคุม)
- 1.6.5 ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้เอนไซม์แต่ละชนิด
- 1.6.6 ทำการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน
- 1.6.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.6.8 เผยแพร่ผลงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษ (Deinking process)

กระดาษที่มีการใช้ในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่ผลิตมาจากเนื้อเยื่อของไม้ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและลดพลังงานและสารเคมีในการผลิต จึงควรใช้เยื่อกระดาษให้คุ้มค่า โดยนำกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วจากแหล่งต่างๆมาผ่านกระบวนการรีไซเคิล [1] การที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้งให้ได้คุณภาพ สิ่งที่สำคัญและจำเป็นอันดับแรก คือการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ เพื่อให้ได้กระดาษที่มีคุณภาพสูง เหมาะสมต่อการใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยทั่วไป กระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆหลายขั้นตอน โดยขั้นตอนต่างๆที่ใช้นั้น ขึ้นพิจารณาจากชนิดและประเภทของกระดาษที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการกำจัดหมึก ซึ่งอาจจะมีการใช้ทุกขั้นตอนหรือบางขั้นตอนเท่านั้น และสามารถสลับเปลี่ยนลำดับแต่ละขั้นตอนได้ ตามความต้องการของผลผลิตสุดท้าย โดยขั้นตอนหลักต่างๆที่มีความสำคัญ ได้แก่

2.1.1 การตีกระจายเยื่อ (Pulping or repulping)

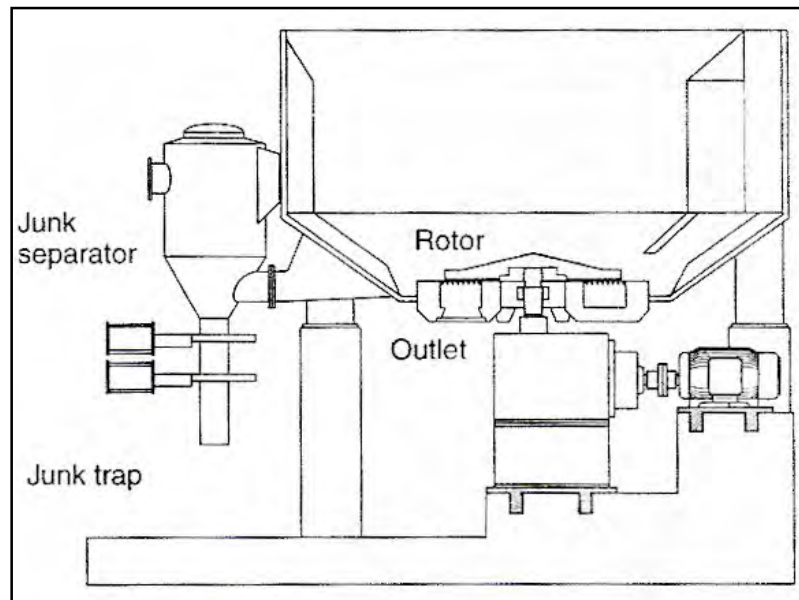
เป็นขั้นตอนการตีกระจายกระดาษ ด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ (pulper) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 เปลี่ยนจากชิ้นกระดาษเล็กๆให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ แรงกลที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกจากเส้นใย รวมทั้งสิ่งปลอมปนอื่นๆ เช่น กาวเหนียว (sticky) หรือ ฟอลย์ (foil) หลุดออกมาด้วย ในขั้นตอนนี้สิ่งที่ควบคุมคือความเข้มข้นของเยื่อ (consistency) โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 4-6% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการพัฒนาจนสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเยื่อให้สูงขึ้นได้ถึง 12% เพื่อเป็นการเพิ่มแรงเสียดทานในระบบทำให้อนุภาคของหมึกและสิ่งแปลกปลอมอื่นถูกกำจัดออกจากผิวหน้าของเส้นใยได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ สิ่งที่เพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อคือการใส่สารเคมีที่สำคัญลงไป เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และสารจับโลหะหนัก (chelating agents) เป็นต้น [2] โดยปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมในกระบวนการนี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเป็นกรด-เบส ความเร็วในการตีกระจายเยื่อ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้

2.1.2 การล้างเยื่อ (Pre-washing)

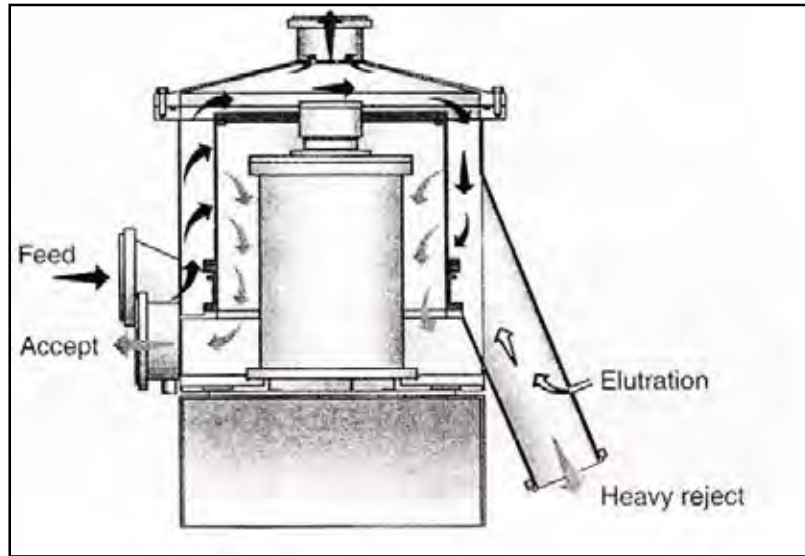
ในขั้นตอนนี้เป็นการปรับค่าความเข้มข้นของเยื่อให้เพิ่มสูงขึ้น โดยการดึงเอาน้ำออกโดยข้อดีคือ สามารถหมุนเวียนสารเคมีที่ใช้แล้วนำกลับใช้ใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตทางหนึ่ง

2.1.3 การกรองเยื่อ (Screening)

สิ่งแปลกปลอมต่างๆจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีขนาดใหญ่ เช่น คลิปหนีบกระดาษ ลวดเย็บกระดาษ และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ มักสร้างปัญหาในกระบวนการรีไซเคิล ส่งผลให้เครื่องจักรในขั้นตอนแต่ละกระบวนการเสียหาย การกรองเยื่อเป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้หลังจากกระบวนการตีกระจายเยื่อ โดยผ่านตะแกรงในเครื่องกรองเยื่อ ดังแสดงในภาพที่ 2-2 การกรองเยื่อบางครั้งทำให้เส้นใยบางส่วนหลุดออกไปกับสิ่งปลอมปน ดังนั้นควรนำส่วนที่ถูกกำจัดมากรองซ้ำอีกครั้ง เพื่อนำเอาเส้นใยส่วนที่หลุดรวมไปกับสิ่งปลอมปนกลับมา



ภาพที่ 2-1 เครื่องตีกระจายเยื่อ [2]



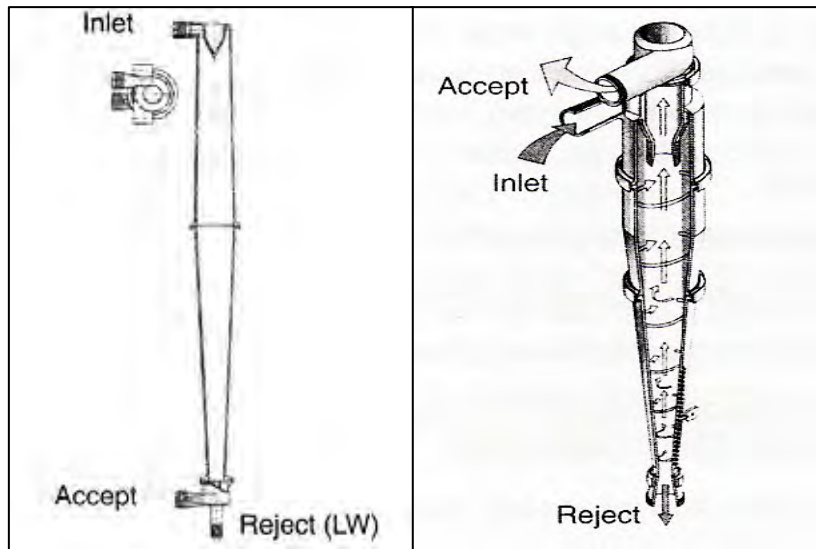
ภาพที่ 2-2 เครื่องกรองเยื่อ [2]

2.1.4 การทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal cleaning)

สิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็กมากเกินไป และไม่สามารถกำจัดโดยตะแกรงด้วยวิธีการกรองเยื่อได้ วิธีการที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่ง คือการทำความสะอาดเยื่อโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยสามารถกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆที่มีขนาดเล็กออกได้ เช่น เศษพลาสติกเล็กๆ เม็ดทราย หรือ เม็ดโฟม โดยการทำงานจะอาศัยจากความแตกต่างของความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของวัตถุเปรียบเทียบกับความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะน้ำ ซึ่งมีความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับเส้นใย สามารถแบ่งการทำความสะอาดเยื่อในลักษณะนี้ได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1.4.1 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning

หลักการทำงานของเครื่องนี้คือ หมุนวนด้วยแรงหนีศูนย์กลาง โดยอาศัยความแตกต่างค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ระหว่างสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าต่ำกว่า 1 กับเส้นใย (accept) ขณะที่เครื่องทำงาน เส้นใยที่มีความหนาแน่น (density) เกิดการชนกับผนังเครื่อง และถูกคัดออกทางด้านล่างของเครื่อง ส่วนสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเบาว่าจะถูกคัดออกทางด้านบนของเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning และ Forward cleaning [2]

2.1.4.2 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning

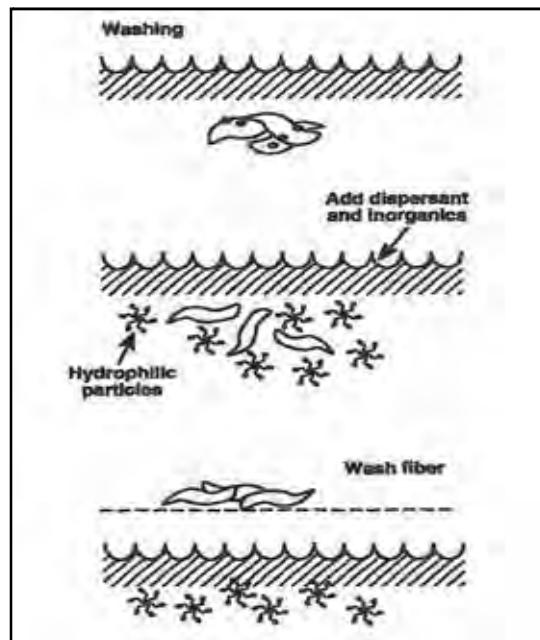
เป็นการกำจัดสิ่งปลอมปนที่มีขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 เช่น เม็ดทราย เศษแก้ว หรือชิ้นส่วนโลหะต่างๆที่ติดมากับกระดาษ ด้วยเครื่อง Centrifugal cleaner เช่นกัน หากแต่เป็นแบบ Centrifugal forward cleaner ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ สิ่งปลอมปนที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1 จะถูกเหวี่ยงไปชนกับผนังเครื่องและหลุดออกไปทางด้านล่าง ส่วนเส้นใยที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าสิ่งปลอมปนต่างๆจะถูกแยกออกไปทางด้านบนของเครื่อง

2.1.5 การกำจัดหมึกพิมพ์ออก (Deinking)

เพื่อเป็นการปรับคุณสมบัติของเส้นใยให้มีคุณภาพได้ตามความต้องการ การแยกหรือกำจัดหมึกพิมพ์และสิ่งปลอมปนอื่นๆออกจากเส้นใย เป็นขั้นตอนหลักที่มีความสำคัญ โดยกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ต้องเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับชนิดของหมึก เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีความขาวสว่างและความแข็งแรงเชิงกลสูง โดยทั่วไปการกำจัดหมึกมี 2 วิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของหมึกและสิ่งปลอมปน คือการล้างและการลอยฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-4 โดยอาจเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรืออาจใช้ 2 วิธีร่วมกัน

2.1.5.1 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง (Washing or washing deinking)

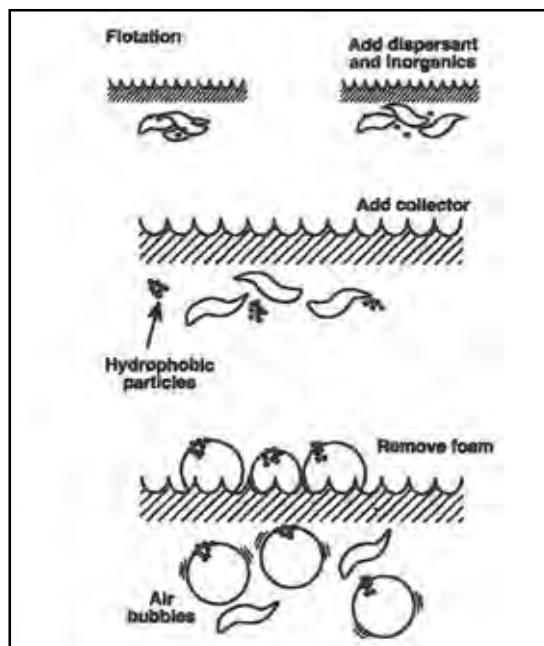
วิธีการล้างเหมาะสำหรับการกำจัดหมึกพิมพ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร เช่น หมึกเพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำ และหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทฐานน้ำ โดยในขั้นตอนการล้างจะมีการใส่สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ประเภทสารช่วยกระจาย (dispersant) เข้าร่วม เพื่อปรับสภาพของอนุภาคหมึกพิมพ์ทำให้มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และยังช่วยกระจายอนุภาคของหมึกพิมพ์ ป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์ย้อนกลับไปติดกับเส้นใยอีกครั้ง การใส่สารช่วยกระจายจะไล่ลงไป ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหลังจากที่มีการปรับค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมแล้ว เมื่อแยกอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยในขั้นตอนการตีเยื่อแล้ว นำเยื่อที่ได้ไปล้าง โดยมีการใช้น้ำเป็นตัวพาอนุภาคของหมึกให้หลุดลอดผ่านตะแกรงออกไปกับน้ำ ดังแสดงในภาพ 2-4 โดยขนาดของตะแกรงจะต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากเส้นใยอาจหลุดลอดออกไปกับหมึกด้วย



ภาพที่ 2-4 การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้าง [3]

2.1.5.2 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation or flotation deinking)

เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกที่เหมาะสมกับหมึกพิมพ์ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครเมตร เช่น หมึกที่แห้งตัวด้วยยูวี และหมึกพิมพ์โทนเนอร์ มีการปรับให้ระบบให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยการใส่สารรวบรวม (collector) ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ เพื่อทำให้อนุภาคของหมึกพิมพ์เกาะกลุ่มและรวมกันเป็นอนุภาคใหญ่ (agglomeration) มีขนาดเหมาะสมเพียงพอสามารถที่จะถูกกำจัดไปพร้อมกับฟองอากาศในเครื่องลอยฟองอากาศ หลังจากการตีเยื่อแล้ว จะทำการปรับความเข้มข้นของเยื่อ แล้วจึงนำไปทำการลอยฟองอากาศเพื่อแยกอนุภาคของหมึกให้ออกมาจากเส้นใยโดยอาศัยเครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell) ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ข้อดีของการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ คือ ใช้น้ำปริมาณที่น้อยกว่า ทำให้ใช้พลังงานในกระบวนการน้อยกว่า อีกทั้งยังให้ผลผลิตของเยื่อกระดาษหลังกระบวนการสูงกว่าวิธีการล้าง



ภาพที่ 2-5 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ [3]

2.1.6 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกโดยการกระจายหมึก (Dispersion)

เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกที่ไม่ใช่การกำจัดหมึกอย่างแท้จริง หมึกพิมพ์ยังคงเกาะติดกับเส้นใยของกระดาษเช่นเดิม โดยขั้นตอนนี้เหมาะกับหมึกพิมพ์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เช่น หมึกพิมพ์โทนเนอร์ และหมึกที่แห้งตัวด้วยยูวี โดยนำกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาตีกระจายให้เป็นเยื่อ ทำให้อนุภาคหมึกพิมพ์มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อนำไปหาค่าความขาวสว่างโดยรวมจะมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณหมึกและสิ่งปลอมปนยังคงอยู่ เพียงแต่มีขนาดเล็กกว่าเดิม

2.1.7 การฟอกเยื่อ (Bleaching)

การกำจัดหมึกจากกระบวนการต่างๆก่อนหน้า อาจให้ความขาวสว่างไม่เพียงพอต่อความต้องการ เยื่อที่ได้จึงจำเป็นต้องนำไปทำการฟอกเยื่อเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความขาวสว่างให้กับกระดาษ โดยค่าความขาวสว่างที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อ

2.1.8 การเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water recirculation)

เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิต น้ำที่ผ่านการใช้งานแล้วในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการกำจัดหมึก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง โดยอาจมีการปรับสมบัติต่างๆ เช่น ค่า pH ให้มีค่าที่เหมาะสม แล้วจึงนำน้ำมาหมุนเวียนเพื่อใช้ใหม่ในกระบวนการกำจัดหมึกอีกครั้ง

2.2 เคมีของการลอยฟองอากาศ (Deinking chemistry)

ในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดหมึก จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญต่างๆ และควบคุมปัจจัยดังกล่าวให้เหมาะสม โดยปัจจัยเหล่านั้นประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ

- การแยกอนุภาคของหมึกออกจากเส้นใย ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ
- การรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์โดยใช้สารเคมีเข้าช่วยในกระบวนการ เช่น สารลดแรงตึงผิวประเภทสารรวบรวม ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อและขั้นตอนการลอยฟองอากาศ

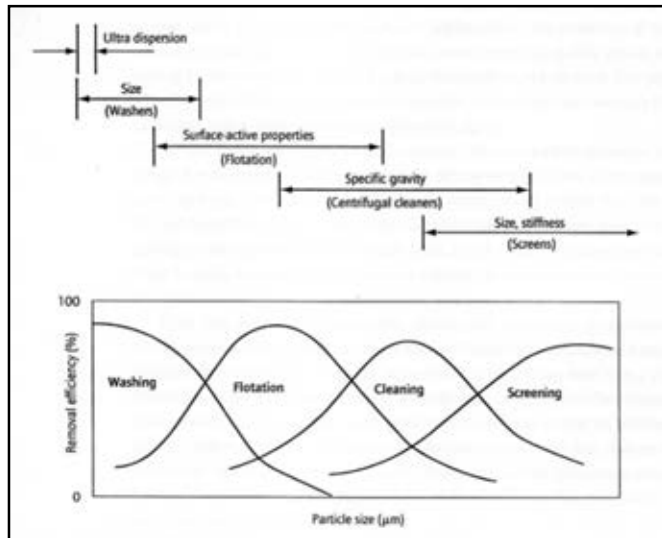
- การที่กลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์เกาะติดไปกับฟองอากาศ ก่อนจะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดต่อไป ในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ

ดังนั้นการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อเกิดสิ่งต่างๆ ดังนี้

- อนุภาคของหมึกพิมพ์ต้องมีการชนกับฟองอากาศ
- ชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่ระหว่างผิวหน้าของอนุภาคหมึกกับฟองอากาศหมดไปเมื่อเกิดการชนกัน
- อนุภาคของหมึกและฟองอากาศต้องไม่ผลักรัน
- อนุภาคของหมึกต้องมีความไม่ชอบน้ำ เพื่อให้สามารถยึดติดกับฟองอากาศได้
- การเกาะติดกันของอนุภาคหมึกกับฟองอากาศเพื่อลอยสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ ฟองอากาศจำเป็นที่จะต้องมีความแข็งแรงมากเพียงพอที่จะสามารถเอาชนะแรงที่มากระทำ เช่น โน้มถ่วงของโลก (Gravity force) แรงต้านทานเนื่องจากความหนืด (Viscous drag) เป็นต้น โดยแรงเหล่านี้เป็นแรงที่พยายามแยกอนุภาคหมึกและฟองอากาศออกจากกัน [4]

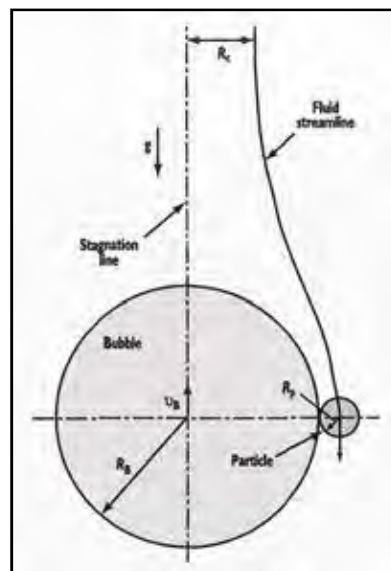
2.2.1 ความสำคัญของขนาดอนุภาคหมึก

วิธีการกำจัดหมึกพิมพ์แบบการลอยฟองอากาศขนาดของอนุภาคหมึกนับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงให้ที่เหมาะสมกับกระบวนการ โดยจะอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-9 ถ้าหากขนาดอนุภาคของหมึกพิมพ์มีขนาดใหญ่มากเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดของฟองอากาศ จากสภาพปั่นป่วน (turbulence) ที่สูงในเครื่องลอยฟองอากาศ จะส่งผลให้อนุภาคของหมึกหลุดออกจากฟองอากาศ ก่อนที่ฟองอากาศจะลอยไปสู่ผิวหน้าเครื่องลอยฟองอากาศ อาจทำให้อนุภาคของหมึกยังคงอยู่ในระบบ



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหมึกพิมพ์และวิธีที่ใช้ในการกำจัด [3]

