การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสในการดึงหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

นายธนาวุธ ลิ้มพานิชย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE USE OF CARBOXYMETHYL CELLULOSE WITH CELLULASE IN DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED INK

Mr.Thanawut Limphanit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Imaging Technology
Department of Imaging and Printing Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic year 2007
Copyright of Chulalongkorn University

501274

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสในการดึงหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ
โดย	นายธนาวุธ ลิ้มพานิชย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสืบสาย)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนาวุธ ลิ้มพานิชย์ : การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสในการดึงหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ. (THE USE OF CARBOXYMETHYL CELLULOSE WITH CELLULASE IN DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED INK) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.สมพร ชัยอารีย์กิจ, 116 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสในการดึงหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำสีดำออกจากกระดาษปอนด์ การทดลอง (ตอนแรก) เริ่มจากการหาปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสม โดยมีการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 4 ระดับ คือร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการทดลองพบว่าปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปใช้ในการทดลองตอนที่สองต่อไป ซึ่งเป็นการศึกษาถึงผลของการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสที่มีต่อประสิทธิภาพของการดึงหมึกเฟล็กโซกราฟีออกจากกระดาษ โดยตัวแปรในการศึกษามี 3 ตัวแปร และแต่ละตัวแปรจะมีการศึกษา 2 ระดับ ได้แก่ร้อยละ 0 และ 0.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสของน้ำหนักเยื่อแห้ง ร้อยละ 0.1 และ 0.3 เซลลูเลสของน้ำหนักเยื่อแห้ง และระยะเวลาที่ให้เซลลูเลสทำปฏิกิริยากับเยื่อ (10 และ 40 นาที) โดยปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของการดึงหมึกออกได้แก่ ค่าความขาวสว่าง ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ค่าสภาพระบายได้ และปริมาณผลผลิตที่ได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้น รวมถึงเพิ่มระยะเวลาที่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นและค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้น หากแต่ความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อทิ้งให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับเยื่อนานขึ้น ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อมากที่สุดคือปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ โดยเมื่อใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้เยื่อมีค่าสภาพระบายได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามตัวแปรทั้งสามไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ลายมือชื่อนิสิต ....ธนาวุธ ลิ้มพานิชย์........
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

4772318223 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEY WORD: Deinking / Flotation / CMC / Enzyme / Flexographic water-based inks

THANAWUT LIMPHANIT : THE USE OF CARBOXYMETHYL CELLULOSE WITH CELLULASE IN DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED INK. THESIS ADVISOR : PROF. SUDA KIATKAMJORNWONG, PhD., THESIS COADVISOR : SOMPORN CHAIARREKIJ, M.S., 116 pp.

This research aimed to study the effects of carboxymethylcellulose and cellulase on deinking of black flexographic water-based ink printed on uncoated wood-free paper. The first phase of experiments was to determine the optimal dosage of carboxymethylcellulose for input parameter in the next phase. The dosage of carboxymethylcellulose was varied from 0, 0.1, 0.2 and 0.3% based on oven dried (O.D.) pulp weight and it was found that the optimal dosage of carboxymethylcellulose was 0.2%. Then, the second phase of experiments was to investigate the effects of carboxymethylcellulose and cellulase on deinking efficiency of flexographic water-based ink. Three variables with two levels employed in the phase were carboxymethylcellulose dosage (0 and 0.2% based on O.D. pulp weight), cellulase dosage (0.1 and 0.3% based on O.D. pulp weight) and enzyme reaction time (10 and 40 min). The criteria used to evaluate deinking efficiency were brightness, effective residual ink concentration (ERIC), tensile index, tear index, freeness and yield. The results indicated that higher carboxymethylcellulose and cellulase dosages as well as longer reaction time led to higher brightness and lower ERIC. Tear index and tensile index increased when increasing carboxymethylcellulose and cellulase dosages but the two strength properties were lower with longer reaction time. The only variable affected freeness was cellulase dosage from which higher dosage increased freeness values. It was also found that all three variables had no impact on pulp yield.