แต่ถ้าขนาดของอนุภาคหมึกเล็กเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศ โอกาสที่จะเกิดการชนกันระหว่างอนุภาคหมึกและฟองอากาศเพื่อยึดติดกันแล้วลอยออกไปจากเครื่องลอยฟองอากาศจะลดน้อยลง เนื่องจากอนุภาคหมึกจะไหลไปตามแนวเส้นกระแส (Streamline) ที่อยู่รอบฟองอากาศมากกว่าที่จะชนกับฟองอากาศโดยตรง [5] ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-7 การไหลของอนุภาคหมึกตามแนวเส้นกระแส [2]

2.2.2 ความสำคัญของขนาดฟองอากาศ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกโดยวิธีลอยฟองอากาศ คือขนาดของฟองอากาศที่จำเป็นต้องควบคุมให้เหมาะสม โดยขนาดของฟองอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.3 มิลลิเมตร จะมีแรงพยุงตัว (Bouyancy force) มากเพียงพอที่จะดันตัวเองผ่านเครือข่ายของเส้นใย สามารถขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ดี ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้สามารถยึดติดกับอนุภาคของหมึกพิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ดี ส่วนฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร จะถูกกักด้วยเครือข่ายของเส้นใย ทำให้ลดโอกาสในการลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ เนื่องจากมีแรงพยุงตัวน้อย อีกทั้งยังไปเกาะติดกับเส้นใย ทำให้เส้นใยถูกกำจัดไปพร้อมกับหมึกด้วย ปริมาณผลผลิตที่ได้จึงลดลง และในส่วนที่สามารถลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ก็จะพาเส้นใยสั้น (Fines) ลอยติดไปด้วย ส่งผลให้เส้นใยถูกกำจัดออกไปที่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศพร้อมกับฟองอากาศด้วย ซึ่งโดยทั่วไปตามทฤษฎีในการลอยฟองอากาศแล้ว ขนาดของฟองอากาศต่ออนุภาคของหมึกพิมพ์ที่เหมาะสมคือ 5:1 [6]

2.2.3 ความสำคัญของการผสม

การผสมเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เนื่องจากทำให้อนุภาคหมึกสามารถมาเกาะติดกับฟองอากาศได้ โดยเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคของหมึกกับฟองอากาศ ทั้งนี้การผสมจะต้องมีความเร็วและความแรงที่มีความเหมาะสม หากความเร็วหรือความแรงของการผสมเร็วหรือแรงมากเกินไป อาจส่งผลให้ฟองอากาศแตก และจะทำให้อนุภาคของหมึกกับฟองอากาศแยกออกจากกัน รวมทั้งจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของหมึกที่เกาะกลุ่มกันอยู่ได้

2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ (Deinking chemicals)

นอกเหนือจากการอาศัยแรงกลในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อแล้ว สิ่งที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ คือ การใช้สารเคมี โดยการเลือกใช้สารเคมีให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดหมึกนั้น ขึ้นอยู่กับกระดาษที่จะนำมารีไซเคิล ระบบการพิมพ์ ชนิดของหมึกพิมพ์ ขั้นตอน หรือวิธีการที่ใช้กำจัดหมึกพิมพ์ รวมทั้งคุณภาพของเยื่อที่ต้องการหลังการกำจัดหมึก โดยส่วนหลักที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาคือส่วนที่เป็นสารยึด (Binder) เช่น พวกเรซิน (resin) ที่ทำหน้าที่ยึดสารสีหรือสารย้อมของหมึกให้เกาะติดกับกระดาษ โดยสารเคมีที่ใส่จะ

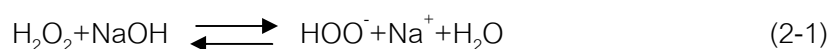
เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารยัด เพื่อให้อนุภาคหมึกหลุดออกจากผิวหน้าของกระดาษ [8] ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษ ได้แก่

2.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เนื่องจากมีราคาไม่สูงมากและให้ผลที่ดีในกระบวนการ โดยใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อและการฟอกเยื่อ ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อจะมีการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับสภาพให้อยู่ในภาวะที่เป็นเบส ทำให้น้ำเยื่ออยู่ในช่วงความเป็นด่างที่ค่า pH 9.5-11.0 ส่งผลให้เส้นใยเกิดการพองตัวมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นสามารถรับน้ำมากได้ขึ้น เกิดการเสียดสีกันของเส้นใยในขณะตีกระจายเยื่อทำให้อนุภาคของหมึกสามารถหลุดออกจากเส้นใยได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังสามารถไปละลายสารยัดที่เกาะอยู่กับเส้นใย และ รวมทั้งยังป้องกันการไม่ให้เส้นใยจับกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งไม่เหมาะกับการกำจัดหมึกโดยวิธีการล้าง นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยเพิ่มปริมาณของ perhydroxy ion (OOH⁻) ในการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) จากการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในภาวะที่เป็นด่าง โดย perhydroxy ion (OOH⁻) เป็นตัวฟอกเยื่อที่แท้จริง (Active bleaching agent) อย่างไรก็ตามการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปในเยื่อเชิงกลที่ทำจากเยื่อไม้บด จะทำให้ผลผลิตสุดท้ายหรือเยื่อที่ได้จากการรีไซเคิลเกิดสีเหลืองและคล้ำ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า Alkali darkening ทำให้ความขาวสว่างของเยื่อที่ได้นั้นลดลง [9]

2.3.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ เป็นสารที่ใช้ฟอกเยื่อหลังจากที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดหมึกออกแล้ว จะทำให้ได้เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารฟอกเยื่อซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน อีกทั้งยังสามารถทำลายสารยัดจำพวกอัลคิเดเรซิน (Alkyd resin binder) การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดง ได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลแอนไอออน (OOH⁻) ซึ่งเป็นสารฟอกเยื่อที่แท้จริง ในสมการที่ 2-1



$$\text{pH} = 10-11.5, \text{Temp.} = 40-80^\circ\text{C}$$

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวได้ง่ายในสถานะที่มีไอออนของโลหะหนัก เช่น แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น รวมทั้งการมีเอนไซม์จำพวกตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalase) ในระบบ หรือในสถานะที่มีค่าความเป็นกรด-เบสหรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป การป้องกันการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำได้โดยการเติมสารประเภทสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agents) เช่น สารจับโลหะหนัก (Chelating agents or chelants) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นต้น โดยสารรักษาเสถียรภาพไม่ได้มีประสิทธิผลที่จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงตัว แต่จะไปรักษาระบบที่ส่งผลกระทบต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แทน ทำให้ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา [9]

2.3.3 สารจับโลหะหนัก (Chelating agents or chelants)

ใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อเพื่อจับไอออนของโลหะ ป้องกันไม่ให้ไอออนของโลหะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จนเกิดการสลายตัว โดยจะทำปฏิกิริยาและสร้างสารประกอบที่ละลายได้ (Soluble complexes) กับโลหะหนัก สารจับโลหะหนักที่นิยมใช้ในกระบวนการกำจัดหมึก ได้แก่ DTPA (Diethylenetriaminepenta acetic acid) และ EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) โดย DTPA มี 5 แขน (five-legged structure) จึงทำให้สามารถจับโลหะหนักได้ดีและแข็งแรงกว่า EDTA ที่มี 4 แขน (four-legged structure) โดยความสามารถในการจับโลหะหนักของ DTPA สามารถเรียงลำดับจากง่ายไปยากได้ดังนี้ $\text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{3+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ [9]

2.3.4 โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อและการฟอกเยื่อ เพื่อจับโลหะโดยทำให้เกิดเป็นคอลลอยด์ (colloid) กับโลหะ ป้องกันไม่ให้โลหะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และยังช่วยป้องกันการย้อนกลับมาติดเส้นใยของอนุภาคหมึกด้วย (ink redeposition) นอกจากนี้ยังทำให้อนุภาคของหมึกเกิดการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้างทำได้โดยง่าย ในการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ จะช่วยลดการสูญเสียเส้นใยเพิ่มปริมาณผลผลิตที่ได้ให้สูงขึ้น โซเดียมซิลิเกตช่วยปรับสถานะให้เป็นเบส จึงสามารถลดการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อเยื่อให้เกิดสีคล้ำในเยื่อเชิงกล นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตยังช่วยรักษาระบบต่างๆ ของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษได้ [9]

2.3.5 สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerating chemicals)

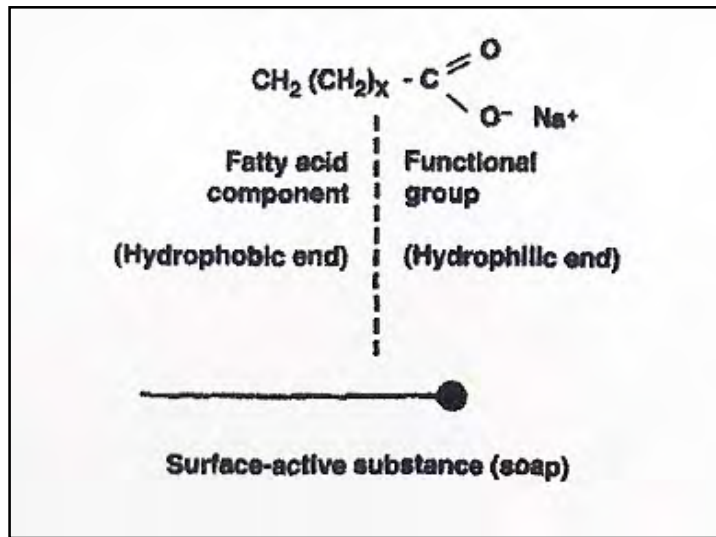
สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่มใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกรองเยื่อ หรือการทำ ความสะอาดเยื่อ โดยจะทำให้อนุภาคของหมึกรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น สารทำให้เกิดการ เกาะกลุ่มมักนิยมใช้ในหมึกพิมพ์โทนเนอร์ เนื่องจากหมึกพิมพ์ชนิดนี้มีขนาดใหญ่และรูปร่างเป็น แผ่นแบน ยากต่อการกำจัดออกด้วยวิธีการล้างหรือลอยฟองอากาศ จึงใช้สารชนิดนี้มาให้เกิด การรวมตัวของหมึกเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ แล้วจึงค่อยนำไปกำจัดออกด้วยวิธีการกรองเยื่อ หรือวิธีทำความสะอาดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแบบ forward cleaning ต่อไป [9]

2.3.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)

ลดแรงตึงผิวใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้างหรือ การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว คือช่วยทำให้ เกิดฟองและลดแรงตึงผิวของน้ำ สารลดแรงตึงผิวมีความหมายรวมถึงสารต่างๆ ตั้งแต่ สาร กระจาย (Dispersants) สารรวบรวม (Collectors) สารที่ทำให้เปียก (Wetting agents) และสาร กึ่งช่วยกระจายกึ่งรวบรวม (Displectors) โดยโครงสร้างหลักของสารลดแรงตึงผิวจะมีโครงสร้างที่ สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) สำหรับส่วน ที่ไม่ชอบน้ำจะประกอบด้วยคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำสามารถแบ่งได้ เป็น แบบไม่มีขั้ว (Non-ionic surfactants) และแบบมีขั้ว (Ionic surfactants) ซึ่งจะมีทั้งแบบ ประจุบวก (Cationic) ประจุลบ (Anionic) และแบบที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ด้วยกัน (Amphoteric) ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ซึ่งโครงสร้างเป็นได้ทั้งแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบ กิ่งก้านสาขา (Branch) และแบบอิ่มตัว (Saturated) หรือแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated) ใน กระบวนการกำจัดหมึกออกโดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้สารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้ว เนื่องจาก สามารถทำปฏิกิริยาได้ดี มีความเป็นอิสระจากค่าความเป็นกรด-เบส และความกระด้างของน้ำ (Water hardness) [9]

การทำงานของสารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำ เกิดการเปียกผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ อนุภาคของหมึกมีการกระจายตัวดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกดีขึ้น แต่ถ้าหากใส่สาร ลดแรงตึงผิวมากเกินไป จะส่งผลให้เกิดฟองอากาศมาก ทำให้อัตราส่วนระหว่างฟองอากาศกับ อนุภาคหมึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศลดลง รวมทั้งผลผลิตที่ได้ (Yield) ก็ลดลงด้วย ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ

ละ 0.2-2.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งปริมาณที่ใช้จะพิจารณาจากชนิดของสารลดแรงตึงผิวและวิธีการในกำจัดหมึกออก



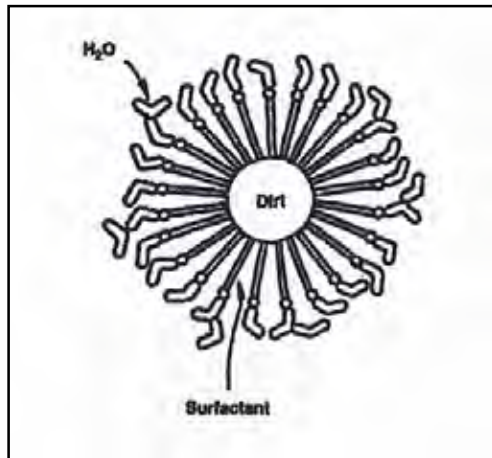
ภาพที่ 2-8 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [3]

2.3.7 สารกระจาย (Dispersants)

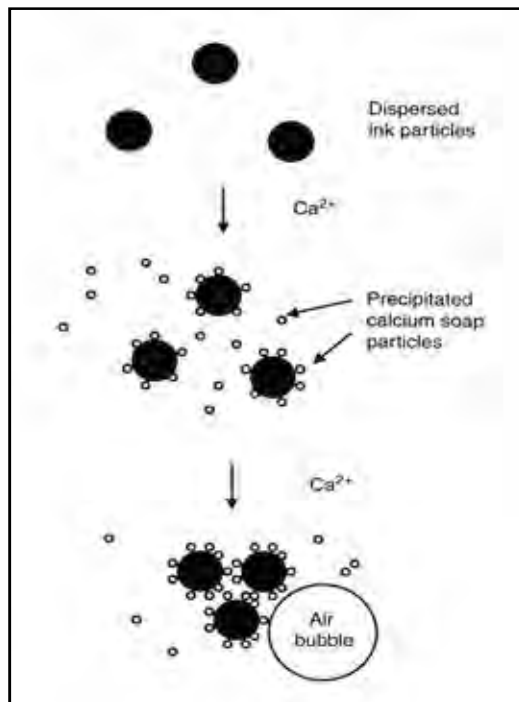
สารกระจายมีสมบัติชอบน้ำ มักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง เพื่อให้อนุภาคของหมึกพิมพ์กระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ โดยสารกระจายจะไปจับกับอนุภาคของหมึกในลักษณะของไมเซลล์ (Micelle) ดังแสดงในภาพที่ 2-9 ทำให้ง่ายต่อการกำจัดออกด้วยวิธีการล้าง ปริมาณสารกระจายที่ใช้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2-2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.8 สารรวบรวม (Collectors)

สารรวบรวมมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ หรือการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เพื่อให้อนุภาคหมึกเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น และมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จากนั้นกลุ่มก้อนของหมึกก็จะไปสัมผัสกับฟองอากาศ และถูกกำจัดออกไปบริเวณผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-10 นอกจากนี้สารรวบรวมยังช่วยปรับปรุงแรงตึงผิวของฟองอากาศ ทำให้มีความแข็งแรงมากพอที่จะสามารถพาอนุภาคของหมึกลอยสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไปได้



ภาพที่ 2-9 ลักษณะของ Micelle [9]



ภาพที่ 2-10 ลักษณะการทำงานของสารรวมรวม [2]

2.3.9 สารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวม (Displectors)

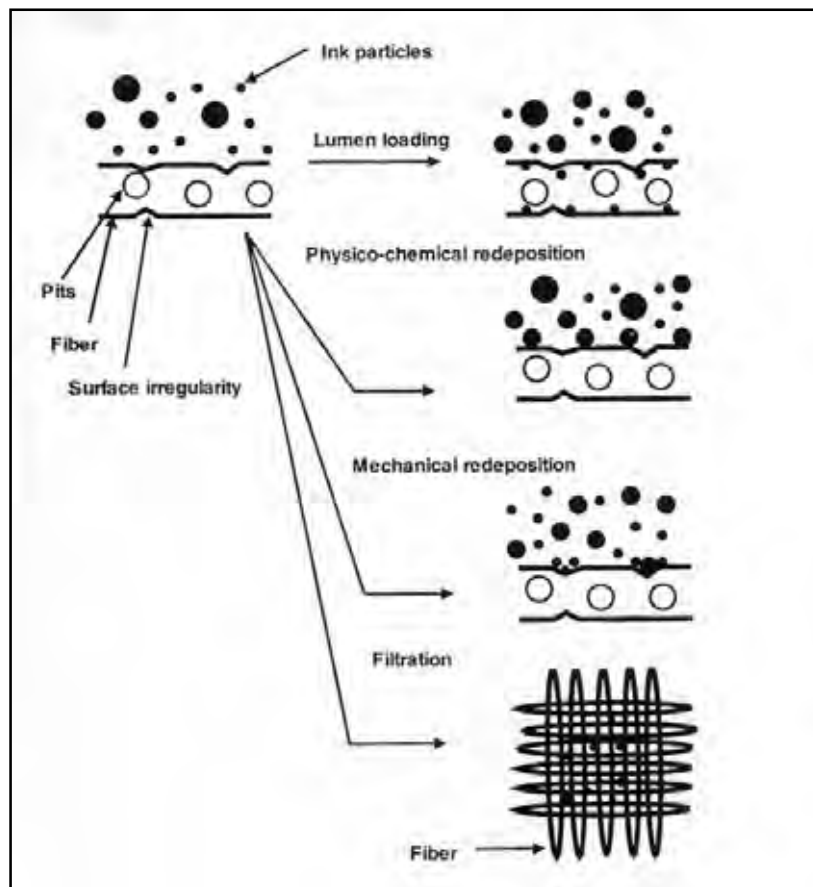
สารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวมเป็นสารที่สามารถใช้ได้ทั้งกับการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศและวิธีการล้าง เป็นสารที่มีสมบัติเป็นทั้งสารช่วยกระจาย (Dispersants) และสารรวบรวม (Collectors) จึงเรียกสารชนิดนี้ว่า Displectors โดยถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกออกแบบผสม การทำงานของสารนี้จะทำให้อนุภาคหมึกสามารถยึดเกาะกับฟองอากาศได้ดีในการกำจัดหมึกออกแบบการลอยฟองอากาศ ในขณะเดียวกันก็ทำให้อนุภาคของหมึกมีความชอบน้ำมากพอที่จะไม่ย้อนกลับไปติดที่เส้นใย ข้อดีอีกประการของสารนี้คือสามารถทนต่อน้ำกระด้างและช่วยป้องกันการเกิดตะกอน (Scaling) ของเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ

2.4 การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก (Ink redeposition)

ในกระบวนการกำจัดหมึกออกจากเส้นใย อนุภาคหมึกที่หลุดออกอาจมีบางส่วนที่ย้อนกลับไปติดกับเส้นใย ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างลดลงและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้คุณภาพของเยื่อที่ได้อาจลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคหมึกไม่มีความเสถียรพอ โดยการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ การย้อนกลับไปติดที่ช่องว่างตรงกลางของเส้นใย (Lumen loading) การย้อนกลับไปติดที่ผิวหน้าของเส้นใยแบบเชิงเคมี (Chemical redeposition) การย้อนกลับไปติดที่ผิวหน้าของเส้นใยแบบเชิงกล (Mechanical redeposition) และการที่อนุภาคหมึกเข้าไปติดในเครือข่ายของเส้นใย [2] ดังแสดงในภาพที่ 2-11

Ben และคณะ [11] ได้ทำการวิจัยและศึกษาผลของตัวแปรในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อต่อการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเร็วในการตีกระจายเยื่อ เวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ เวลาในการเก็บเยื่อ และพลังงานจำเพาะ (Specific energy) ที่ใช้ในการตีเยื่อ โดยนำกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลและผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีมาทำการทดลอง หลังจากนั้นนำกระดาษมาผ่านการตีกระจายแล้ว ทำการแบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไปผ่านการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้าง โดยจะล้างด้วยน้ำหลายๆ รอบให้ได้น้ำภายหลังการล้าง (Filtrate) มีลักษณะใส ซึ่งการล้างแบบนี้จะเป็นการตรวจสอบอนุภาคของหมึกที่ยังคงเหลือติดอยู่กับเส้นใยอย่างแท้จริง คือ ถ้าหากมีปริมาณหมึกที่ยังเหลืออยู่ภายหลังการล้างมีค่าสูง หมายถึงมีการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกสูง ซึ่งผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณหมึกและระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อสูงขึ้น ทำให้มีปริมาณหมึกที่ยังเหลืออยู่มีมากขึ้น รวมทั้งการใช้ความเข้มข้นของเยื่อและความเร็วในการตีกระจายเยื่อที่สูง จะส่งผลให้การย้อนกลับไปติดที่เส้นใย

ของหมึกเกิดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการตีกระจาย ความเข้มข้นของเยื่อ และความเร็วในการตีกระจายเยื่อสูง จะทำให้อนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กลงมาก จึงมีโอกาที่จะการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยได้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกจะย้อนกลับไปติดที่ช่องว่างตรงกลางของเส้นใยมากกว่าที่ผิวหน้าของเส้นใย



ภาพที่ 2-11 ลักษณะการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก [2]

2.5 หมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำกับการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

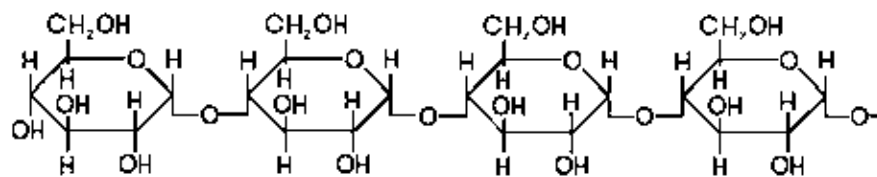
หมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำโดยปกติ กระบวนการกำจัดหมึกที่เหมาะสมคือวิธีการล้าง แต่เนื่องจากการกำจัดหมึกโดยการล้างนั้น ทำให้สิ้นเปลืองน้ำและพลังงาน จึงเลือกใช้วิธีการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศแทน แต่การลอยฟองอากาศยังไม่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกได้ดีเท่าวิธีการล้าง เนื่องจากตัวยึด (binder) ในหมึกสามารถละลายได้ดีในภาวะที่เป็นต่าง อนุภาคหมึกที่แยกตัวออกจากเส้นใยจะมีขนาดเล็ก จึงต้องมีการปรับภาวะในการตีกระจายเยื่อให้

มีค่าความเป็นกรด-เบส ให้เป็นกลาง-กรดอ่อน และสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกได้ โดยการใช้น้ำที่สะอาดทำงานได้ดีในภาวะความเป็นกรด-เบส ในช่วงกลาง-กรดอ่อน เช่น อะซิติกหรือเซลลูลอส

2.6 เคมีของเส้นใย (fiber chemistry)

2.6.1 เซลลูโลส (cellulose)

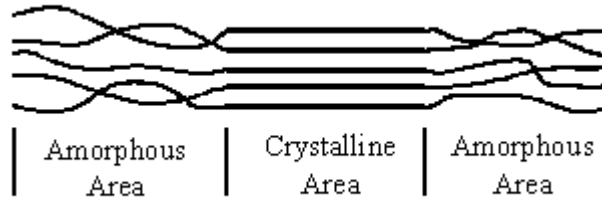
เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) เกิดจากกลูโคสประมาณ 50,000 โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ดังแสดงในรูปภาพที่ 2-12 แต่ละสายของเซลลูโลสเรียงขนานกันไป มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเซลล์ (structure carbohydrate) โดยเป็นผนังเซลล์ (cell wall) สะสมไว้ในพืช เซลลูโลสเมื่อถูกย่อยสลายจะได้กลูโคส หน่วยย่อยของเซลลูโลส คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล ต่อกันโดยไม่มี การแตกแขนง เซลลูโลสใน primary cell wall ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และอย่างน้อย 14,000 โมเลกุลใน secondary cell wall โดยโมเลกุลจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์พืช



ภาพที่ 2-12 โครงสร้างของเซลลูโลส [14]

ส่วนประกอบของเซลลูโลสแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังภาพที่ 2-13 ส่วนแรก คือ ส่วนที่โครงสร้างของโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกบริเวณนี้ว่า crystalline regions โดยโมเลกุลจะจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ที่มีความแข็งแรงสูง ทนต่อสารเคมีที่เป็นตัวทำละลาย (solvents) ได้ดี ส่วนที่สองจะมีโครงสร้างของโมเลกุลที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็น

ระเบียบ เรียกบริเวณนี้ว่า amorphous regions เนื่องจากการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบตัวทำละลาย จึงเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย เซลลูโลสบริเวณนี้จึงสามารถถูกทำลายได้ง่ายกว่า crystalline regions



ภาพที่ 2-13 ส่วนที่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเซลลูโลส [14]

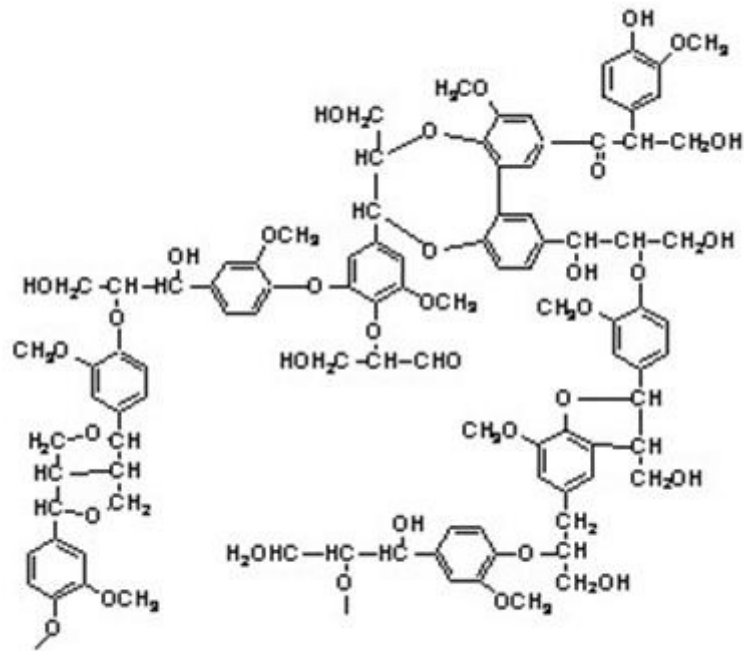
2.6.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulase)

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ ออกซิเจน (O) โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลีแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีไซโลส (xylose) เป็นไซหลัก อาจมีแมนโนส (mannose) กาแลคโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นไซหลักด้วย และมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นไซสาขา เช่น อะราบิโนส (arabinose) และกรดกลูคิวโรนิก (glucuronic acid) เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด การเรียงตัวของโครงสร้างจึงเป็นแบบไม่เป็นระเบียบ ทำให้เฮมิเซลลูโลสสามารถอุ้มน้ำและพองตัวได้ดี จึงถูกทำปฏิกิริยาได้ง่าย [15]

2.6.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของออกซิเจนเฟนิล โปรเพน (oxygenate phenyl propane) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 1,000-4,500 หน่วยสังเคราะห์จากอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้แก่ คูมาริล (coumaryl) โคนเฟอริล (coniferyl) และไซนาปิล (sinapyl) ลิกนินไม่ละลายทั้งในกรดและด่าง และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ลิกนินทำหน้าที่เชื่อมกันเข้าไว้ด้วยกัน โดยการแยกเส้นใยเพื่อนำมาใช้ในการผลิตกระดาษนั้น ต้องมีการกำจัดลิกนินออกไปในขั้นตอนการผลิตเยื่อทางเคมี แต่ในการผลิตเยื่อแบบเชิงกลแค่ทำให้ถูกอ่อนตัวลงไม่ได้ถูกกำจัด อย่างไรก็ตาม ลิกนินมีผลต่อความ

แหล่งของกระดาษ ดังนั้นในการผลิตกระดาษที่ต้องการความขาวสว่าง ควรนำเยื่อที่ผลิตไปผ่านการฟอกเพื่อกำจัดลิกนินออกก่อน



ภาพที่ 2-17 โครงสร้างของลิกนิน [16]

2.7 สารเคลือบผิว (sizing agent)

2.7.1 แป้ง (starch)

แป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), และออกซิเจน (O) เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของมนุษย์และสัตว์ สามารถสังเคราะห์ได้จากพืช โดยพืชที่มีแป้งในปริมาณสูง ได้แก่ ข้าว, ข้าวโพด, มันฝรั่ง, มันสำปะหลัง เป็นต้น โดยแป้งที่เกิดจากกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - (1-4) ไกลโคซิดิก เรียกว่า อะไมโลส (amylose) มีประมาณ 20 % สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิสูง ส่วนกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - (1-6) ไกลโคซิดิก เรียกว่า อะไมโลเพคติน (amylopectin) ไม่สามารถละลายน้ำได้ และแป้งที่สะสมอยู่ในมนุษย์และสัตว์ เรียกว่า ไกลโคเจน (glycogen) [17]

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมกระดาษจัดเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการนำแป้งไปใช้ประโยชน์มากที่สุด แป้งเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมากในแผ่นกระดาษเป็นอันดับสามรองจากเส้นใยเซลลูโลสหรือที่เรียกว่าเยื่อและผงแร่ (mineral filler) กระดาษแต่ละชนิดจะมีแป้งเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่ไม่เท่ากัน กระดาษบางชนิดอาจมีแป้งเป็นส่วนประกอบอยู่สูงถึง 10% โดยน้ำหนัก แป้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษส่วนใหญ่แล้วจะพบมากใน 3 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่ ขั้นตอนของกระบวนการผลิตช่วงเปียก (wet end) ขั้นตอนการฉาบผิวกระดาษ และขั้นตอนของการเคลือบกระดาษ โดยประโยชน์ของแป้งที่ใช้ในกระดาษได้แก่ ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มการตกค้าง (retention aid) ช่วยให้เยื่อใยขนาดเล็กและผงแร่จับตัวกันและคงอยู่ในเนื้อกระดาษได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้การระบายนํ้า (dewatering) บนตะแกรงสายพานเดินแผ่นกระดาษเกิดได้ดีขึ้น และที่สำคัญคือทำให้ผิวของกระดาษมีความเรียบสูงขึ้น โดยลดต้นทุนการใช้เส้นใยสั้นในการเพิ่มความเรียบให้กับกระดาษ [18]

2.8 เอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกจากเส้นใย

2.8.1 เซลลูเลส

เซลลูเลส คือ เอนไซม์ที่ทำงานร่วมกันในการย่อยสลายเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใย โดยเซลลูเลสเป็นกลุ่มของเอนไซม์เชิงซ้อน (complex enzymes) ประกอบด้วยเอนไซม์ 3 กลุ่มหลักได้แก่ เอกโซกลูคาเนส (exoglucanase) เอนโดกลูคาเนส (endoglucanase) และเบต้า-กลูโคซิเดส (B-glucosidase) โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการย่อยสลายคือ น้ำตาลกลูโคส เซลลูเลสสามารถผลิตได้จากเชื้อรา แบคทีเรีย และแอคโตนิมัยซิส โดยเชื้อราจะสะดวกต่อการแยกสกัดเอนไซม์มากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ

เซลลูเลสเป็นไกลโคโปรตีน (glycoprotein) ที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในอัตราส่วน 1:1 น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ประมาณ 30,000-60,000 ดาลตัน เซลลูเลสที่ได้จากจุลินทรีย์ต่างชนิดกันสมบัติย่อมแตกต่างกัน แต่โดยทั่วไปเซลลูเลสสามารถละลายน้ำได้ดี อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเซลลูเลสที่ได้จากจุลินทรีย์อยู่ที่ประมาณ 50 °C ทนต่อความเป็นกรด-เบส (pH) ในช่วงประมาณ 4.0-8.0 สามารถเก็บไว้ได้นานโดยการทำแห้งด้วยความเย็น (freeze dry) หรือทำการตกตะกอนด้วยเอทานอลหรืออะซิโตน โดยไม่เสียคุณภาพ [19]

เนื่องจากการผลิตเซลลูเลสเป็นกระบวนการทางชีวภาพ การใช้เซลลูเลสย่อยสลายเซลลูโลสจึงเป็นวิธีทางชีวภาพที่มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีทางเคมี ปฏิกริยาในกาย่อยสลายสามารถ

เกิดขึ้นได้เองโดยไม่ใช้พลังงานมาก ต้นทุนจึงต่ำกว่าการใช้วิธีทางเคมี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆที่สำคัญได้ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เป็นต้น

2.8.2 อะไมเลส

อะไมเลส คือ เอนไซม์ที่มีความสามารถในการย่อยแป้งให้มีโมเลกุลเล็กลง ทำให้ได้น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น กลูโคส มอลโตส และเด็คซ์ทริน โดยอะไมเลสประกอบด้วยเอนไซม์ 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เบต้าอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และแกมมาอะไมเลส อะไมเลสสามารถผลิตได้จากเชื้อราและแบคทีเรีย โดยเชื้อราจะสะดวกต่อการแยกสกัดเอนไซม์มากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ [21]

อะไมเลสเป็นไกลโคโปรตีน (glycoprotein) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 51,000-54000 ดาลตัน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานอยู่ที่ประมาณ 40 °C ทนต่อความเป็นกรด-เบส (pH) เป็นช่วงกว้างประมาณ 4.0-7.0 อะไมเลสสามารถเก็บไว้ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ได้นานหลายปี ทั้งนี้สมบัติต่างๆย่อมแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ที่ผลิต อะไมเลสสามารถย่อยแป้งให้มีโมเลกุลเล็กลง โดยอะไมเลสทั้ง 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เบต้าอะไมเลส จะตัดแป้งที่พันธะไกลโคซิดที่ตำแหน่ง แอลฟา 1-4 เฉพาะส่วนปลายที่ไม่มีรีดิวซ์เข้ามาที่ละ 2 หน่วย ได้มอลโตส ส่วนแอลฟาอะไมเลสจะตัดภายในสายโพลีเมอร์ของแป้งที่พันธะไกลโคซิดที่ตำแหน่งแอลฟา 1-4 แบบสุ่ม ทำให้ย่อยแป้งเป็นน้ำตาลได้รวดเร็วเป็นกลูโคส และมอลโตส ส่วนแกมมาอะไมเลสจะตัดภายในสายโพลีเมอร์ของแป้งได้หลายพันธะที่พันธะไกลโคซิดที่ตำแหน่งแอลฟา 1-4 และแอลฟา 1-6 สามารถย่อยอะไมโลเพคติน โดยตัดส่วนปลายที่ไม่มีรีดิวซ์เข้ามาที่ละ 1 หน่วย ได้กลูโคส

เนื่องจากอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ผลิตด้วยกระบวนการทางชีวภาพเช่นเดียวกับเซลล์ จึงสามารถช่วยลดต้นทุนเมื่อเทียบกับการใช้สารเคมี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่รุนแรง และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมได้มีการใช้เอนไซม์กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตสารซักล้าง และอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ ซึ่งข้อดีของการใช้เอนไซม์ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานมาก จึงทำให้ประหยัดสารเคมีและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยผลผลิตสูงสุดที่ได้คือน้ำตาลกลูโคส ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าอื่นๆได้

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zollner และคณะ [12] ได้ศึกษาการทำงานของเอนไซม์ในการกำจัดหมักโทนเนอร์ออกจากกระดาษสำนักงาน โดยใช้อะไมเลสที่สภาวะความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 5.5 จากการทดลองพบว่า กระดาษที่ผ่านการใช้อะไมเลสในการกำจัดหมักออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้อะไมเลสในปริมาณที่สูงและให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะส่งผลให้ได้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้นและปริมาณหมักที่เหลืออยู่บนกระดาษลดลงอย่างชัดเจน ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรง ทั้งค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก มีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอะไมเลสจะไปย่อยสลายแป้งที่เคลือบอยู่บนผิวหน้าของกระดาษออก ในการตีกระจายเยื่อจึงทำให้อนุภาคหมักสามารถหลุดออกมาได้ง่ายมากขึ้น

Lakouraj และคณะ [13] ได้ศึกษาถึงผลของการใช้เอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมักออกโดยการใช้เซลล์เลสทางการค้าในการกำจัดหมักโทนเนอร์ออกจากกระดาษสำนักงาน โดยนำกระดาษไปตีกระจายเยื่อก่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วนำมาล้างด้วยน้ำ (running tap water) แล้วจึงนำมาทำการกำจัดหมักด้วยเซลล์เลส ที่ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) 5.5 และอุณหภูมิ 50 °C จากการศึกษาพบว่าการใช้เซลล์เลสในปริมาณที่สูงขึ้น และเพิ่มระยะเวลาให้เอนไซม์ทำงานได้นานขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณหมักที่เหลืออยู่ลดลงไปได้มาก และค่าความขาวสว่างจะเพิ่มสูงขึ้น

Elegir และคณะ [22] ศึกษาผลของการใช้เซลล์เลสร่วมกับอะไมเลสในการกำจัดหมักโทนเนอร์ออกจากกระดาษถ่ายเอกสาร โดยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.0 และอุณหภูมิ 50 °C โดยใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว ethoxylated fatty acid พบว่าการใช้ เซลล์เลสชนิด NZ342 ร่วมกับอะไมเลส BAN 240 จะให้ค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่เมื่อเทียบกับการทดลองควบคุมที่ไม่ใช้เอนไซม์จาก 892 เหลือเพียง 95 และค่าความขาวสว่างสูงขึ้นไปเป็น 96% แต่การใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษ

Zeyer และ คณะ [7] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์กระบวนการกำจัดหมักและค้นพบถึงการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่กระทำต่อเส้นใย พบว่าก่อนการตีกระจายเยื่อ เส้นใยจะถูกปิดกั้นการเข้าทำปฏิกิริยาจากชั้นหมักพิมพ์ เมื่อมีการตีกระจายเยื่อจะเกิดแรงเสียดทานจากการตีกระจาย ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของหมักที่ติดอยู่บนเส้นใยช่วยให้เกิดการเปิด

ผิวหน้าของเส้นใย เอนไซม์จึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น โดยเมื่อเส้นใยถูกตัดโดยเอนไซม์ หมึกที่ติดอยู่ผิวหน้าของเส้นใยจึงหลุดออกมาโดยง่าย

วจนา พัสตุ [23] ได้ศึกษาถึงผลการใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่สามารถผลิตได้เองจาก *Aspergillus niger* และแลกเคสที่ผลิตจาก *Pycnoporus sanguineus* ในการกำจัดหมึกออฟเซตออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์โดยวิธีการลอยฟองอากาศ พบว่า เมื่อใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน และทิ้งเวลาให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาหรือระยะพักเยื่อเป็นเวลา 30 นาที จะทำค่าความขาวสว่างสูงเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณหมึกที่เหลืออยู่บนกระดาษลดลงมากกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรง ทั้งค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ และค่าดรรชนีความต้านทานแรงฉีก มีค่ามากสูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 กระดาษปรีฟน้ำหนักมาตรฐาน 45 g/m² บริษัท ดับบลิวพีเอส จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.2 เซลลูเลสที่เตรียมจาก *Aspergillus niger* ค่า activity เท่ากับ 1.10 Unit/ml
- 3.1.3 อะไมเลสที่เตรียมจาก *Aspergillus niger* ค่า activity เท่ากับ 1.10 Unit/ml
- 3.1.4 กระดาษกรองเบอร์ 1 ; ยี่ห้อ Whatman บริษัท Whatman International จำกัด ประเทศอังกฤษ
- 3.1.5 อาหารสูตร Potato Dextrose Agar (PDA), Production medium ที่เตรียมได้
- 3.1.6 อาหารสูตร Fungal amylase production ที่เตรียมได้
- 3.1.7 สารลดแรงตึงผิว (non-ionic surfactant) บริษัท Eka Chemicals จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.8 กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) บริษัท Merck KGaA จำกัด ประเทศเยอรมนี
- 3.1.9 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) ยี่ห้อ Formax รุ่น 450 บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.10 เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell) ยี่ห้อ Voith รุ่น Delta 25 บริษัท Voith ประเทศเยอรมนี
- 3.1.11 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) รุ่น Digipress บริษัท นานาสยาม อินเทอร์เน็ต จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.12 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness tester) ยี่ห้อ Regmed รุ่น CF/A บริษัท Regmed ประเทศบราซิล

- 3.1.13 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Optical tester) ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color-touch PC บริษัท Technidyne Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.14 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester) ยี่ห้อ Strograph รุ่น E-S บริษัท Toyo Seiki Seisaku-Sho จำกัด ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.15 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester) ยี่ห้อ Pro Tear Electronic Elmendorf Tear Tester บริษัท Thwing-Albert instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.16 เครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์ (Spectrodensitometer) ยี่ห้อ x-rite รุ่น 500 series บริษัท X-Rite, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.17 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber quality analyzer, FQA) ยี่ห้อ Optest equipment Inc. ประเทศแคนาดา
- 3.1.18 เครื่องชั่ง (Balance) ยี่ห้อ GX-20K บริษัท AND Co.Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.19 เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (Balance) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PM 2500 ประเทศสวิทเซอร์แลนด์
- 3.1.20 ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมนี
- 3.1.21 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter) ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 98128 บริษัท Hanna Instrument ประเทศไทย

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการทดลองจะแบ่งเป็นการเตรียมวัสดุและเอนไซม์เพื่อใช้ในการทดลอง และการทดลอง 2 สภาวะ คือ การทดลองควบคุม และการทดลองที่ใช้เอนไซม์คืออะไมเลส และเซลลูเลส ดังนี้

3.2.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2.1 เตรียมกระดาษที่ใช้ในการทดลอง

นำกระดาษปรีฟที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 45 g/m^2 มาพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี ฐานน้ำ ควบคุมให้มีปริมาณหมึกเท่ากันทุกแผ่น จากนั้นเก็บกระดาษไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยในแต่ละภาวะการทดลอง จะมีการใช้กระดาษที่ผ่านการพิมพ์แล้วจำนวน 52 แผ่นหรือ 250 g หลังจากนั้นนำกระดาษที่ได้มาหาค่าความชื้น เพื่อนำไปคำนวณน้ำหนักเยื่อแห้ง (oven dry weight) ด้วยเครื่องวัดความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 เครื่องวัดความชื้น (moisture balance)

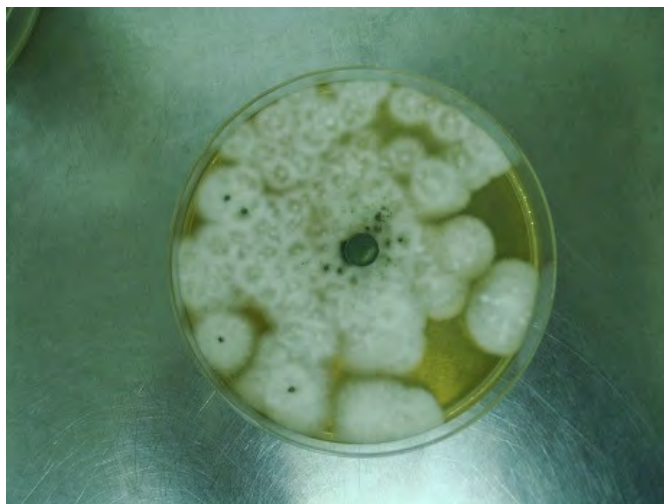
3.3.1.2 การผลิตอะไมเลสและเซลลูเลสเพื่อใช้ในการกำจัดหมึก