Department	Imaging and Printing Technology	Student's signature ....
Field of study	Imaging Technology	Advisor's signature ....
Academic year	2007	Co-advisor's signature ....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้กำลังใจ แรงผลักดัน ความช่วยเหลือต่าง ๆ อย่างดียิ่ง ทั้งคำแนะนำ การเขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รศ.ดร. อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการ ผศ.ดร. สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ และ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ กรรมการ สำหรับคำแนะนำที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ สำหรับการสอนใช้งานโปรแกรม MINITAB เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำจากบริษัท Siegwerk (ประเทศไทย) จำกัด เอนไซม์เซลลูเลสจากบริษัท The East Asiatic (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) สารลดแรงตึงผิวจากบริษัท Eka Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด โดยไม่คิดมูลค่าใด ๆ ทั้งสิ้น ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องพิมพ์เฟล็กโซกราฟีในระบบป้อนม้วนสำหรับพิมพ์กระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ขอบคุณเพื่อนและพี่ ๆ น้อง ๆ สำหรับมิตรภาพดี ๆ ขอขอบคุณพี่ชายและพี่สาวที่คอยเป็นแรงใจ และที่สำคัญที่สุด ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจในทุก ๆ เวลาตลอดระยะการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ด้วยความรักและความเข้าใจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................จ

กิตติกรรมประกาศ....................ฉ

สารบัญ....................ช

สารบัญตาราง....................ญ

สารบัญภาพ....................ฑ

บทที่ 1 บทนำ....................1

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....................4

- แนวคิดและทฤษฎี....................4
- กระบวนการดึงหมึกออกจากกระดาษ (Deinking process)....................5
- การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก (Ink redeposition)....................11
- ความสามารถในการดึงหมึกพิมพ์ออก (Deinkability)....................11
- สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการดึงหมึกออก (Deinking chemicals)....................12
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ CMC (Carboxymethylcellulose)....................16
- ความสำคัญของเอนไซม์ในกระบวนการดึงหมึก....................19
- ปัญหาของการดึงหมึกออกจากเส้นใยของหมึกเฟลกโซกราฟีฐานน้ำ....................22
- เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก....................26
- วารสารปริทรรศน์....................30

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย....................32

- อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้....................33
- วิธีการทดลอง....................36
- การวิเคราะห์ข้อมูล....................44

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล....................45

- ผลการทดลองตอนที่ 1 การหาปริมาณ CMC ที่เหมาะสม (ยังไม่ใช้เอนไซม์)....................45
- ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....................46
- ความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อเมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....................47
- สภาพระบายได้ (Freeness) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....................49
- ปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....................50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน..........51
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน.......53
- ผลการทดลองตอนที่ 2 ผลของการใช้ CMC ร่วมกับเอนไซม์
ต่อประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก..........55
- ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ..........56
- ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ก่อนการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........58
- ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........60
- ความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........61
- ความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........63
- สภาพระบายได้ (Freeness) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........64
- ปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........66
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) ก่อนการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........67
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) หลังการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........68
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) ก่อนการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........70
- ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) หลังการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........71
- ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออก
ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เปรียบเทียบกับการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง..........73
- ความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออก
ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เปรียบเทียบกับการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง..........74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....76
รายการอ้างอิง.....78
ภาคผนวก
- ภาคผนวก ก.....82
- ภาคผนวก ข.....85
- ภาคผนวก ค.....96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการพิมพ์ กลไกการแห้งตัว และความสามารถในการดึงหมึกออก 12

ตารางที่ 2 ขนาดของอนุภาคหมึกในแต่ละระบบการพิมพ์....22

ตารางที่ 3 ชนิดของสารยึดและตัวพาในหมึกแต่ละประเภท 25

ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลอง ตอนที่ 2....39

ตารางที่ 5 การทดลองทั้ง 8 สภาวะในตอนที่ 2....41

ตารางที่ 6 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ความขาวสว่าง ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษตัวอย่าง....45

ตารางที่ 7 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....46

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก่อนการดึงหมึกออก....46

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการดึงหมึกออก....47

ตารางที่ 10 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อเมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....47

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่างก่อนการดึงหมึกออก....48

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออก....48

ตารางที่ 13 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....49

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้ก่อนการดึงหมึกออก....49

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้หลังการดึงหมึกออก....49

ตารางที่ 16 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....50

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการดึงหมึกออก....50

ตารางที่ 18 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน....51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ก่อนการดึงหมึกออก.....51
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก หลังการดึงหมึกออก.....52
ตารางที่ 21 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน.....53
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ก่อนการดึงหมึกออก.....53
ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง หลังการดึงหมึกออก.....54
ตารางที่ 24 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2.....55
ตารางที่ 25 ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....56
ตารางที่ 26 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....58
ตารางที่ 27 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....60
ตารางที่ 28 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....61
ตารางที่ 29 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....63
ตารางที่ 30 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....64
ตารางที่ 31 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....66
ตารางที่ 32 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....67
ตารางที่ 33 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ.....68