1. ผลิตเอนไซม์อะไมเลสจากรา *Aspergillus niger* โดยทำการเลี้ยงเชื้อในอาหารสูตร PDA (potato dextrose agar) และสูตรอาหาร fungal amylase production [26] ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นทำการเพาะเชื้อรา *A. niger* ในจานเพาะเชื้อที่เท PDA ไว้ แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำชิ้นวุ้นใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเลี้ยงบนเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำผลผลิตที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรองเพื่อเก็บเอนไซม์ในส่วนที่เป็นของเหลวไว้ใช้ จากนั้นทำการตรวจสอบแอกทีวิตีของอะไมเลสด้วยวิธี DNS assay ตามวิธีของ Miller และคณะ [24]



ภาพที่ 3-2 เชื้อราที่เจริญอยู่บนอาหารสูตร PDA ในการเตรียมอะไมเลส

2. ผลิตเซลลูเลสจากรา *Aspergillus niger* โดยเลี้ยงเชื้อในอาหารสูตร PDA (potato dextrose agar) และสูตรอาหาร production medium [25] ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที ทำการเพาะเชื้อรา *A. niger* ในจานเพาะเชื้อที่เท PDA ไว้ แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำชิ้นวุ้นใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเลี้ยงบนเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำผลผลิตที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรองเพื่อเก็บส่วนที่เป็นของเหลวไว้ใช้ จากนั้นทำการตรวจสอบแอสคัสที่วิธีของอะไมเลสด้วยวิธี DNS assay ตามวิธีของ Miller และคณะ [24]



ภาพที่ 3-3 เชื้อราที่เจริญอยู่บนอาหารสูตร PDA ในการเตรียมเซลลูเลส

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 1 : การทดลองควบคุม (ไม่ใช่เอนไซม์)

1. นำกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมาตัดให้มีขนาด 1x1 นิ้ว แล้วจึงนำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 16 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัว โดยปิดฝาให้สนิทป้องกันการระเหยของน้ำ

2. หลังจากแช่น้ำครบเวลาที่กำหนดนำกระดาษมาตีกระจายให้เป็นเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ ที่ความเข้มข้นของเยื่อ 6% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยใส่สารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ (nonionic surfactant) 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 5.5 ± 0.2 ด้วยกรดซัลฟิวริก

3. ทำการตีกระจายเยื่อโดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 50 °C โดยในระหว่างการตีกระจายเยื่อ เพื่อป้องกันการกระจุกตัวของเยื่อจะมีการหยุดเครื่องเพื่อทำการกววนเยื่อทุกๆ 10 นาที จนหลังจากผ่านไป 30 นาทีแล้วจะไม่มีการหยุดเครื่อง เมื่อทำการตีกระจายเยื่อจนครบ 60 นาทีแล้ว จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 30 นาที โดยในระหว่างพักเยื่อนั้นจะมีการกววนเยื่อเป็นระยะๆ คือ จะทำการการพักเยื่อไว้ 3 นาทีสลับกับการกววนเยื่อ 2 นาที เมื่อครบเวลา 30 นาทีแล้ว ทำการปรับอุณหภูมิให้เป็น 90 °C เพื่อให้เอนไซม์เสื่อมสภาพ ลดความเร็วในการตีกระจายเยื่อเป็น 150 รอบต่อนาที ก่อนทิ้งเยื่อไว้ 5 นาทีแล้วค่อยหยุดเครื่อง ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับสมบัติในภาวะการทดลองที่มีการใช้เอนไซม์ โดยการพักเยื่อนั้นก็เพื่อให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาต่อ และการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 90 °C เพื่อเป็นการยุติการทำงานของเอนไซม์

4. นำเยื่อที่ได้จากการตีกระจายเยื่อไปปรับความเข้มข้นของเยื่อให้มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.8 ด้วยน้ำ แล้วเตรียมน้ำเยื่อแยกออกเป็น 2 ส่วน

4.1 นำเยื่อส่วนแรก ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึกหลังการตีกระจายเยื่อ ไปวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI 227 om-04 และดูสัดส่วนน้ำหนักเส้นใยด้วยเครื่อง FQA ตามมาตรฐาน ISO 16065 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ กรัมต่อตารางเมตร 80 นำแผ่น

ทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

4.2 นำเยื่อส่วนที่เหลือหลังจากการตีกระจายเยื่อมาทำการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ในเครื่องลอยฟองอากาศ เท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดหมึก คำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้ (%yield) ทำการวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI 227 om-04 และคู่มือมาตรฐานวิทยาลัยด้วยเครื่อง FQA ตามมาตรฐาน ISO 16065

จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 80g/m^2 นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

5. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองทั้งหมดมาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.2.2.3 การทดลองส่วนที่ 2 : ทำการกำจัดหมึกออกจากกระดาษโดยวิธีการลอยฟองอากาศด้วยอะไมเลสหรือเซลลูเลสที่เตรียมได้

1. นำกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำมาตัดให้มีขนาด 1×1 นิ้ว นำไปแช่น้ำทิ้งไว้ 16 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัว โดยปิดฝาให้สนิทป้องกันการระเหยออกของน้ำ

2. หลังจากแช่น้ำครบเวลาที่กำหนดนำกระดาษมาตีกระจายให้เป็นเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ ที่ความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 6 โดยใส่สารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ (nonionic surfactant) ร้อยละ ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ปรับค่า 0.3pH ให้ได้เท่ากับ $5.5 \pm$ เพื่อให้ได้สภาวะ 0.2 ความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ ด้วยกรดซัลฟิวริก โดยการทดลองในส่วนนี้ จะมีการใส่เอนไซม์เซลลูเลสหรืออะไมเลสที่ปริมาณต่างๆ ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส 3 ระดับคือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และปริมาณเอนไซม์อะไมเลส 3 ระดับคือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

3. ทำการตีกระจายเยื่อโดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 50°C โดยในระหว่างการตีกระจายเยื่อ เพื่อป้องกันการกระจุกตัวของเยื่อจะมีการหยุดเครื่องเพื่อทำการกววเยื่อทุกๆ 10 นาที จนหลังจากผ่านไป 30 นาทีแล้วจะไม่มีหยุดเครื่อง เมื่อทำการตีกระจายเยื่อจนครบ 60 นาทีแล้ว จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 30 นาที โดยในระหว่างพักเยื่อนั้นจะมีการกววเยื่อเป็นระยะๆ คือ จะทำการกววพักเยื่อไว้ 3 นาทีสลับกับการกววเยื่อ 2 นาที เมื่อครบเวลา 30 นาทีแล้ว ทำการปรับอุณหภูมิให้เป็น 90°C เพื่อให้เอนไซม์เสื่อมสภาพ ลดความเร็วในการตีกระจายเยื่อเป็น 150 รอบต่อนาที ก่อนทิ้งเยื่อไว้ 5 นาทีแล้วค่อยหยุดเครื่อง โดยการพักเยื่อนั้นก็เพื่อให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาต่อโดยให้แรงกลจากเครื่องตีกระจายเยื่อทำลายเส้นใยน้อยที่สุด และการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 90°C เพื่อเป็นการยุติการทำงานของเอนไซม์

4. นำเยื่อที่ได้จากการตีกระจายเยื่อไปเจือจางด้วยน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของเยื่อให้มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.8 แล้วแบ่งเยื่อแยกออกเป็น 2 ส่วน

4.1 นำเยื่อส่วนแรก ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึก ไปวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI 227 om-04 และดูสัดส่วนวิทยาเส้นใยด้วยเครื่อง FQA ตามมาตรฐาน ISO 16065 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ กรัมต่อตารางเมตร 80 นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตาม

มาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 และตรวจวัดความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

4.2 นำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ในเครื่องลอยฟองอากาศเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 15 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดหมึก คำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้ (%yield) ทำการวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI 227 om-04 และดูสัญญาณวิทยาเส้นใยด้วยเครื่อง FQA ตามมาตรฐาน ISO 16065

จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 80g/m^2 นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ตรวจวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 และตรวจวัดความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

5. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองทั้งหมดมาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.2.2.4 การทดลองส่วนที่ 3 : ทำการกำจัดหมึกออกจากกระดาษโดยวิธีการลอยฟองอากาศด้วยอะไมเลสผสมกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดเอนไซม์

วิธีการทดลองในส่วนนี้ จะทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่จะมีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกัน โดยเลือกจากความเข้มข้นของเอนไซม์ในภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาใช้ร่วมกันใน 3 ภาวะการทดลองดังนี้

1. หลังจากขั้นตอนการใส่สารลดแรงตึงผิว ทำการปรับอุณหภูมิเป็น $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 5.5 ± 0.2 แล้ว จะทำการใส่อะไมเลสในความเข้มข้นจากภาวะที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการตีกระจายเยื่อ โดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 30 นาที โดยมีการหยุดเครื่องและกวนทุก 10 นาที เมื่อครบ 30 นาที

จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจะทำการปรับอุณหภูมิให้เป็น 90 °C เพื่อให้อะไมเลสเสื่อมสภาพ ต่อมาลดอุณหภูมิลงเป็น 50 °C แล้วใส่เซลลูเลสในความเข้มข้นจากภาวะที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการตีกระจายเยื่อ โดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลา จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 15 นาที ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 90 °C เพื่อเป็นการยุติการทำงานของเอนไซม์

2. หลังจากขั้นตอนการใส่สารลดแรงตึงผิว ทำการปรับอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส และปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 5.5 ± 0.2 แล้ว จะทำการใส่เซลลูเลสในความเข้มข้นจากภาวะที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการตีกระจายเยื่อ โดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 30 นาที โดยมีการหยุดเครื่องและกวนทุก 10 นาที เมื่อครบ 30 นาที จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจะทำการปรับอุณหภูมิให้เป็น 90 °C เพื่อให้เซลลูเลสเสื่อมสภาพ ต่อมาลดอุณหภูมิลงเป็น 50 °C แล้วใส่อะไมเลสในความเข้มข้นจากภาวะที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการตีกระจายเยื่อ โดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลา จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 15 นาที ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 90 °C เพื่อเป็นการยุติการทำงานของเอนไซม์

3. หลังจากขั้นตอนการใส่สารลดแรงตึงผิว ทำการปรับอุณหภูมิเป็น 50 °C และปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 5.5 ± 0.2 แล้ว จะทำการใส่อะไมเลสและเซลลูเลสในความเข้มข้นจากภาวะที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการตีกระจายเยื่อ โดยปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องตีกระจายเยื่อให้เท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 60 นาที โดยมีการหยุดเครื่องและกวนทุก 10 นาที เมื่อครบ 30 นาที จะไม่มีการหยุดเครื่อง เมื่อครบ 60 นาที จะทำการพักเยื่อเป็นเวลา 30 นาที โดยในระหว่างพักเยื่อนั้นจะมีการกวนเยื่อเป็นระยะๆ คือ จะทำการการพักเยื่อไว้ 3 นาทีสลับกับการกวนเยื่อ 2 นาที เมื่อครบเวลา 30 นาทีแล้ว ทำการปรับอุณหภูมิให้เป็น 90 °C เพื่อให้เอนไซม์เสื่อมสภาพ

โดยหลังจากขั้นตอนการตีกระจายเยื่อทั้ง 3 ภาวะการทดลอง จะนำเยื่อที่ได้จากการตีกระจายไปเจือจางด้วยน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของเยื่อให้มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.8 แล้วแบ่งเยื่อแยกออกเป็น 2 ส่วน

1. นำเยื่อส่วนแรก ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกำจัดหมึก ไปวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI 227 om-04 และดูดัชนีฐานวิทยาศาสตร์เส้นใยด้วยเครื่อง FQA ตามมาตรฐาน ISO 16065 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ กรัมต่อตารางเมตร 80 นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

2. นำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ในเครื่องลอยฟองอากาศเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 15 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดหมึก คำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้ (%yield) ทำการวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI 227 om-04 และดูดัชนีฐานวิทยาศาสตร์เส้นใยด้วยเครื่อง FQA ตามมาตรฐาน ISO 16065

จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 80 g/m² นำแผ่นทดสอบที่ได้มาวัดค่าสมบัติต่างๆ เช่น ความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 om-04 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 และดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98

3. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองทั้งหมดมาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.3 วิธีในการทดสอบสมบัติต่างๆของกระดาษ

3.3.1 ปริมาณผลผลิตที่ได้ (%yield)

ปริมาณผลผลิตที่ได้ คือ ปริมาณของน้ำเยื่อที่เหลือหลังจากกระบวนการกำจัดหมึกออกจากเครื่องลอยฟองอากาศ โดยในขณะการลอยฟองอากาศจะมีทั้งอนุภาคหมึกและเส้นใยบางส่วนหลุดติดออกมา ทำให้ปริมาณน้ำเยื่อลดลง ปริมาณผลผลิตที่ได้สามารถคำนวณจากปริมาณน้ำเยื่อที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศและปริมาณของหมึกและน้ำเยื่อที่ออกมาจากเครื่องลอยฟองอากาศ โดยคำนวณจากสูตร

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

โดย Feed คือ น้ำหนักของน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ

Reject คือ น้ำหนักของน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาพร้อมหมึกจากเครื่องลอยฟองอากาศ

3.3.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (fiber morphology)

สัณฐานวิทยาของเส้นใย สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ดังแสดงในภาพที่ 3-4 ตามมาตรฐาน ISO 16065 [27] ทำการวัด ในการวัดเส้นใยในแต่ละครั้งจะวัดจำนวนเส้นใยครั้งละ 5000 เส้น ซึ่งเครื่องวิเคราะห์เส้นใยสามารถวัดเส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 0.7 มิลลิเมตรขึ้นไป การรายงานผลจึงเป็นแบบ LWW (mean length-weight weighted) ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยที่ไม่นำความยาวของเส้นใยขนาดเล็กมาคิดด้วย โดยค่าต่างๆที่ทำการวัดได้แก่ ค่าความยาวของเส้นใย (fiber length) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ดรรชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) ดรรชนีความหักงอของเส้นใย ((kink index) และความกว้างของเส้นใย (width)



ภาพที่ 3-4 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA)

3.3.3 สภาพระบายได้ (freeness)

สภาพระบายได้ คือความสามารถของเส้นใยในการระบายน้ำหรือการคั่งน้ำของเส้นใย เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติในการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ โดยเครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness tester) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI 227om-04 [28] หน่วยเป็นมิลลิลิตร (ml) ถ้าความเป็นอิสระของเยื่อสูง แสดงว่าเยื่อสามารถระบายน้ำได้เร็ว การคั่งน้ำของเส้นใยมีน้อย แต่ถ้าความเป็นอิสระของเยื่อต่ำ แสดงว่าการระบายน้ำของเยื่อเกิดได้ช้า การคั่งน้ำของเส้นใยมีสูง



ภาพที่ 3-5 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (freeness tester)

3.3.4 การดิ่งหมึกโดยการลอยฟองอากาศ

นำเยื่อส่วนที่ผ่านการตีกระจายเยื่อแล้วมาทำการกำจัดหมึกออกด้วยเครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell) ดังแสดงในภาพที่ 3-6 โดยมีขั้นตอนในการกำจัดหมึกออกดังนี้

1. ทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อเป็นร้อยละ 0.8 โดยใช้ปริมาณน้ำเยื่อทั้งหมด 23 ลิตร เพื่อให้เครื่องลอยฟองอากาศสามารถทำงานได้
2. ทำการเทน้ำเยื่อลงไปในเครื่องลอยฟองอากาศ จนถึงขีดที่กำหนดไว้ (23 ลิตร) ทำการปิดเครื่องทางด้านบนด้วยใบพัดของเครื่อง
3. นำถังเปล่ามารองบริเวณท่อทางออกของน้ำเยื่อที่มีอนุภาคของหมึกที่ถูกกำจัดออกจากกระบวนการ (reject) เพื่อนำส่วนนี้ไปคำนวณปริมาณผลผลิตต่อไป
4. ทำการลอยฟองอากาศโดยปรับอัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ในเครื่องลอยฟองอากาศ 4 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที



ภาพที่ 3-6 เครื่องลอยฟองอากาศ (flotation cell)

3.3.5 การขึ้นแผ่นทดสอบ (handsheet)

สำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบจะใช้เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบแบบ rapid-Kothen (rapid-Kothen sheet former) ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ตามมาตรฐาน ISO 5269/2-1980 [29] โดยนำเยื่อทั้งก้อนและหลังการกำจัดหมึกออกมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร โดยขั้นตอนการขึ้นแผ่นทดสอบคือ

1. ทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อเป็นร้อยละ 0.3 แล้วคำนวณปริมาณน้ำเยื่อตามจำนวนแผ่นที่ต้องการโดยให้แต่ละแผ่นมีน้ำหนักมาตรฐาน 80 g/m²
2. หลังจากตวงน้ำเยื่อสำหรับ 1 แผ่นได้แล้ว เทน้ำเยื่อลงในส่วนขึ้นแผ่น โดยขั้นตอนระบบการทำงานของเครื่องจะเป็นแบบอัตโนมัติ จนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการระบายน้ำออก (drainage) แล้วจึงได้แผ่นทดสอบรูปวงกลม
3. นำแผ่นทดสอบที่ได้มาทำการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 9 นาที
4. หลังจากผ่านการอบแห้ง นำแผ่นทดสอบที่ได้มาทำการชั่งน้ำหนัก เพื่อให้ตามน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดไว้ตามต้องการ



ภาพที่ 3-7 เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ (rapid-Kothen sheet former)

3.3.6 การทดสอบสมบัติกระดาษ

ในการทดสอบสมบัติต่างๆของแผ่นทดสอบ จะทำการทดสอบสมบัติที่ไม่ทำให้แผ่นทดสอบเสียหายก่อน คือสมบัติทั่วไปของแผ่นทดสอบ เช่น น้ำหนักมาตรฐาน (basic weight) และสมบัติเชิงแสง (optical properties) เช่น ความขาวสว่าง (brightness) และ ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC) แล้วจึงทดสอบสมบัติที่ต้องมีการทำให้แผ่นทดสอบเสียหาย คือ สมบัติด้านความแข็งแรง (strength properties) ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และความต้านทานต่อแรงฉีก (tear resistance) แล้วนำค่าความแข็งแรงต่างๆที่ได้ ไปคำนวณและนำเสนอในค่าที่เป็นดัชนีของความแข็งแรงนั้นๆ

3.3.6.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basic weight)

น้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่มาตรฐาน หน่วยเป็น g/m^2 โดยการทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน ทำเพื่อให้แผ่นทดสอบทุกๆแผ่นที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อความเที่ยงตรงในการเปรียบเทียบค่าต่างๆที่ใช้วัดในแผ่นทดสอบ โดยนำแผ่นทดสอบที่ได้มาทำการชั่งน้ำหนักแล้วหารด้วยพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

3.3.6.2 ความขาวสว่าง (brightness)

ความขาวสว่างที่ใช้ในการทดสอบกระดาษ เป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน 457 นาโนเมตร โดยนำมาเปรียบเทียบกับแผ่นกระจายแสงที่ให้การสะท้อนแสงอย่างสมบูรณ์ (perfect reflecting diffuser) [30] โดยความขาวสว่างที่วัดได้เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับการกระเจิงแสงของกระดาษเท่านั้น ดังนั้นค่าความขาวสว่างนี้จึงอาจใช้เฉพาะในการระบุสมบัติของการฟอกเยื่อหรือสมบัติในการกำจัดหมึกเท่านั้น ในการวัดค่าความขาวสว่างนี้ทำตามมาตรฐาน TAPPI T 452 om-98 [31] โดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง Technidyne color touch PC ในภาพที่ 3-8 ในการวัดค่าความขาวสว่างนั้นจะทำการวัดทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทดสอบ โดยในแต่ละภาวะจะทำการวัดจำนวนละ 5 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะทำการวัด 5 ตำแหน่ง

3.3.6.2 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration ; ERIC)

ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในกระดาษ โดยหากมีค่าสูงแสดงว่ามีปริมาณหมึกเหลืออยู่บนกระดาษมาก แต่หากมีค่าน้อยแสดงว่าปริมาณหมึกบนกระดาษมีน้อย ในการวัดค่าความขาวสว่างนี้ทำตามมาตรฐาน TAPPI T-567 pm-97 [32] ตามทฤษฎี Kubelka-Munk โดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง Technidyne color touch PC ในภาพที่ 3-8 ในการวัดค่าความขาวสว่างนั้นจะทำการวัดทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทดสอบ โดยในแต่ละภาวะจะทำการวัดจำนวนละ 5 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะทำการวัด 5 ตำแหน่ง



ภาพที่ 3-8 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Technidyne color touch PC)

3.3.6.3 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าที่บอกถึงแรงสูงสุดที่กระดาษทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ในการทดสอบ หากค่าที่ได้สูงแสดงว่า กระดาษมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง แรงดึงที่ใช้จึงสูง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังภาพที่ 3-9 ตามมาตรฐานของ TAPPI T494 om-01 [33] โดยทำการทดสอบครั้งละ 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง ในแต่ละภาวะ หลังทดสอบจะนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสูตร

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

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีหน่วยคือ Nm/g



ภาพที่ 3-9 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

3.3.6.4 ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear resistance)

ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก คือ ค่าที่บอกถึงความสามารถของแผ่นทดสอบที่สามารถต้านแรงที่ใช้ในการฉีกแผ่นทดสอบ โดยนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบ หากมีค่าสูงแสดงว่าแผ่นทดสอบมีความต้านทานแรงฉีกสูง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก ดังภาพที่ 3-10 ตามมาตรฐานของ TAPPI T414 om-98 [34] โดยทำการทดสอบครั้งละ 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง ในแต่ละภาวะ หลังทดสอบ จะนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสูตร

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

ตรวจนี้ความต้านทานแรงฉีกมีหน่วยคือ $\text{mN m}^2/\text{g}$



ภาพที่ 3-10 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (tear resistance)

3.3.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะใช้เทคนิค ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เพื่อหาความสำคัญของตัวแปรต่อสมบัติต่างๆ โดยดูจากค่านัยสำคัญที่ได้ ซึ่งหากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 นั่นคือ ตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อสมบัติที่วิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยจะทำการวิเคราะห์ทางสถิติ 5 ขั้นตอนคือ

1. ทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้เซลล์ูเลสที่ความเข้มข้นในระดับต่างๆกัน
2. ทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้อะไมเลสที่ความเข้มข้นในระดับต่างๆกัน
3. ทำการเปรียบเทียบอะไมเลสและเซลล์ูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดเอนไซม์
4. ทำการเปรียบเทียบอะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับการทดลองควบคุม

5. ทำการเปรียบเทียบเซลล์ในภาวะที่ดีที่สุดกับการทดลองควบคุม

6. ทำการเปรียบเทียบการใช้อะไมเลสและเซลล์ในภาวะที่ดีที่สุดรวมกันกับการทดลอง

ควบคุม

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การนำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ จะเสนอถึงประสิทธิภาพของการใช้เอนไซม์เข้าร่วมในการกำจัดหมักด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ของอะไมเลสและเซลลูเลส โดยแบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบการใช้อะไมเลสและ เซลลูเลสในแต่ละชนิดของเอนไซม์ ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน คือ 0.1, 0.2 และ 0.3 % ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แล้วจึงนำภาวะที่ดีที่สุดของทั้งอะไมเลสและเซลลูเลสมาเปรียบเทียบกันเองและเทียบกับภาวะควบคุม และการทดลองที่ 2 นำภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 มารวมใช้กัน คือ ใช้ทั้งอะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส และใช้เอนไซม์ทั้งสองตามลำดับก่อนหลัง ทั้งนี้การดูถึงประสิทธิภาพของชนิดและปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้งสองชนิด จะพิจารณาจากสมบัติต่างๆที่ได้จากการทดสอบค่าจากเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้ เช่น สมบัติเชิงแสง สมบัติด้านความแข็งแรงเชิงกล สภาพระบายได้ และสัญญาณวิทยาของเส้นใย

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้เทคนิค ANOVA : single factor ค่า P-value อ้างอิงกับระดับนัยสำคัญเท่ากับ ($\alpha=0.05$) โดยในการพิจารณาจะดูจากค่า P-value และค่า F_{crit} พิจารณาโดยดูจากค่า P-value ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.05 และค่า F_{cal} (ค่า F จากการคำนวณ) มีค่ามากกว่า F_{crit} (ค่า F จากการเปิดตาราง) สามารถสรุปได้ว่า ผลของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าตัวแปรต่างๆในแต่ละการทดลองส่งผลต่อสมบัติต่างๆของเยื่อและแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบการใช้อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน

ค่าความขาวสว่าง (brightness)

ตารางที่ 4-1 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก (%)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	35.31±0.54	0
2	A 0.1%	37.14±0.52	5.18
3	A 0.2%	36.18±0.42	2.46
4	A 0.3%	39.23±0.97	11.12
5	C 0.1%	44.45±0.34	25.88
6	C 0.2%	47.85±0.55	35.51
7	C 0.3%	43.83±0.61	24.13

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

จากตารางที่ 4-1 เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพของการใช้อะไมเลสหรือเซลลูเลสต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลองฟองอากาศ จะเห็นได้ว่าการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลให้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้นกว่าการทดลองควบคุม โดยใช้อะไมเลสที่ความเข้มข้นในระดับต่างๆในการกำจัดหมึก พบว่า ค่าความขาวสว่างที่ได้ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นของอะไมเลสที่เพิ่มขึ้น โดยอะไมเลสที่ความเข้มข้น 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าความขาวสว่างสูงสุดที่ 39.23±0.97 % ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการใช้อะไมเลสเข้าช่วยในกระบวนการกำจัดหมึก ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่ออะไมเลสจะเข้าไปย่อยสลายแป้งที่อยู่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยออก ทำให้หมึกฟุ้งกระจายพื้นฐานน้ำที่ซึมลงไปใต้ชั้นแป้งและเกาะที่ผิวเส้นใยสามารถหลุดออกมาได้ง่ายขึ้นจากแรงกลในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ อนุภาคของหมึกจึงสามารถหลุดออกมาได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มสูงขึ้น [12] ส่วนในกรณีของเซลลูเลสความเข้มข้น 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะให้ค่าความขาวสว่างสูงสุดที่ 47.85 % หลังจากนั้นความขาวสว่างจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณของเซลลูเลสมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเซลลูเลสเริ่มเข้าไปทำลายเส้นใยในส่วนของเซลลูโลสมากขึ้น อนุภาคของหมึกจึงออกมาได้มากขึ้น แต่อนุภาคหมึก

อาจจะมีความถี่มากกว่าที่จะถูกกำจัดด้วยการลอยฟองอากาศ จึงทำให้อนุภาคของหมึกเหลือตกค้างมากในเยื่อหลังการกำจัดหมึกออก

ตารางที่ 4-2 ค่าทางสถิติของความขาวสว่างจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	70.839604	3.354131	1.81×10^{-11}
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	262.555769	3.354131	2.02×10^{-18}
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	1000.285600	3.354131	4.78×10^{-26}
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	717.672251	4.413873	5.89×10^{-6}
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	3349.681678	4.413873	6.62×10^{-22}

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-2 และพิจารณาค่า F_{cal} และค่า P-value พบว่า ค่าความขาวสว่างของอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%) , อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกภาวะการเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่า F_{crit}

ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC)

ตารางที่ 4-3 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ หลังการกำจัดหมึก	ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับ ภาวะควบคุม (%)
1	Control	1877.61±45.36	0
2	A 0.1%	1678.76±73.22	11.87
3	A 0.2%	1584.77±69.81	15.61
4	A 0.3%	1481.49±73.52	21.11
5	C 0.1%	1408.94±84.64	24.91
6	C 0.2%	1305.77±46.70	30.47
7	C 0.3%	1382.94±71.98	26.35

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของหมึก ออกจากระบบ โดยค่าดังกล่าวจะตรงข้ามกับค่าความขาวสว่าง คือ ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าสูงจะให้ค่าความขาวสว่างต่ำ โดยค่าจากตาราง 4-3 พบว่าการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดในการกำจัดหมึก จะให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุมในทุกกรณี จากการใช้อะไมเลส ที่ความเข้มข้นในระดับต่างๆในการกำจัดหมึก พบว่า ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ มีค่าลดลงเรื่อยๆตาม ความเข้มข้นของอะไมเลสที่เพิ่มขึ้น โดยอะไมเลสที่ความเข้มข้น 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ที่ 1481.49±73.52 ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการใช้อะไมเลสเข้าช่วยในกระบวนการ กำจัดหมึก ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่ออะไมเลสจะเข้าไปย่อยสลายโมเลกุลของแป้งที่อยู่บริเวณ ผิวหน้าของเส้นใยออก ทำให้หมึกเพคติกไซโครราฟิฐานน้ำที่ซึมลงไปใต้ชั้นแป้งและเกาะที่ผิวเส้นใย สามารถหลุดออกมาได้ง่ายขึ้นโดยอาศัยแรงกลในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ อนุภาคของหมึกจึง สามารถหลุดออกมาได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลง [12] ส่วนในกรณีของ การใช้เซลลูเลส นั้น เมื่อใช้ที่ความเข้มข้น 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้งจะให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ต่ำสุด คือ 1305.77±46.70 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเซลลูเลส ค่าปริมาณหมึก ที่เหลืออยู่จะเพิ่มสูงขึ้น โดยเป็นเหตุผลเดียวกับในกรณีความขาวสว่าง

ตารางที่ 4-4 ค่าทางสถิติของปริมาณหมึกที่เหลืออยู่จากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลส กับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	46.844246	3.354131	1.66×10^{-9}
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	8.419793	3.354131	0.001440
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	30.527877	4.413873	3.02×10^{-5}
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	395.306949	4.413873	1.07×10^{-13}
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	581.438479	4.413873	3.73×10^{-15}

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-2 และโดยพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%), อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกภาวะการเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่า F_{crit}

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

ตารางที่ 4-5 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ หลังการกำจัดหมึก	ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับ ภาวะควบคุม (%)
1	Control	1877.61±45.36	0
2	A 0.1%	1678.76±73.22	11.87
3	A 0.2%	1584.77±69.81	15.61
4	A 0.3%	1481.49±73.52	21.11
5	C 0.1%	1408.94±84.64	24.91
6	C 0.2%	1305.77±46.70	30.47
7	C 0.3%	1382.94±71.98	26.35

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

จากตารางที่ 4-5 การใช้เซลลูเลสหรืออะไมเลสต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของเยื่อหลังจากการลอยฟองอากาศ จะเห็นได้ว่าการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้นกว่าการทดลองควบคุม จากการใช้อะไมเลสที่ความเข้มข้นในระดับต่างๆในการกำจัดหมึก พบว่า ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นของอะไมเลสที่เพิ่มขึ้น โดยอะไมเลสที่ความเข้มข้น 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ 32.59 ± 3.45 (Nm/g) ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการใช้อะไมเลสช่วยในกระบวนการกำจัดหมึก ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ อะไมเลสจะเข้าไปย่อยสลายแป้งที่อยู่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยออก ทำให้เส้นใยถูกเปิดผิวหน้า แรงกลในการตีกระจายเยื่ออาจทำให้เส้นใยบางส่วนถูกทำให้มีขนาดเล็กกลง แล้วถูกกำจัดในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ จึงเหลือเส้นใยยาวในระบบมากขึ้น ซึ่งเส้นใยยาวจะส่งผลทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การใช้เซลลูเลสในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยการใช้เอนไซม์เซลลูเลสร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการลอยฟองอากาศสูงสุดที่ 36.00 Nm/g จากนั้นการเพิ่มปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสส่งผลทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ทั้งนี้อาจเป็น

เพราะการใช้เอนไซม์เซลลูเลสมากขึ้นส่งผลทำให้เหลือเส้นใยยาวในระบบมากขึ้น แต่ปริมาณเอนไซม์ที่มากเกินไป อาจทำให้เส้นใยยาวเริ่มถูกทำลาย

ตารางที่ 4-6 ค่าทางสถิติของดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆ ของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	4.131636	3.354131	0.027199
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	5.216636	3.354131	0.012146
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	18.621121	3.354131	8.28×10^{-6}
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	11.226998	4.413873	0.003560
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	36.230149	4.413873	1.08×10^{-5}

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-6 และการพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%), อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกภาวะการเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่า F_{crit}

ดรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index)

ตารางที่ 4-7 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อค่าดรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ดรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการกำจัดหมึก (kPa m ² /g)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	4.90±0.52	0
2	A 0.1%	5.29±0.42	7.96
3	A 0.2%	5.52±0.47	12.65
4	A 0.3%	5.81±0.05	18.57
5	C 0.1%	5.53±0.45	12.86
6	C 0.2%	6.18±0.58	26.12
7	C 0.3%	5.59±0.39	14.11

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยแล้ว ความแข็งแรงของเส้นใยส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกมากเช่นกัน โดยทั่วไปแล้ว เส้นใยยาวจะให้ความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเส้นใยสั้น เนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยสูงกว่า จากการใช้อะไมเลสที่ความเข้มข้นในระดับต่างๆในการกำจัดหมึก จากตารางที่ 4-7 พบว่า ค่าดรชนีความต้านทานแรงฉีก มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นของอะไมเลสที่เพิ่มขึ้น โดยอะไมเลสที่ความเข้มข้น 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้ค่าดรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ 32.59 ± 3.45 (Nm/g) ทั้งนี้เพราะอะไมเลสเข้าไปย่อยสลายแป้งที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเส้นใย เป็นการเปิดผิวหน้าของเส้นใย ทำให้แรงกลในการตีกระจายเยื่ออาจทำให้เส้นใยบางส่วนถูกทำให้มีขนาดเล็กลง แล้วถูกกำจัดในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ จึงเหลือเส้นใยยาวในระบบมากขึ้น ซึ่งเส้นใยยาวจะส่งผลทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น ดรชนีความต้านทานแรงฉีกจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับในกรณีดรชนีความต้านทานแรงดึงข้างต้น ส่วนในกรณีของเซลลูเลสที่ความเข้มข้น 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้งจะให้ค่าดรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงสุดที่ 6.18 ± 0.58 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นขึ้น ค่าที่ได้จะลดลง โดยเป็นเหตุผลเดียวกับค่าดรชนีความต้านทานแรงดึง

ตารางที่ 4-8 ค่าทางสถิติของดรชนี้ความต้านทานแรงฉีกจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	2.449454	3.354131	0.105302
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	46.844246	3.354131	1.66×10^{-9}
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	4.131636	3.354131	0.027199
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	2.449454	3.354131	0.105302
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	1.488889	9.552094	0.355527

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-8 และการพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ดรชนี้ความต้านทานแรงฉีกของเซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่า F_{crit} ส่วนในกรณีของการเปรียบเทียบกันระหว่างอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value สูงกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่าน้อยกว่า F_{crit}

สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

ตารางที่ 4-9 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	สภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึก (ml)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	238.75±1.77	0
2	A 0.1%	247.50±2.12	3.68
3	A 0.2%	248.25±2.47	3.98
4	A 0.3%	249.75±1.76	4.62
5	C 0.1%	251.00±2.82	5.15
6	C 0.2%	254.00±2.84	6.41
7	C 0.3%	250.50±2.12	4.92

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

จากการทดลองในกระบวนการกำจัดหมึก ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึกด้วยการลอยฟองอากาศ มีค่าสูงกว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อก่อนการกำจัดหมึกในทุกกรณี เนื่องจากการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เส้นใยสั้นจะถูกกำจัดไปพร้อมกับฟองอากาศ และอนุภาคหมึกที่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ เส้นใยสั้นในระบบจึงลดลง ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยจึงลดลง เนื่องจากเส้นใยยาวมีพื้นที่ผิวในการดูดซับได้น้ำน้อยกว่าเส้นใยสั้น ส่งผลให้น้ำถูกระบายออกมาได้มากกว่า ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อหลังการลอยฟองอากาศจึงสูงกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ [23]

และจากค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4-9 เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพของการใช้เอนไซม์ต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ พบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อจากการใช้เอนไซม์จะสูงกว่าการทดลองควบคุมในทุกกรณี โดยเฉพาะในการใช้เซลลูเลสจะมีค่าสภาพระบายได้สูงกว่าอะไมเลส ทั้งนี้เนื่องจากเซลลูเลสจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยบริเวณเซลลูเลสโดยตรง ทำให้เหลือเส้นใยสั้นอยู่ในระบบในปริมาณที่น้อย การดูดซับน้ำจึงทำได้น้อย การระบายน้ำจึงมีมาก ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อจึงมาก

ตารางที่ 4-10 ค่าทางสถิติของสภาพระบายน้ําที่ได้ของเยื่อจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	1.488889	9.552094	0.355527
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	46.844246	3.354131	1.66×10^{-9}
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	5.166667	9.552094	0.106727
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	74.461538	18.512821	0.013165
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	696.200000	18.512821	0.001433

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-10 และโดยพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ค่าสภาพระบายน้ําที่ได้ของเยื่อของเซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่า F_{crit} ส่วนในกรณีของการเปรียบเทียบกันระหว่างอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน และอะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value สูงกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (yield)

ตารางที่ 4-11 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อเยื่อหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (%)	ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	97.66±1.24	0
2	A 0.1%	96.22±1.27	1.47
3	A 0.2%	96.09±0.91	1.94
4	A 0.3%	96.40±1.33	1.29
5	C 0.1%	94.22±0.30	3.52
6	C 0.2%	96.18±0.74	1.51
7	C 0.3%	95.25±1.06	2.67

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

ค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4-11 การใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้น โดยไม่พบความแตกต่างกันมากนัก แสดงว่าเอนไซม์ทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ โดยค่าต่ำสุดเท่ากับ 96.09±0.91 และค่าสูงสุด คือ 96.40±1.33

ตารางที่ 4-12 ค่าทางสถิติของปริมาณผลผลิตของเยื่อจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F _{cal}	F _{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.034202	9.552094	0.966748
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	3.261407	9.552094	0.176821
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	0.041415	18.512821	0.857566
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	0.323988	18.512821	0.626623
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	1.762210	18.512821	0.315604

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-2 และโดยพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ปริมาณผลผลิตของเยื่อ อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%), อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกภาวะการเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value มากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ความยาวของเส้นใย (fiber length)

ตารางที่ 4-13 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความยาวของเส้นใยเฉลี่ยหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความยาวของเส้นใยเฉลี่ยหลังการกำจัดหมัก (mm)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	1.641±0.020	0
2	A 0.1%	1.664±0.015	1.41
3	A 0.2%	1.648±0.019	0.43
4	A 0.3%	1.653±0.000	0.73
5	C 0.1%	1.741±0.010	12.50
6	C 0.2%	1.764±0.023	13.94
7	C 0.3%	1.750±0.100	13.69

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

การใช้เอนไซม์เซลลูเลสหรืออะไมเลสส่งผลให้ความยาวของเส้นใยของเยื่อหลังการกำจัดหมักด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ โดยอะไมเลสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากภาวะควบคุมมากนัก ส่วนในกรณีของเซลลูเลสจะให้ความยาวของเส้นใยสูงกว่าอะไมเลส ซึ่งเซลลูเลสที่ 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้งจะให้ค่าความยาวเส้นใยสูงสุด 1.764±0.023 mm เมื่อพิจารณาจากค่าในตารางที่ 4-11 เมื่อเพิ่มปริมาณของเซลลูเลสมากขึ้น ความยาวของเส้นใยเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากเซลลูเลสสามารถเข้าไปย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสได้โดยตรง โดยเส้นใยสั้นจะถูกเซลลูเลสเข้าทำปฏิกิริยาก่อน

เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยยาว จึงอาจทำให้ปริมาณเส้นใยยาวเหลืออยู่ในระบบมากกว่า [23] แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเซลลูโลสมากขึ้นกลับส่งผลให้ความยาวของเส้นใยลดลง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่าเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์มาก เอนไซม์จะเริ่มเข้าไปทำลายเส้นใยขนาดยาวด้วย จึงส่งผลทำให้ความยาวของเส้นใยโดยเฉลี่ยลดลง

ตารางที่ 4-14 ค่าทางสถิติของความยาวของเส้นใยเฉลี่ยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.299557	9.552094	0.761007
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	6.321455	9.552094	0.045353
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	21.951193	18.512821	0.032278
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	0.758092	18.512821	0.775728
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	14.788889	9.552094	0.355527

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-8 และการพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ความยาวของเส้นใยเฉลี่ยของเซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่า F_{crit} ส่วนในกรณีของการเปรียบเทียบกันระหว่างอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน และอะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value สูงกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fine content)

ตารางที่ 4-15 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมึก (%)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	37.05±0.67	0
2	A 0.1%	36.40±0.86	-1.76
3	A 0.2%	35.28±0.22	-4.79
4	A 0.3%	34.19±0.47	-7.73
5	C 0.1%	34.00±0.75	-8.24
6	C 0.2%	33.97±0.78	-8.32
7	C 0.3%	33.31±0.13	-10.1

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

จากการทดลองในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจะมีค่าลดลงกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ เนื่องจากในขณะที่มีการลอยฟองอากาศอาจมีเส้นใยสั้นบางส่วน ถูกกำจัดโดยเกาะติดไปกับฟองอากาศ จากผลการทดลองในตารางที่ 4-13 การใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีค่าน้อยลงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ โดยการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิด ผลการทดลองที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4-16 ค่าทางสถิติของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.329428	9.552094	0.742445
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.012677	9.552094	0.987456
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	0.541497	9.552094	0.629816
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	2.449454	3.354131	0.105302
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	0.885820	18.512821	0.445964

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-14 และการพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของอะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%), อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกภาวะการเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value น้อยมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ลักษณะของเส้นใย (fiber characteristic)

ตารางที่ 4-17 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความโค้งงอของเส้นใยหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความโค้งงอของเส้นใย หลังการกำจัดหมึก	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	0.081±0.060	0
2	A 0.1%	0.080±0.002	-1.25
3	A 0.2%	0.078±0.006	-3.7
4	A 0.3%	0.075±0.002	-7.4
5	C 0.1%	0.074±0.003	-8.64
6	C 0.2%	0.072±0.006	-11.11
7	C 0.3%	0.070±0.007	-13.5

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

ตารางที่ 4-18 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความกว้างของเส้นใยหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความกว้างของเส้นใย หลังการกำจัดหมึก (mm)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	1.710±0.01	0
2	A 0.1%	1.698±0.01	-0.71
3	A 0.2%	1.730±0.02	1.18
4	A 0.3%	1.670±0.02	-0.23
5	C 0.1%	1.730±0.01	1.18
6	C 0.2%	1.715±0.04	2.94
7	C 0.3%	1.738±0.04	1.64

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

จากการทดลองในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ พบว่าการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ส่งผลให้ความโค้งงอของเส้นใย (mean curl) ดรรชนีการหักงอของเส้นใย (kink index) และความกว้างของเส้นใย (fiber width) หลังการกำจัดหมึกมีค่าลดลงก่อนการลอยฟองอากาศในทุกภาวะการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของเส้นใยดังกล่าว มีบางส่วนที่ติดไปกับฟองอากาศในช่วงการลอยฟองอากาศ จึงอาจทำให้เส้นใยที่มีลักษณะดังกล่าวมีจำนวนลดลง

ตารางที่ 4-19 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ยหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความกว้างของเส้นใย	
		เฉลี่ยหลังการกำจัดหมึก (mm)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	1.710±0.01	0
2	A 0.1%	1.698±0.01	-0.71
3	A 0.2%	1.730±0.02	1.18
4	A 0.3%	1.670±0.02	-0.23
5	C 0.1%	1.730±0.01	1.18
6	C 0.2%	1.715±0.04	2.94
7	C 0.3%	1.738±0.04	1.64