หน้า

ตารางที่ 34 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........70

ตารางที่ 35 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ..........71

ตารางที่ 36 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออก ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เปรียบเทียบกับการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง.....73

ตารางที่ 37 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออก ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เปรียบเทียบกับการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง.....74

ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........85

ตารางที่ 39 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........86

ตารางที่ 40 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........87

ตารางที่ 41 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........88

ตารางที่ 42 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ก่อนการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........89

ตารางที่ 43 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้ (Freeness) หลังการดึงหมึกออก เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........90

ตารางที่ 44 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)..........91

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

ตารางที่ 45 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) ก่อนการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)......................92

ตารางที่ 46 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) หลังการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)......................93

ตารางที่ 47 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) ก่อนการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)......................94

ตารางที่ 48 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) หลังการดึงหมึกออก
เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)......................95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1	แนวโน้มความต้องการใช้เยื่อรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นของโลก	4
ภาพที่ 2	เครื่องตีกระจายเยื่อ	5
ภาพที่ 3	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบสกรีน (Screen)	6
ภาพที่ 4	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Centrifugal reverse cleaner	6
ภาพที่ 5	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Centrifugal forward cleaner	7
ภาพที่ 6	กระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง	8
ภาพที่ 7	กระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ	8
ภาพที่ 8	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคของหมึกและขนาดของฟองอากาศ	9
ภาพที่ 9	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นกระแส ขนาดของฟองอากาศ และขนาดอนุภาคของหมึก	10
ภาพที่ 10	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว	14
ภาพที่ 11	ลักษณะของ Micell	15
ภาพที่ 12	การทำงานของ Collector	16
ภาพที่ 13	โครงสร้างของ CMC	17
ภาพที่ 14	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการต้านทานการซึมน้ำ และปริมาณของสารกันซึมที่ถูกกักเก็บในแผ่นกระดาษ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีการใส่และไม่มีการใส่ CMC	17
ภาพที่ 15	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่กระดาษขาด และปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรง เมื่อกระดาษแห้งที่ถูกกักเก็บในแผ่นกระดาษ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีการใส่ และไม่มีการใส่ CMC	18
ภาพที่ 16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเมื่อกระดาษเปียก และปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษเปียกที่ถูกกักเก็บในแผ่นกระดาษ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีการใส่ และไม่มีการใส่ CMC	18
ภาพที่ 17	ผลของเซลลูเลสที่มีต่อขนาดอนุภาคของหมึก และเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ	20
ภาพที่ 18	ผลของปริมาณเซลลูเลสกับค่าความขาวสว่างของกระดาษ 2 ชนิด	20

หน้า

ภาพที่ 19 โมเดลการเข้าทำปฏิกริยาของเอนไซม์......21

ภาพที่ 20 ความขาวสว่างที่ได้จากการดึงหมึกออกด้วยวิธีต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษหนังสือพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยระบบออฟเซต และที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ......23

ภาพที่ 21 ผลของค่า pH ที่ใช้ในกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศที่มีต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษหนังสือพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ......24

ภาพที่ 22 ผลของค่า pH หลังจากการตีกระจายเยื่อที่มีผลต่อความขาวสว่างของเยื่อที่ได้หลังจากการตีกระจายเยื่อ การลอยฟองอากาศ และการล้าง......26

ภาพที่ 23 อิทธิพลของค่า pH ของกัมมันตภาพของเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลอง......34

ภาพที่ 24 อิทธิพลของอุณหภูมิของกัมมันตภาพของเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลอง......34

ภาพที่ 25 รูปแบบตัวอย่างการพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง......35

ภาพที่ 26 การเตรียมเยื่อก่อนเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกออก......37

ภาพที่ 27 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 1......38

ภาพที่ 28 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 2......38

ภาพที่ 29 การเตรียมเยื่อก่อนเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกออก (ตอนที่ 2)......41

ภาพที่ 30 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 1 (ตอนที่ 2)......42

ภาพที่ 31 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 2 (ตอนที่ 2)......43

ภาพที่ 32 กระบวนการหลังการล้าง......43

ภาพที่ 33 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper)......96

ภาพที่ 34 เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell)......96

ภาพที่ 35 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness tester)