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส

เมื่อพิจารณาจากการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสจะพบว่าไม่มีผลต่อค่าความโค้งงอของเส้นใยและการหักงอของเส้นใยน้อย โดยเซลลูเลสส่งผลต่อการลดลงของความโค้งงอของเส้นใยกว่าการใช้อะไมเลส และเมื่อพิจารณาถึงความกว้างของเส้นใย พบว่า ไม่มีทิศทางที่ชัดเจน โดยพบความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม

ตารางที่ 4-20 ค่าทางสถิติของความโค้งของเส้นใยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.240310	9.552094	0.800197
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.081818	9.552094	0.923426
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	0.097561	18.512821	0.784334
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	2.000000	18.512821	0.440767
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	1.352000	18.512821	0.364908

ตารางที่ 4-21 ค่าทางสถิติของดรรชนีการหักงอของเส้นใยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	3.498244	9.552094	0.164403
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.115893	9.552094	0.894371
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	2.761581	18.512821	0.238441
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	0.422822	18.512821	0.292893
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	1.168283	18.512821	0.392758

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor จากตาราง 4-20, 4-21 และ 4-22 และการพิจารณาจากค่า F_{cal} และ P-value พบว่า การเปรียบเทียบกันในภาวะต่างๆ คือ อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน, อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด (อะไมเลส 0.3% และเซลลูเลส 0.2%), อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม และเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม ไม่พบความแตกต่างกันของความโค้งของเส้นใย (mean curl) ดรรชนีการหักงอของเส้นใย (kink index) และความกว้างของเส้นใย (fiber width) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกภาวะการเปรียบเทียบ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-22 ค่าทางสถิติของความกว้างของเส้นใยเฉลี่ยจากการเปรียบเทียบภาวะต่างๆของอะไมเลสกับเซลลูเลสและภาวะควบคุม

ภาวะในการเปรียบเทียบ	F_{cal}	F_{crit}	P-value
อะไมเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	0.020904	9.552094	0.979455
เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่างกัน	2.628627	9.552094	0.218992
อะไมเลสและเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุด	0.995555	9.552094	0.466000
อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	0.422822	18.512821	0.582249
เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดกับภาวะควบคุม	5.937557	18.512821	0.135111

การทดลองที่ 2 เปรียบเทียบภาวะที่ดีที่สุดใช้อะไมเลสและเซลลูเลสกับภาวะควบคุม

ตารางที่ 4-23 ค่าทางสถิติของสมบัติต่างๆของเยื่อและแผ่นทดสอบจากการทดลองการใช้อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลสในภาวะที่ต่างกัน

สมบัติของเยื่อ	F _{cal}	F _{crit}	P-value
ความขาวสว่าง	2926.905649	2.866266	4.85x10 ⁻⁴³
ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	332.218102	2.866266	2.78x10 ⁻²⁶
ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	29.352293	2.866266	8.86x10 ⁻¹⁰
ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก	33.791429	2.866266	1.44x10 ⁻¹⁰
สภาพระบายได้	82.28	6.591382	0.000474
ปริมาณผลผลิตของเยื่อ	1.858948	6.591382	0.277220
ความยาวของเส้นใย	8.979939	6.591382	0.045911
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	1.399620	6.591382	0.365302
ความโค้งงอของเส้นใย	1.292621	6.591382	0.391599
ดรรชนีการหักงอของเส้นใย	1.351549	6.591382	0.376792
ความกว้างของเส้นใย	0.452590	6.591382	0.729559

ค่าความขาวสว่าง (brightness)

ตารางที่ 4-24 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ค่าความขาวสว่างหลังการกำจัดหมึก (%)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	35.31±0.54	0
2	A 0.3% +C 0.2%	49.80±0.41	41.03
3	A 0.3% - C 0.2%	52.20±0.41	47.83
4	C 0.2% - A 0.3%	48.87±0.55	38.19

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,
 A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

จากผลการทดลองค่าความขาวสว่างจากตารางที่ 4-12 เปรียบเทียบค่าหลังการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกัน จะพบว่าค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบหลังการลอยฟองอากาศเมื่อมีการใช้เอนไซม์เข้าร่วมในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ จะสูงกว่าการทดลองในภาวะควบคุมทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องจากหลังขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ อนุภาคของหมึกจะหลุดออกจากเส้นใยโดยเกาะติดไปกับฟองอากาศ แล้วจะถูกกำจัดโดยลอยสู่น้ำของเครื่องลอยฟองอากาศ ทำให้ได้ค่าความขาวสว่างสูงขึ้น

จากการใช้อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลส นั้น ในกรณีของการใช้อะไมเลสก่อนแล้วใช้เซลลูเลสตาม พบว่าให้ค่าความขาวสว่างสูงที่สุดที่ 52.20 ± 0.41 % ทั้งนี้เนื่องมาจากอะไมเลสย่อยสลายโมเลกุลของแป้งที่บริเวณผิวหน้าของกระดาษ เซลลูเลสจึงสามารถที่จะเข้าไปทำงานในการย่อยสลายเซลลูโลสได้ในบริเวณกว้าง จึงทำให้ได้ค่าความขาวสว่างสูงที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 4.85×10^{-43} และค่า F_{cal} เท่ากับ 2926.905649 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (effective residual ink concentration; ERIC)

ตารางที่ 4-25 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการกำจัดหมึก	ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	1877.61±45.36	0
2	A 0.3% +C 0.2%	1307.70±81.16	30.36
3	A 0.3% - C 0.2%	1175.95±88.39	37.38
4	C 0.2% - A 0.3%	1327.28±35.21	29.32

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

จากผลการทดลองในตาราง 4-13 พบว่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบหลังการกำจัดหมึกโดยการลอยฟองอากาศเมื่อมีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสรวมกันในการกำจัดหมึกจะมีค่าลดลงกว่าปริมาณหมึกในการทดลองภาวะควบคุมทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องมาจากหลังการตีกระจายเยื่อ อนุภาคหมึกหลุดออกมาจากผิวหน้าเส้นใยแล้วถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ โดยการทดลองที่มีการใช้เอนไซม์จะให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่น้อยกว่าการทดลองควบคุม

ส่วนการใช้เอนไซม์ร่วมกัน การใช้อะไมเลสเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยก่อนแล้วจึงค่อยใช้เซลลูเลส ให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ดีที่สุดที่ 1175.95 ± 88.39 เหตุผลเดียวกันกับค่าความขาวสว่างดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 2.78×10^{-26} และค่า F_{cal} เท่ากับ 332.218102 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

ตารางที่ 4-26 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการกำจัดหมึก (Nm/g)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	26.96±4.30	0
2	A 0.3% +C 0.2%	37.69±3.15	39.8
3	A 0.3% - C 0.2%	38.25±1.75	41.81
4	C 0.2% - A 0.3%	36.79±2.78	36.46

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในตารางที่ 4-14 การใช้เอนไซม์ร่วมกัน การใช้อะไมเลส เข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยก่อนแล้วจึงค่อยใช้เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิด ให้ค่า ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุดที่ 38.25 ± 1.75 เนื่องจากอะไมเลสไปย่อยสลายโมเลกุลของ แป้งที่ผิวหน้าของกระดาษออกก่อน ทำให้เซลลูเลสสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยในส่วนของ เซลลูโลสได้มากขึ้น ทำให้เหลือเส้นใยยาวมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงมีมากขึ้น ความ แข็งแรงต่อแรงดึงจึงมีค่าสูง [23]

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 8.86×10^{-10} และค่า F_{cal} เท่ากับ 29.352293 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อดรรชนีความ แข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มี ค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

ดรรชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index)

ตารางที่ 4-27 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อดรรชนีความต้านทานแรงฉีกหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ดรรชนีความต้านทาน แรงฉีกหลังการกำจัด หมึก (kPa m ² /g)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	4.90±0.52	0
2	A 0.3% +C 0.2%	6.39±0.52	30.41
3	A 0.3% - C 0.2%	7.08±0.39	44.49
4	C 0.2% - A 0.3%	6.55±2.78	33.67

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่เอนไซม์พร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่เอนไซม์แล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-15 การใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน อะไมเลสจะเข้าทำ ปฏิกิริยากับเส้นใยก่อนแล้วจึงค่อยใช้เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิด จะให้ค่า ดรรชนีความต้านทานแรงฉีกสูงที่สุดที่ 7.08 ± 0.39 เนื่องจากอะไมเลสไปย่อยสลายโมเลกุลของแป้งที่

ผิวหน้าของกระดาษออกก่อน ทำให้เซลลูโลสสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยในส่วนของเซลลูโลสได้มากขึ้น ทำให้เหลือเส้นใยยาวมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงมีมากขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงมีค่าสูง [23]

และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 1.44×10^{-10} และค่า F_{cal} เท่ากับ 33.791429 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อธรรมชาติความต้านทานแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

สภาวะระบายได้ของเยื่อ (freeness)

ตารางที่ 4-28 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อสภาวะระบายได้ของเยื่อก่อนและหลังการกำจัดหมึก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	สภาวะระบายได้ของเยื่อหลังการกำจัดหมึก (ml)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	238.75±1.77	0
2	A 0.3% +C 0.2%	250.00±2.12	4.73
3	A 0.3% - C 0.2%	251.00±1.41	5.15
4	C 0.2% - A 0.3%	249.00±2.82	4.31

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในตารางที่ 4-16 ในกรณีการใช้เอนไซม์ร่วมกัน การใช้อะไมเลสเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยก่อนแล้วจึงค่อยใช้เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิดให้ค่าสภาวะระบายได้ของเยื่อสูงสุดที่ 251.00±1.41 เนื่องจากอะไมเลสไปย่อยสลายโมเลกุลของแป้งที่ผิวหน้าของกระดาษออกก่อน ต่อจากนั้นเซลลูเลสจึงเข้าไปย่อยสลายเส้นใยในส่วนของเซลลูโลสได้มากกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว ทำให้เหลือเส้นใยสั้นน้อยลง การคั่งน้ำของเส้นใยจึงน้อยลง ค่าสภาวะระบายได้จึงมีมาก

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 0.000474 และค่า F_{cal} เท่ากับ 82.28 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (yield)

ตารางที่ 4-29 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณผลผลิตของเยื่อ (%)	ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	95.66±1.24	0
2	A 0.3% +C 0.2%	95.23±1.09	0.45
3	A 0.3% - C 0.2%	93.55±0.43	2.19
4	C 0.2% - A 0.3%	94.90±0.81	0.8

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

ค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4-17 ปริมาณผลผลิตของเยื่อจากการใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยภาวะที่มีการใช้เอนไซม์จะมีปริมาณผลผลิตของเยื่อหลังการกำจัดหมักลดลงเพียงเล็กน้อย โดยค่าต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 93.55±0.43% และค่าสูงสุด คือ 95.66±1.24%

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 0.277220 และค่า F_{cal} เท่ากับ 1.858948 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ไม่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

)

ความยาวของเส้นใย (fiber length)

ตารางที่ 4-30 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความยาวของเส้นใยหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความยาวของเส้นใย หลังการกำจัดหมัก (mm)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	1.442±0.020	0
2	A 0.3% +C 0.2%	1.725±0.140	18.25
3	A 0.3% - C 0.2%	1.794±0.060	21.44
4	C 0.2% - A 0.3%	1.733±0.070	19.94

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

เมื่อพิจารณาค่าจากตาราง 4-18 ในกรณีการใช้อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิด การใช้อะไมเลสเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยโดยอะไมเลสไปย่อยสลายโมเลกุลของแป้งที่ผิวหน้าของกระดาษออกก่อน แล้วจึงค่อยใช้เซลลูเลสเข้าไปย่อยสลายเส้นใยในส่วนของเซลลูโลส ทำให้เหลือเส้นใยสั้นในระบบน้อยลง เส้นใยยาวจึงเหลืออยู่ในปริมาณมาก

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 0.045911 และค่า F_{cal} เท่ากับ 7.979939 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fine content)

ตารางที่ 4-31 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมัก (%)	ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	36.05±0.67	0
2	A 0.3% +C 0.2%	34.19±0.45	5.17
3	A 0.3% - C 0.2%	32.70±0.73	9.31
4	C 0.2% - A 0.3%	34.03±2.65	5.61

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

ค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4-19 จากการใส่อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกัน ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมักด้วยการลอยฟองอากาศ มีค่าลดลงจากปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของการทดลองในภาวะควบคุม โดยในขั้นตอนการกำจัดหมักด้วยการลอยฟองอากาศปริมาณเส้นใยขนาดเล็กบางส่วนจะถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้เหลือปริมาณเส้นใยขนาดเล็กน้อยกว่าก่อนการกำจัดหมัก

จากการใช้เอนไซม์ต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการกำจัดหมักด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีค่าน้อยลงกว่าการทดลองที่ไม่ใช้เอนไซม์ โดยการใส่เอนไซม์ต่างชนิดและปริมาณกัน ผลการทดลองที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของชนิดและปริมาณของเอนไซม์ จากตาราง 4-13 ค่า P-value เท่ากับ 0.365302 และค่า F_{cal} เท่ากับ 1.399620 แสดงว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า F_{crit} (ตารางที่ 23)

ลักษณะของเส้นใย (fiber characteristic)

ตารางที่ 4-32 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความโค้งงอหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความโค้งงอของเส้นใย หลังการกำจัดหมัก	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	0.081±0.060	0
2	A 0.3% +C 0.2%	0.071±0.004	-12.5
3	A 0.3% - C 0.2%	0.080±0.006	-1.25
4	C 0.2% - A 0.3%	0.080±0.002	-1.25

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

จากการทดลองในการกำจัดหมักด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน พบว่าการกำจัดหมักด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ส่งผลให้ความโค้งงอของเส้นใย (mean curl) ดรรชนีการหักงอของเส้นใย (kink index) และความกว้างของเส้นใย (fiber width) หลังการกำจัดหมักมีค่าลดลงก่อนการลอยฟองอากาศในทุกภาวะการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของเส้นใยดังกล่าว มีบางส่วนที่ติดไปกับฟองอากาศในช่วงการลอยฟองอากาศ จึงอาจทำให้เส้นใยที่มีลักษณะดังกล่าวมีจำนวนลดลง

ตารางที่ 4-33 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อการหักงอหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ดรรชนีการหักงอของ เส้นใยหลังการกำจัด หมัก	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	20.53±0.45	0
2	A 0.3% +C 0.2%	20.13±0.01	-2
3	A 0.3% - C 0.2%	20.18±0.06	-1.75

4	C 0.2% - A 0.3%	20.19±0.09	-1.7
---	-----------------	------------	------

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

จากผลการทดลองการใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกันต่อค่าความโค้งงอของเส้นใย ดรwxนนี้การหักงอของเส้นใย พบว่าการใช้เอนไซม์ส่งผลให้ค่าความโค้งงอของเส้นใยมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับการทดลองควบคุมเล็กน้อย โดยทั้งชนิดและปริมาณของเอนไซม์ส่งผลต่อค่าความโค้งงอของเส้นใยน้อยมาก ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และความกว้างของเส้นใย เพิ่มขึ้น และลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน

ตารางที่ 4-34 ผลของการใช้เอนไซม์ร่วมกันต่อความกว้างของเส้นใยหลังการกำจัดหมัก

การทดลอง	ภาวะการทดลอง	ความกว้างของเส้นใย หลังการกำจัดหมัก (mm)	ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม (%)
1	Control	1.710±0.01	0
2	A 0.3% +C 0.2%	1.671±0.06	-2.29
3	A 0.3% - C 0.2%	1.708±0.03	-0.12
4	C 0.2% - A 0.3%	1.675±0.07	-2.05

A = อะไมเลส, C = เซลลูเลส, A+C = ใส่อะไมเลสพร้อมกับเซลลูเลส ,

A-C = ใส่อะไมเลสแล้วตามด้วยเซลลูเลส, C-A = ใส่เซลลูเลสแล้วตามด้วยอะไมเลส

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเทคนิค ANOVA: single factor โดยพิจารณาจากค่า P-value ของผลของการใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน พบว่าชนิดและปริมาณของเอนไซม์ทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อค่าความโค้งงอของเส้นใย ดรwxนนี้การหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก ค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า F_{crit} โดยค่า P-value ของความโค้งงอของเส้นใย ดรwxนนี้การหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใย เท่ากับ 0.391599, 0.376792 และ 0.729559 และค่า F_{cal} ของความโค้งงอของเส้นใย ดรwxนนี้การหักงอของเส้นใย

และความกว้างของเส้นใย เท่ากับ 1.292621, 1.351549 และ 0.452590 ตามลำดับ (ตารางที่ 23)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของการใช้เอนไซม์ในชนิดและปริมาณที่ต่างกันต่อสมบัติต่างๆของเยื่อและกระดาษ

การกำจัดหมึกฟลิกโซกราฟีฐานน้ำออกจากกระดาษโดยวิธีการลอยฟองอากาศ ส่งผลต่อสมบัติต่างๆของแผ่นทดสอบ คือ ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอของเส้นใย ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายได้ และค่าความยาวของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับก่อนการลอยฟองอากาศ

การใช้เอนไซม์เข้าร่วมในการกำจัดหมึก เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายได้ และค่าความยาวของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของอะไมเลส ค่าต่างๆจะมีแนวโน้มไปในทางที่ดีขึ้น ส่วนเซลลูเลสจะให้ผลดีกว่าอะไมเลส โดยเซลลูเลสความเข้มข้นที่ 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้งจะให้ผลของค่าต่างๆที่ดีที่สุด แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเซลลูเลสผลของค่าต่างๆที่ได้จะด้อยลงกว่าที่ความเข้มข้น ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

5.1.2 ผลของการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อสมบัติต่างๆของเยื่อและกระดาษ

จากการทดลองการใช้เอนไซม์อะไมเลสร่วมกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิดพบว่า ส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ความโค้งงอของเส้นใย ค่าดัชนีการหักงอของเส้นใยมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายได้ และค่าความยาวของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นได้มากกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว ซึ่งการใช้เอนไซม์อะไมเลสก่อน แล้วจึงใช้เซลลูเลสเข้าร่วม โดยอะไมเลสที่ความเข้มข้น 0.3% และเซลลูเลสที่ความเข้มข้น 0.2% ของน้ำหนักเยื่อ

แห้ง จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยเมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก ค่าสภาพระบายได้ และค่าความยาวของเส้นใยมีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองทั้งสองส่วน คือ การใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว คือ เซลลูเลสที่ความเข้มข้น 0.2% กับการเลือกภาวะที่ดีที่สุดของเอนไซม์แต่ละชนิดแล้วมาใช้ร่วมกัน โดยอะไมเลสที่ความเข้มข้น 0.3% และเซลลูเลสที่ความเข้มข้น 0.2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งการใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดร่วมกันจะให้ผลของค่าต่างๆดีกว่าการใช้เอนไซม์เพียงชนิดเดียว แต่เมื่อมองในแง่ของเศรษฐศาสตร์เชิงอุตสาหกรรม อาจต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่จะต้องเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มชนิดของเอนไซม์ โดยพิจารณาจากความจำเป็นของการใช้กระดาษหรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระดาษว่ามีความจำเป็นในการใช้สมบัติต่างๆที่ดีขึ้นของกระดาษมากน้อยเพียงใด แล้วจึงพิจารณาว่าควรจะใช้ภาวะการทดลองส่วนไหนให้เหมาะสมกับความต้องการในผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพื่อความคุ้มค่าในเชิงการค้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การปรับค่า pH และ อุณหภูมิควรทำการปรับให้มีค่าคงที่ก่อนการใช้เอนไซม์ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ เนื่องจากปัจจัยทั้งสอง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ โดยทำการปรับค่า pH และอุณหภูมิให้คงที่ก่อนทำการตีกระจายเยื่อประมาณ 10 นาที

5.2.2 ควรเพิ่มระยะเวลาในการพักเยื่อหลังการตีกระจายเยื่อ โดยเพิ่มให้สูงขึ้นมากกว่า 30 นาที เพื่อให้เอนไซม์สามารถทำปฏิกิริยากับเยื่อกระดาษได้นานยิ่งขึ้น แล้วจึงทดสอบเพื่อดูค่าของสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษว่าดีขึ้นจากระยะเวลาพักเยื่อเดิมมากน้อยอย่างไร

5.2.3 ควรเพิ่มระยะเวลาในการลอยฟองอากาศให้สูงกว่า 10 นาที และเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ แล้วจึงดูว่าประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกดีขึ้นมากน้อยอย่างไร

5.2.4 จากผลการทดลองที่ได้ สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการต่อยอดเพื่อนำไปใช้จริงในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศโดยใช้เอนไซม์เข้าร่วมในอุตสาหกรรมกระดาษได้

รายการอ้างอิง

- [1] การวิจัยเทคโนโลยีกระดาษ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.school.net.th/library/create-web/10000/technology/10000-5.html> [2555, กันยายน 17]
- [2] Gottsching, L., and Pakarinen, H. Papermaking Science and Technology 7: Recycled Fiber and Deinking. Atlanta : TAPPI PRESS, 2000
- [3] Ferguson, L.D. Deinking Chemistry: Part 2. TAPPI Journal 75(7) (August 1992): 49-58.
- [4] Lassus, A. Deinking chemistry, Papermaking Science and Technology, Finland, 2000.
- [5] Heindel, T.J. Fundamentals of Flotation Deinking. TAPPI journal 82(3) (March 1999): 115-124
- [6] Ferguson, L.D. Flotation Deinking Chemistry: 1994 Deinking Short Course. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994, pp 227.
- [7] Zeyer,C., Joyce, T.W., Heitmann, J.A., and Rucker , J.W. Factors Influencing Enzyme Deinking of of recycled fiber. TAPPI Journal 77(10) (1994): 169-177.
- [8] Ferguson, L.D. The Role of pulper Chemistry in deinking: 1991 Pulping Conference. Atlanta. TAPPI PRESS, 1991
- [9] Ferguson, L.D. deinking Chemistry: Part 1 TAPPI Journal 75(7) (July 1992): 75-53
- [10] Ben, Y., Dagenais, M., and Dorris, G.M. Irreversible Ink Redeposition During Repulping Part 1. Journal of Pulp and Paper Science 26(3) (2000): 83-89.
- [11] 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):1-3.
- [12] Zollner, H.K., Schroeder,L.R. Enzymatic Deinking of Nonimpact Printed White Office Paper with a-amylase. TAPPI Journal 81(3) (March 1998): (166-170)
- [13] Lakouraj,T.M. , Movagharrejad, K. Experimental Results on Enzymatic Deinking of Non-impact Ink Printed papers. Biotechnology congress. Iran, 2005
- [14] Smook, G.A. Handbook for Pulp and Paper technologists. 2nd edition. Vancouver: Angus Wilde, 1994
- [15] Hemicellulose. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http:// http://en.wikipedia.org/wiki/Hemicellulose](http://en.wikipedia.org/wiki/Hemicellulose)

- [16] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal society of Chemistry, 1996
- [17] starch. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http:// http://en.wikipedia.org/wiki/Starch](http://http://en.wikipedia.org/wiki/Starch) [2556, มีนาคม 3]
- [18] Surface sizing. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http:// thaitapiocastarch.org/article17_th.asp](http://thaitapiocastarch.org/article17_th.asp) [2556, มีนาคม 3]
- [19] Ryu, D., and Mandels, M. Cellulase: Biosynthesis and Applications. Enzyme and Microbial Technology 2 (1980):91-102.
- [20] Sohail, M., Siddiqi, R., Ahmed, A., Khan, S.A. Cellulase production from *Aspergillus niger* MS82: Effect of Temperature and pH. New Biotechnology 25 (6) (2009): 437-441
- [21] amylase. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http:// http://en.wikipedia.org/wiki/amylase](http://http://en.wikipedia.org/wiki/amylase) [2556, มีนาคม 3]
- [22] Elegir, G., Panizza, E., Canetti, M. Neutral Enzyme Assisted Deinking of Xerographic Office Waste with a Cellulase/Amylase Mixture. TAPPI Journal Peer Review Paper. (November 2000) 1-9
- [23] วัจนา พัสตุ. การใช้เซลล์ร่วมกับแลคเคสในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ เก่าด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553
- [24] Miller, G.L., Blum, R., Glennon, W.E., and Burton, A.L. Measurement of carboxymethyl-cellulose Activity. Analytical Biochemistry 1(2)(1959): 127-132
- [25] Sakthi, S.S., saranraj, P., Optimization for Cellulase Production by *Aspergillus niger*. International journal of Advance Scientific and Technical Reserch 1(1) (october 2011) 87-89
- [26] Abe, J., Bergman, F.W., Obata, K.and Hikari, S. (1988). Production of raw starch digesting amylase by *Aspergillus niger*. Applied microbiology and Biotechnology 27, 447-450
- [27] ISO 16065-1. Pulp-Determination of Fibre Length by Automated Optical. International Organization for standardization, Swizerland, 2001

- [28] T 227 om-04. Freeness of Pulp (Canadian Standard Method). Atlanta: TAPPI Press, 2004
- [29] ISO 5269-2. Pulp Preparation of Laboratory Sheets for Physical Testing. International Organization for standardization, Swizerland, 1998
- [30] T 452 om-98. Brightness of pulp, paper, and paperboard (directional reflectance at 457 nm). Georgia: TAPPI Press, 1997
- [31] T 452 om-98. Brightness of pulp, paper, and paperboard (directional reflectance at 457 nm). Georgia: TAPPI Press, 1997
- [32] T 567 pm-97. Determination of effective residual ink concentration by infrared reflectance measurement. Georgia: TAPPI Press, 1997
- [33] T 494 om-01. Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). Georgia: TAPPI Press, 2011
- [34] T-414 om-98. Internal tearing resisitance of paper (Elmendorf-type method). Georgia: TAPPI Press 1998

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและเตรียมเยื่อ

1. การคำนวณหาปริมาณความชื้น

ทำการชั่งน้ำหนักกระดาษที่เตรียมไว้ก่อนอบ แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 106 °C แล้วนำไปทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น แล้วจึงนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้น จากสูตร

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณความชื้น (\%)} &= \frac{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}}{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ}} \times 100 \\ &= \frac{250 - 230}{250} \times 100 \\ &= 8.0\%\end{aligned}$$

2. การคำนวณหาน้ำหนักเยื่อแห้ง

กระดาษที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเท่ากับ 8.0% โดยน้ำหนักกระดาษที่ใช้ใน 1 ภาวะเท่ากับ 250 กรัม

น้ำหนักกระดาษ 100 กรัม มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ $100 - 8 = 92$ กรัม

น้ำหนักกระดาษ 250 กรัม มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ $\frac{250 \times 92}{100} = 230$ กรัม

100

ดังนั้นน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 230 กรัม

ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษเท่ากับ $250 - 230 = 20$ กรัม

3. การคำนวณความเข้มข้นของเยื่อ

ความเข้มข้นของเยื่อ (%consistency) ในเครื่องตีกระจายเยื่อเท่ากับ 6%

เยื่อแห้ง 6 g มาจากน้ำเยื่อ 100 g

เยื่อแห้ง 230 g มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด $\frac{230 \times 100}{6} = 3833.33$ ml

6

ปริมาณน้ำที่ต้องเติม คือ $3833.33 - 230 = 3603.33$ ml

4. การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้

$$\text{ปริมาณสารที่ใช้} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} \times \% \text{ของสารที่ใช้}}{100}$$

5. การคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้การหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อต้องใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับ 0.3% ในปริมาตรทั้งหมด 1000 ml โดยตวงมาจากน้ำเยื่อความเข้มข้นน้ำเยื่อ 0.8% โดยจะปรับความเข้มข้นให้เป็น 0.3% ตามสูตรดังนี้

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ 0.3%

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในกระบวนการลอยฟองอากาศ 0.8%

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อคือ 1000 ml

V_2 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องลอยฟองอากาศ

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

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

0.8

$$V_2 = 375 \text{ ml}$$

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อ 0.8% มา 375 ml แล้วทำการเติมน้ำอีก 625 ml จนได้ปริมาตร 1000 ml แล้วนำไปหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

6. การคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 80 g/m^2 และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20.02 cm ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 m^2 ดังนั้นถ้าจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 80 g/m^2 จะต้องใช้เยื่อแห้งดังนี้

แผ่นขึ้นทดสอบ 1 m^2 จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 80 g

ถ้าแผ่นขึ้นทดสอบมีขนาด 0.0315 m^2 จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $80 \times 0.0315 = 2.52 \text{ g}$

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 2.52 g ในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 80 g/m^2 แต่จะภาวจะทำการขึ้นแผ่นทดสอบ 15 แผ่น ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $2.52 \times 15 = 37.8 \text{ g}$ เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเยื่อจากเครื่องลอยฟองอากาศมีค่าเท่ากับ 0.3% ดังนั้นเราจะต้องตวงน้ำเยื่อออกมาปริมาตรเท่าไรให้มีเยื่อต่อแผ่นน้ำหนักเท่ากับ 2.52 g โดยวิธีการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 g ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 ml

ต้องการน้ำหนักเยื่อ 2.52 g ต้องตวงน้ำเยื่อมาจากในเครื่องบดเยื่อเท่ากับ $(2.52 \times 100) / 0.3 = 840 \text{ ml}$

น้ำเยื่อปริมาณ 840 ml สามารถนำมาขึ้นแผ่นทดสอบได้ขนาด 80 g/m^2

7. การคำนวณผลผลิตของเยื่อที่ได้

ปริมาณผลผลิตที่ได้ (%) = $\frac{\text{น้ำหนักเยื่อที่ใส่ในเครื่อง} - \text{น้ำหนักหมึกที่ถูกกำจัด}}{\text{น้ำหนักเยื่อที่ใส่ในเครื่อง}} \times 100$

ภาคผนวก ข

การเตรียมอาหารและวิธีการเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตเอนไซม์

1. เชลลูเลส

1.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารสูตร (PDA) Potato Dextrose Agar

มันฝรั่ง	200	กรัม
น้ำตาลกลูโคส	20	กรัม
วุ้น	15	กรัม
น้ำกลั่น	1000	มิลลิลิตร

นำมันฝรั่งมาปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ สี่เหลี่ยมลูกเต๋า นำไปต้มกับน้ำกลั่นจนเปื่อย เมื่อสุกนำมากรองเอาแต่น้ำ หลังจากนั้นเติมน้ำตาลกลูโคสและผงวุ้น ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

อาหารเหลวที่ใช้เพื่อผลิตเอนไซม์เชลลูเลส สูตร Production medium

MgSO ₄	0.1%
CaH ₂ PO ₄	0.5%
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.4%
Comsteep liquor	0.7%
Tween 80	0.2%
Cellulose	3.0%
แร่ธาตุเสริม	
FeSO ₄	0.005%
ZnSO ₄	0.0014%
MnSO ₄	0.00156%
CoCl ₂	0.00366%

ทำการปรับค่า pH สุดท้ายของอาหารเลี้ยงเชื้อให้ได้ 5.0 ด้วย 1 N NaOH หรือ HCl แล้ว
จึงทำการนิ่งฆ่าเชื้อ

1.2 การคำนวณค่าแอกทีวิตีของเซลล์เลสที่ผลิตได้

0.180 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 1 นาที มีค่า = 1 หน่วย

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

จากการเตรียมเซลล์เลสเกิดกลูโคส 5.914 มิลลิกรัม โดยเกิดขึ้นภายใน 60 นาที

= 5.914 x 0.093 หน่วย

ในการทดลองใช้เอนไซม์ 0.5 ml มีกลูโคส = 0.550 หน่วย

ถ้าใช้เอนไซม์ 1.0 ml มีกลูโคส = $\frac{1 \times 0.550}{0.5}$

0.5

= 1.10

เซลล์เลสที่ผลิตได้มีค่าแอกทีวิตี 1.10 Unit/ml

2. อะไมเลส

2.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารสูตร (PDA) Potato Dextrose Agar

มันฝรั่ง	200	กรัม
น้ำตาลกลูโคส	20	กรัม
วุ้น	15	กรัม
น้ำกลั่น	1000	มิลลิลิตร

นำมันฝรั่งมาปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ สี่เหลี่ยมลูกเต๋า นำไปต้มกับน้ำกลั่นจนเปื่อย เมื่อสุกนำมากรองเอาแต่น้ำ หลังจากนั้นเติมน้ำตาลกลูโคสและผงวุ้น ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

อาหารเหลวที่ใช้เพื่อผลิตเอนไซม์เซลลูเลส สูตร Fungal amylase production

KH_2PO_4	0.28%
NH_4NO_3	0.2%
KCl	0.1%
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.02%
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.002%
Soluble starch	4.0%

ทำการปรับค่า pH สุดท้ายของอาหารเลี้ยงเชื้อให้ได้ 6.5 แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร แล้วจึงทำการนึ่งฆ่าเชื้อ

2.2 การคำนวณค่าแอกทีวิตีของอะไมเลสที่ผลิตได้

0.180 มิลลิกรัมกลูโคสที่เกิดขึ้นภายใน 1 นาที มีค่า = 1 หน่วย

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

จากการเตรียมอะไมเลสเกิดกลูโคส 5.908 มิลลิกรัม โดยเกิดขึ้นภายใน 60 นาที

= 5.908 × 0.093 หน่วย

ในการทดลองใช้เอนไซม์ 0.5 ml มีกลูโคส

= 0.549 หน่วย

ถ้าใช้เอนไซม์ 1.0 ml มีกลูโคส

= $\frac{1 \times 0.549}{0.5}$

0.5

= 1.10

อะไมเลสที่ผลิตได้มีค่าแอกทีวิตี 1.10 Unit/ml

ภาคผนวก ค

ตารางข้อมูลและผลวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อค่าความขาวสว่าง

Anova: Single Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
0.1%Amylase	10	371.38	37.138	0.163618
0.2%Amylase	10	361.83	36.183	0.101046
0.3%Amylase	10	392.31	39.231	0.764632

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	48.60993	2	24.30496	70.8396	1.81E-11	3.354131
Within Groups	9.26366	27	0.343099			
Total	57.87359	29				

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	10	16787.63	1678.763	2306.176
0.2%Amylase	10	15847.72	1584.772	2544.685
0.3%Amylase	10	14562.29	1456.229	3141.476

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	249596.6	2	124798.3	46.84425	1.66E-09	3.354131
Within Groups	71931.03	27	2664.112			
Total	321527.7	29				

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อธรรมชาติความแข็งแรงต่อแรงดึง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	10	293.2411	29.32411	5.573863
0.2%Amylase	10	299.9477	29.99477	5.089651
0.3%Amylase	10	325.9589	32.59589	11.02292

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	59.73363	2	29.86681	4.131636	0.027199	3.354131
Within Groups	195.1779	27	7.22881			
Total	254.9115	29				

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมีกอกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อธรรมชาติความต้านทานแรงฉีก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	10	52.98455	5.298455	0.232506
0.2%Amylase	10	55.17699	5.517699	0.199301
0.3%Amylase	10	58.11998	5.811998	0.381447

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1.32802	2	0.66401	2.449454	0.105302	3.354131
Within Groups	7.319294	27	0.271085			
Total	8.647314	29				

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อสภาพระบายได้

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	495	247.5	0.5
0.2%Amylase	2	496	248	2
0.3%Amylase	2	499.5	249.75	3.125

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	5.583333	2	2.791667	1.488889	0.355527	9.552094
Within Groups	5.625	3	1.875			
Total	11.20833	5				

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	192.44	96.22	1.62
0.2%Amylase	2	192.17	96.085	0.83205
0.3%Amylase	2	192.79	96.395	1.78605

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.096633	2	0.048317	0.034202	0.966748	9.552094
Within Groups	4.2381	3	1.4127			
Total	4.334733	5				

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมีออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อความยาวเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	3.186	1.593	0.005202
0.2%Amylase	2	3.204	1.602	0.004232
0.3%Amylase	2	3.271	1.6355	0.000612

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002006	2	0.001003	0.299557	0.761007	9.552094
Within Groups	0.010047	3	0.003349			
Total	0.012053	5				

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	72.64	36.32	0.8978
0.2%Amylase	2	71.12	35.56	0.4608
0.3%Amylase	2	70.82	35.41	2.9768

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.952133	2	0.476067	0.329428	0.742445	9.552094
Within Groups	4.3354	3	1.445133			
Total	5.287533	5				

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างๆกันต่อความโค้งงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	0.164	0.082	8E-06
0.2%Amylase	2	0.163	0.0815	2.45E-05
0.3%Amylase	2	0.158	0.079	3.2E-05

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1.03E-05	2	5.17E-06	0.24031	0.800197	9.552094
Within Groups	6.45E-05	3	2.15E-05			
Total	7.48E-05	5				

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมีกอกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างกันต่อธรรมชาติการหักงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	3.423	1.7115	0.000365
0.2%Amylase	2	3.478	1.739	0.000162
0.3%Amylase	2	3.375	1.6875	0.000613

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002656	2	0.001328	3.498244	0.164403	9.552094
Within Groups	0.001139	3	0.00038			
Total	0.003795	5				

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสต่างกันต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Amylase	2	40.84	20.42	0.0242
0.2%Amylase	2	40.77	20.385	0.00605
0.3%Amylase	2	40.88	20.44	0.1922

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.0031	2	0.00155	0.020904	0.979455	9.552094
Within Groups	0.22245	3	0.07415			
Total	0.22555	5				

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูโลสต่างๆกันต่อค่าความขาวสว่าง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	10	446.06	44.606	0.033293
0.2%Cellulase	10	478.53	47.853	0.271201
0.3%Cellulase	10	438.32	43.832	0.215596

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		91.03509	2	45.51754	262.5558	2.02E-18	3.354131
Within Groups		4.68081	27	0.173363			
Total		95.7159	29				

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูโลสต่างๆกันต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	10	14089.38	1408.938	3642.272
0.2%Cellulase	10	13057.74	1305.774	4273.667
0.3%Cellulase	10	13829.47	1382.947	2342.041

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		57580.05	2	28790.02	8.419793	0.00144	3.354131
Within Groups		92321.82	27	3419.327			
Total		149901.9	29				

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสต่างๆกันต่ออัตราความแข็งแรงต่อแรงดึง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	10	310.6823	31.06823	6.436247
0.2%Cellulase	10	359.9852	35.99852	5.283337
0.3%Cellulase	10	303.9567	30.39567	9.061514

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		187.1736	2	93.58678	13.51037	8.59E-05	3.354131
Within Groups		187.0299	27	6.927033			
Total		374.2034	29				

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสต่างๆกันต่ออัตราความต้านทานแรงฉีก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	10	55.32381	5.532381	0.245828
0.2%Cellulase	10	61.82536	6.182536	0.30911
0.3%Cellulase	10	55.97093	5.597093	0.182734

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		2.565443	2	1.282722	5.216636	0.012146	3.354131
Within Groups		6.639045	27	0.245891			
Total		9.204488	29				

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูโลสต่างๆกันต่อสภาพระบายได้

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	502	251	2
0.2%Cellulase	2	507	253.5	0.5
0.3%Cellulase	2	501	250.5	0.5

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	10.33333	2	5.166667	5.166667	0.106727	9.552094
Within Groups	3	3	1			
Total	13.33333	5				

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสต่าง ๆ กันต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	188.43	94.215	0.09245
0.2%Cellulase	2	192.35	96.175	0.55125
0.3%Cellulase	2	190.5	95.25	1.125

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		3.845633	2	1.922817	3.261407	0.176821	9.552094
Within Groups		1.7687	3	0.589567			
Total		5.614333	5				

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสต่างๆกันต่อความยาวเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	3.3135	1.65675	0.001176
0.2%Cellulase	2	3.343	1.6715	0.002112
0.3%Cellulase	2	3.379	1.6895	0.000181

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.001076	2	0.000538	0.465283	0.666806	9.552094
Within Groups	0.003469	3	0.001156			
Total	0.004545	5				

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูโลสต่างๆกันต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	70.62	35.31	3.4848
0.2%Cellulase	2	70.51	35.255	3.30245
0.3%Cellulase	2	69.98	34.99	7.0688

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		0.1171	2	0.05855	0.012677	0.987456	9.552094
Within Groups		13.85605	3	4.618683			
Total		13.97315	5				

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูโลสต่างๆกันต่อความโค้งงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	0.16	0.08	0.000072
0.2%Cellulase	2	0.154	0.077	5E-05
0.3%Cellulase	2	0.154	0.077	9.8E-05

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		1.2E-05	2	6E-06	0.081818	0.923426	9.552094
Within Groups		0.00022	3	7.33E-05			
Total		0.000232	5				

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูโลสต่างๆกันต่อกรณีการหักงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	3.467	1.7335	2.45E-05
0.2%Cellulase	2	3.489	1.7445	0.001741
0.3%Cellulase	2	3.471	1.7355	1.25E-05

ANOVA

<i>Source of</i>	<i>Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups		0.000137	2	6.87E-05	0.115893	0.894371	9.552094
Within Groups		0.001778	3	0.000592			
Total		0.001915	5				

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสต่างๆกันต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.1%Cellulase	2	40.42	20.21	0.0098
0.2%Cellulase	2	41.26	20.63	0.0288
0.3%Cellulase	2	40.72	20.36	0.0648

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.1812	2	0.0906	2.628627	0.218992	9.552094
Within Groups	0.1034	3	0.034467			
Total	0.2846	5				

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อค่าความขาวสว่าง

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	10	392.31	39.231	0.764632
0.2%Cellulase	10	478.53	47.853	0.271201

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	371.6944	1	371.6944	717.6723	5.89E-16	4.413873
Within Groups	9.3225	18	0.517917			
Total	381.0169	19				

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	10	14562.29	1456.229	3141.476
0.2%Cellulase	10	13057.74	1305.774	4273.667

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	113184.3	1	113184.3	30.52788	3.02E-05	4.413873
Within Groups	66736.29	18	3707.572			
Total	179920.6	19				

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อธรรมชาติความแข็งแรงต่อแรงดึง

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	10	325.9589	32.59589	11.02292
0.2%Cellulase	10	359.9852	35.99852	5.283337

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	57.88965	1	57.88965	7.100301	0.015792	4.413873
Within Groups	146.7563	18	8.153127			
Total	204.6459	19				

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อธรรมชาติความต้านทานแรงฉีก

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	10	58.11998	5.811998	0.381447
0.2%Cellulase	10	61.82536	6.182536	0.30911

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.686495	1	0.686495	1.988236	0.175572	4.413873
Within Groups	6.215013	18	0.345278			
Total	6.901508	19				

ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อสภาพระบายได้

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	499.5	249.75	3.125
0.2%Cellulase	2	507	253.5	0.5

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	14.0625	1	14.0625	7.758621	0.108343	18.51282
Within Groups	3.625	2	1.8125			
Total	17.6875	3				

ตารางที่ 28 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	192.79	96.395	1.78605
0.2%Cellulase	2	192.35	96.175	0.55125

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.0484	1	0.0484	0.041415	0.857566	18.51282
Within Groups	2.3373	2	1.16865			
Total	2.3857	3				

ตารางที่ 29 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อความยาวเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	3.271	1.6355	0.000612
0.2%Cellulase	2	3.343	1.6715	0.002112

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.001296	1	0.001296	0.951193	0.432278	18.51282
Within Groups	0.002725	2	0.001363			
Total	0.004021	3				

ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	70.82	35.41	2.9768
0.2%Cellulase	2	70.51	35.255	3.30245

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.024025	1	0.024025	0.007652	0.938263	18.51282
Within Groups	6.27925	2	3.139625			
Total	6.303275	3				

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อความโค้งงอของเส้นใย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	0.158	0.079	3.2E-05
0.2%Cellulase	2	0.154	0.077	5E-05

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000004	1	0.000004	0.097561	0.784334	18.51282
Within Groups	8.2E-05	2	4.1E-05			
Total	8.6E-05	3				

ตารางที่ 32 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อกรณีการหักงอของเส้นใย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	3.375	1.6875	0.000613
0.2%Cellulase	2	3.489	1.7445	0.001741

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.003249	1	0.003249	2.761581	0.238441	18.51282
Within Groups	0.002353	2	0.001177			
Total	0.005602	3				

ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับเซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
0.3%Amylase	2	40.88	20.44	0.1922
0.2%Cellulase	2	41.26	20.63	0.0288

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.0361	1	0.0361	0.326697	0.625284	18.51282
Within Groups	0.221	2	0.1105			
Total	0.2571	3				

ตารางที่ 34 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อค่าความขาวสว่าง

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	353.16	35.316	0.198027
0.3%Amylase	10	392.31	39.231	0.764632

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	76.63613	1	76.63613	159.2176	2.24E-10	4.413873
Within Groups	8.66393	18	0.481329			
Total	85.30006	19				

ตารางที่ 35 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	18776.05	1877.605	1350.155
0.3%Amylase	10	14562.29	1456.229	3141.476

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	887786.6	1	887786.6	395.3069	1.07E-13	4.413873
Within Groups	40424.68	18	2245.816			
Total	928211.2	19				

ตารางที่ 36 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่ออัตราความแข็งแรงต่อแรงดึง

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	269.6067	26.96067	17.2622
0.3%Amylase	10	325.9589	32.59589	11.02292

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	158.7785	1	158.7785	11.227	0.00356	4.413873
Within Groups	254.5661	18	14.14256			
Total	413.3446	19				

ตารางที่ 37 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่ออัตราขึ้นความต้านทานแรงฉีก

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	49.03388	4.903388	0.179505
0.3%Amylase	10	58.11998	5.811998	0.381447

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	4.127853	1	4.127853	14.71731	0.001209	4.413873
Within Groups	5.048571	18	0.280476			
Total	9.176424	19				

ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อสภาพระบายได้

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	477.5	238.75	0.125
0.3%Amylase	2	499.5	249.75	3.125

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	121	1	121	74.46154	0.013165	18.51282
Within Groups	3.25	2	1.625			
Total	124.25	3				

ตารางที่ 39 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	191.32	95.66	1.5488
0.3%Amylase	2	192.79	96.395	1.78605

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.540225	1	0.540225	0.323988	0.626623	18.51282
Within Groups	3.33485	2	1.667425			
Total	3.875075	3				

ตารางที่ 40 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อความยาวเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	3.163	1.5815	0.00708
0.3%Amylase	2	3.271	1.6355	0.000612

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002916	1	0.002916	0.758092	0.475728	18.51282
Within Groups	0.007693	2	0.003847			
Total	0.010609	3				

ตารางที่ 41 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	73.44	36.72	0.8978
0.3%Amylase	2	70.82	35.41	2.9768

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1.7161	1	1.7161	0.88582	0.445964	18.51282
Within Groups	3.8746	2	1.9373			
Total	5.5907	3				

ตารางที่ 42 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อความโค้งงอของเส้นใย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	0.167	0.0835	1.25E-05
0.3%Amylase	2	0.158	0.079	3.2E-05

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	2.03E-05	1	2.03E-05	0.910112	0.440767	18.51282
Within Groups	4.45E-05	2	2.23E-05			
Total	6.48E-05	3				

ตารางที่ 43 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่ออัตราสีการหักงอของเส้นใย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	3.425	1.7125	1.25E-05
0.3%Amylase	2	3.375	1.6875	0.000613

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000625	1	0.000625	2	0.292893	18.51282
Within Groups	0.000625	2	0.000313			
Total	0.00125	3				

ตารางที่ 44 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single

Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	40.45	20.225	0.02645
0.3%Amylase	2	40.88	20.44	0.1922

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.046225	1	0.046225	0.422822	0.582249	18.51282
Within Groups	0.21865	2	0.109325			
Total	0.264875	3				

ตารางที่ 45 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อค่าความขาวสว่าง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	353.16	35.316	0.198027
0.2%Cellulase	10	478.53	47.853	0.271201

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	785.8818	1	785.8818	3349.682	6.62E-22	4.413873
Within Groups	4.22305	18	0.234614			
Total	790.1049	19				

ตารางที่ 46 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	18776.05	1877.605	1350.155
0.2%Cellulase	10	13057.74	1305.774	4273.667

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1634953	1	1634953	581.4385	3.73E-15	4.413873
Within Groups	50614.4	18	2811.911			
Total	1685568	19				

ตารางที่ 47 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่ออัตราความแข็งแรงต่อแรงดึง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	269.6067	26.96067	17.2622
0.2%Cellulase	10	359.9852	35.99852	5.283337

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	408.4142	1	408.4142	36.23015	1.08E-05	4.413873
Within Groups	202.9099	18	11.27277			
Total	611.324	19				

ตารางที่ 48 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่ออัตราความต้านทานแรงฉีก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	49.03388	4.903388	0.179505
0.2%Cellulase	10	61.82536	6.182536	0.30911

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	8.181098	1	8.181098	33.48692	1.75E-05	4.413873
Within Groups	4.397531	18	0.244307			
Total	12.57863	19				

ตารางที่ 49 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อสภาพระบายได้

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	477.5	238.75	0.125
0.2%Cellulase	2	507	253.5	0.5

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	217.5625	1	217.5625	696.2	0.001433	18.51282
Within Groups	0.625	2	0.3125			
Total	218.1875	3				

ตารางที่ 50 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
เซลล์ในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อปริมาณผลผลิตของเยื่อ

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	191.32	95.66	1.5488
0.2%Cellulase	2	192.35	96.175	0.55125

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.265225	1	0.265225	0.252589	0.665138	18.51282
Within Groups	2.10005	2	1.050025			
Total	2.365275	3				

ตารางที่ 51 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อความยาวเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	3.163	1.5815	0.00708
0.2%Cellulase	2	3.343	1.6715	0.002112

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.0081	1	0.0081	1.76221	0.315604	18.51282
Within Groups	0.009193	2	0.004597			
Total	0.017293	3				

ตารางที่ 52 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	73.44	36.72	0.8978
0.2%Cellulase	2	70.51	35.255	3.30245

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	2.146225	1	2.146225	1.021951	0.418471	18.51282
Within Groups	4.20025	2	2.100125			
Total	6.346475	3				

ตารางที่ 53 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อความโค้งงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	0.167	0.0835	1.25E-05
0.2%Cellulase	2	0.154	0.077	5E-05

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	4.23E-05	1	4.23E-05	1.352	0.364908	18.51282
Within Groups	6.25E-05	2	3.13E-05			
Total	0.000105	3				

ตารางที่ 54 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อครรชนีการหักงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	3.425	1.7125	1.25E-05
0.2%Cellulase	2	3.489	1.7445	0.001741

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.001024	1	0.001024	1.168283	0.392758	18.51282
Within Groups	0.001753	2	0.000876			
Total	0.002777	3				

ตารางที่ 55 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้
 เซลลูเลสในภาวะที่ดีที่สุดเทียบกับภาวะควบคุมต่อความกว้างของเส้นใยเฉลี่ย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	40.45	20.225	0.02645
0.2%Cellulase	2	41.26	20.63	0.0288

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.164025	1	0.164025	5.937557	0.135111	18.51282
Within Groups	0.05525	2	0.027625			
Total	0.219275	3				

ตารางที่ 56 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อค่าความขาวสว่าง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	353.16	35.316	0.198027
0.3%A+0.2%C	10	497.91	49.791	0.119766
0.3%A-0.2%C	10	522.03	52.203	0.264179
0.2%C+0.3%A	10	488.68	48.868	0.21084

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1740.362	3	580.1208	2926.906	4.85E-43	2.866266
Within Groups	7.1353	36	0.198203			
Total	1747.498	39				

ตารางที่ 57 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	18776.05	1877.605	1350.155
0.3%A+0.2%C	10	13027.74	1302.774	4296.608
0.3%A-0.2%C	10	11759.49	1175.949	2569.797
0.2%C+0.3%A	10	13272.87	1327.287	3474.454

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	2912975	3	970991.7	332.2181	2.78E-26	2.866266
Within Groups	105219.1	36	2922.754			
Total	3018194	39				

ตารางที่ 58 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อกรณีความแข็งแรงต่อแรงดึง

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	269.6067	26.96067	17.2622
0.3%A+0.2%C	10	376.9528	37.69528	10.19203
0.3%A-0.2%C	10	382.5565	38.25565	3.300661
0.2%C+0.3%A	10	367.98	36.798	8.177394

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	857.0639	3	285.688	29.35229	8.86E-10	2.866266
Within Groups	350.3906	36	9.733071			
Total	1207.454	39				

ตารางที่ 59 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อกรณีความต้านทานแรงฉีก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	10	49.03388	4.903388	0.179505
0.3%A+0.2%C	10	63.85502	6.385502	0.161067
0.3%A-0.2%C	10	70.75358	7.075358	0.173896
0.2%C+0.3%A	10	65.54554	6.554554	0.513029

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	26.04044	3	8.680147	33.79143	1.44E-10	2.866266
Within Groups	9.247472	36	0.256874			
Total	35.28791	39				

ตารางที่ 60 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	477.5	238.75	0.125
0.3%A+0.2%C	2	501	250.5	0.5
0.3%A-0.2%C	2	501	250.5	0.5
0.2%C+0.3%A	2	498	249	2

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	192.8438	3	64.28125	82.28	0.000474	6.591382
Within Groups	3.125	4	0.78125			
Total	195.9688	7				

ตารางที่ 61 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมีกอกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อปริมาณผลผลิตที่ได้

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	191.32	95.66	1.5488
0.3%A+0.2%C	2	190.45	95.225	1.20125
0.3%A-0.2%C	2	187.09	93.545	0.18605
0.2%C+0.3%A	2	189.78	94.89	0.6498

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	4.9995	3	1.6665	1.858948	0.27722	6.591382
Within Groups	3.5859	4	0.896475			
Total	8.5854	7				

ตารางที่ 62 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อความยาวของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	3.163	1.5815	0.00708
0.3%A+0.2%C	2	3.279	1.6395	6.05E-05
0.3%A-0.2%C	2	3.391	1.6955	0.004704
0.2%C+0.3%A	2	3.298	1.649	0.00605

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.013152	3	0.004384	0.979939	0.485911	6.591382
Within Groups	0.017896	4	0.004474			
Total	0.031048	7				

ตารางที่ 63 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	73.44	36.72	0.8978
0.3%A+0.2%C	2	69.87	34.935	1.11005
0.3%A-0.2%C	2	67.95	33.975	3.25125
0.2%C+0.3%A	2	70.14	35.07	2.1632

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	7.7913	3	2.5971	1.39962	0.365302	6.591382
Within Groups	7.4223	4	1.855575			
Total	15.2136	7				

ตารางที่ 64 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมีกอกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อความโค้งงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	0.167	0.0835	1.25E-05
0.3%A+0.2%C	2	0.147	0.0735	1.25E-05
0.3%A-0.2%C	2	0.148	0.074	8E-06
0.2%C+0.3%A	2	0.154	0.077	9.8E-05

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.000127	3	4.23E-05	1.292621	0.391599	6.591382
Within Groups	0.000131	4	3.28E-05			
Total	0.000258	7				

ตารางที่ 65 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อการหักงอของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	3.425	1.7125	1.25E-05
0.3%A+0.2%C	2	3.505	1.7525	0.000144
0.3%A-0.2%C	2	3.442	1.721	0.000338
0.2%C+0.3%A	2	3.413	1.7065	0.001984

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.002513	3	0.000838	1.351549	0.376792	6.591382
Within Groups	0.00248	4	0.00062			
Total	0.004993	7				

ตารางที่ 66 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) หลังการกำจัดหมึกออกของการทดลองที่มีการใช้อะไมเลสและเซลลูเลสร่วมกันต่อความกว้างของเส้นใย

Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
control	2	40.45	20.225	0.02645
0.3%A+0.2%C	2	40.5	20.25	0.0288
0.3%A-0.2%C	2	40.98	20.49	0.1922
0.2%C+0.3%A	2	40.55	20.275	0.01445

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.0889	3	0.029633	0.45259	0.729559	6.591382
Within Groups	0.2619	4	0.065475			
Total	0.3508	7				

ภาคผนวก ง

ข้อมูลดิบของการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าความขาวสว่างก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Brightness (%)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	28.76	29.57	35.31	35.59	35.03	35.31
A 0.1%	32.53	33.51	33.02	37.22	37.04	37.14
A 0.2%	33.26	33.47	33.37	36.32	36.04	36.18
A 0.3%	34.82	34.81	34.81	38.88	39.58	39.23
C 0.1%	41.68	43.01	42.35	44.56	44.35	44.45
C 0.2%	42.92	43.09	43.00	47.73	47.97	47.85
C 0.3%	41.74	41.27	41.51	43.72	43.94	43.83
A 0.3% + C 0.2%	44.37	43.73	44.05	49.54	50.07	49.81
A 0.3% - C 0.2%	45.83	46.41	46.12	52.59	51.85	52.20
C 0.2% - A 0.3%	45.05	44.89	44.97	49.18	48.55	48.87

ตารางที่ 2 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	ERIC					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	2052.18	2067.76	2059.97	1879.87	1875.34	1877.61
A 0.1%	2022.88	1996.22	2009.55	1679.68	1677.84	1678.76
A 0.2%	1842.60	1719.08	1780.84	1582.16	1587.38	1588.77
A 0.3%	1712.69	1729.70	1716.70	1430.98	1481.49	1463.77
C 0.1%	1549.63	1455.02	1549.63	1419.58	1398.30	1408.94
C 0.2%	1406.38	1418.28	1412.33	1356.81	1254.74	1305.77
C 0.3%	1496.40	1454.31	1475.35	1380.96	1384.94	1382.95
A 0.3% + C 0.2%	1407.94	1406.46	1407.19	1307.70	1297.85	1307.77
A 0.3% - C 0.2%	1324.28	1294.86	1309.57	1180.73	1171.17	1175.95
C 0.2% - A 0.3%	1401.78	1413.48	1407.63	1332.37	1322.20	1327.29

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Tensile index (Nm/g)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	23.47	24.30	23.88	26.86	27.06	26.96
A 0.1%	27.82	27.13	27.48	29.42	29.22	29.32
A 0.2%	27.17	26.84	27.00	29.89	30.10	29.99
A 0.3%	31.13	30.38	30.75	33.22	31.97	32.59
C 0.1%	30.51	30.69	30.59	32.52	29.61	31.06
C 0.2%	33.38	31.23	32.30	36.79	35.21	36.00
C 0.3%	29.19	30.70	29.94	32.60	28.19	30.39
A 0.3% + C 0.2%	29.88	33.35	31.61	38.8	36.59	37.69
A 0.3% - C 0.2%	33.42	32.62	33.42	37.97	38.54	38.26
C 0.2% - A 0.3%	31.70	31.18	31.70	36.10	37.49	36.80

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Tear index (kPa m ² /g)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	4.56	4.40	4.48	4.81	5.01	4.91
A 0.1%	5.00	5.00	5.00	5.27	5.33	5.29
A 0.2%	5.22	5.34	5.28	5.55	5.48	5.52
A 0.3%	5.54	5.58	5.54	5.72	5.91	5.81
C 0.1%	5.33	5.31	5.32	5.49	5.57	5.53
C 0.2%	5.81	5.65	5.73	6.17	6.19	6.18
C 0.3%	5.55	5.44	5.50	5.72	5.48	5.60
A 0.3% + C 0.2%	5.85	5.81	5.83	6.42	6.36	6.39
A 0.3% - C 0.2%	5.89	5.93	5.91	6.98	7.17	7.08
C 0.2% - A 0.3%	5.92	5.74	5.73	6.65	6.45	6.55

ตารางที่ 5 ค่าสภาพระบายน้ำของเยื่อก่อนและหลังการกำจัดหมักโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Freeness (ml)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	225.50	238.50	227.00	238.50	239.00	238.75
A 0.1%	228.50	232.00	230.25	247.00	248.00	247.50
A 0.2%	232.00	228.50	230.25	247.50	249.00	248.25
A 0.3%	229.50	230.00	229.75	248.50	251.00	249.75
C 0.1%	226.00	228.50	227.25	250.00	252.00	251.00
C 0.2%	233.00	228.50	230.75	254.00	253.00	253.50
C 0.3%	226.00	229.50	227.75	250.00	251.00	250.50
A 0.3% + C 0.2%	231.00	232.00	231.50	250.00	251.00	250.50
A 0.3% - C 0.2%	235.00	231.00	233.00	250.00	251.00	250.50
C 0.2% - A 0.3%	230.00	231.00	230.50	248.00	250.00	249.00

ตารางที่ 6 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ของเยื่อก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Yield (%)		
	1	2	ave.
Control	94.78	96.54	95.66
A 0.1%	95.32	97.12	96.22
A 0.2%	96.73	95.44	96.09
A 0.3%	95.45	97.34	96.40
C 0.1%	94.43	94.00	94.22
C 0.2%	95.65	96.70	96.18
C 0.3%	94.50	96.00	95.25
A 0.3% + C 0.2%	94.45	96.00	95.23
A 0.3% - C 0.2%	93.24	93.85	93.55
C 0.2% - A 0.3%	94.32	95.46	94.89

ตารางที่ 7 ค่าความยาวของเส้นใยก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Fiber Length (ml)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	1.532	1.512	1.522	1.428	1.453	1.442
A 0.1%	1.543	1.541	1.542	1.453	1.675	1.531
A 0.2%	1.576	1.535	1.556	1.561	1.534	1.538
A 0.3%	1.613	1.622	1.618	1.454	1.652	1.562
C 0.1%	1.637	1.628	1.633	1.674	1.787	1.741
C 0.2%	1.645	1.632	1.639	1.727	1.780	1.764
C 0.3%	1.675	1.684	1.680	1.765	1.732	1.750
A 0.3% + C 0.2%	1.721	1.546	1.634	1.743	1.689	1.725
A 0.3% - C 0.2%	1.756	1.538	1.647	1.802	1.785	1.794
C 0.2% - A 0.3%	1.534	1.653	1.594	1.698	1.750	1.733

ตารางที่ 8 ค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Fiber content (%)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	37.65	37.12	37.39	35.57	36.52	36.05
A 0.1%	37.32	36.65	36.99	35.43	35.87	35.65
A 0.2%	36.65	35.43	36.04	35.43	35.12	35.28
A 0.3%	36.43	36.82	36.63	34.52	33.86	34.19
C 0.1%	36.54	36.72	36.63	33.46	34.52	33.99
C 0.2%	37.65	35.42	36.54	33.42	34.52	33.97
C 0.3%	36.51	37.23	36.87	33.21	33.40	33.31
A 0.3% + C 0.2%	36.83	34.52	35.68	34.51	33.87	34.19
A 0.3% - C 0.2%	35.67	34.83	35.25	33.21	32.18	32.70
C 0.2% - A 0.3%	35.65	36.56	36.11	33.54	34.51	34.03

ตารางที่ 9 ค่าความโค้งงอของเส้นใยก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Mean curl					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	0.081	0.091	0.086	0.076	0.085	0.081
A 0.1%	0.082	0.085	0.084	0.081	0.078	0.080
A 0.2%	0.086	0.083	0.085	0.082	0.074	0.078
A 0.3%	0.080	0.086	0.083	0.076	0.073	0.075
C 0.1%	0.088	0.084	0.086	0.076	0.072	0.074
C 0.2%	0.086	0.078	0.082	0.068	0.076	0.072
C 0.3%	0.082	0.086	0.084	0.075	0.065	0.070
A 0.3% + C 0.2%	0.076	0.075	0.076	0.074	0.068	0.071
A 0.3% - C 0.2%	0.086	0.065	0.076	0.076	0.068	0.072
C 0.2% - A 0.3%	0.085	0.083	0.084	0.071	0.068	0.070

ตารางที่ 10 ค่าการหักงอของเส้นใยก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Kink index					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	1.724	1.705	1.715	1.714	1.705	1.710
A 0.1%	1.717	1.732	1.725	1.693	1.702	1.698
A 0.2%	1.753	1.742	1.748	1.717	1.742	1.730
A 0.3%	1.687	1.723	1.705	1.685	1.654	1.670
C 0.1%	1.765	1.708	1.737	1.725	1.734	1.730
C 0.2%	1.782	1.765	1.774	1.685	1.744	1.715
C 0.3%	1.722	1.743	1.733	1.711	1.765	1.738
A 0.3% + C 0.2%	1.786	1.702	1.744	1.714	1.628	1.671
A 0.3% - C 0.2%	1.722	1.746	1.734	1.731	1.684	1.708
C 0.2% - A 0.3%	1.702	1.774	1.738	1.721	1.628	1.675

ตารางที่ 11 ค่าความกว้างของเส้นใยก่อนและหลังการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ

Condition	Fiber width (um)					
	ก่อน Flotation			หลัง Flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
Control	20.25	20.43	20.34	20.14	20.08	20.11
A 0.1%	20.63	20.42	20.53	20.27	20.35	20.31
A 0.2%	20.65	20.22	20.44	20.13	20.52	20.33
A 0.3%	20.67	20.83	20.75	20.22	20.04	20.13
C 0.1%	20.34	20.21	20.28	20.24	20.04	20.14
C 0.2%	20.85	20.65	20.75	20.44	20.58	20.51
C 0.3%	20.82	20.25	20.54	20.35	20.21	20.28
A 0.3% + C 0.2%	20.31	20.42	20.37	20.12	20.14	20.13
A 0.3% - C 0.2%	20.86	20.74	20.80	20.22	20.14	20.18
C 0.2% - A 0.3%	20.64	20.08	20.36	20.25	20.12	20.19

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นายรัฐศาสตร์ ตีเพียร

เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2529 ที่กรุงเทพมหานคร

ประวัติทางการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนวัดสุทธิวาราม
- ปี พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะพณิชยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- ปี พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีเชื้อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย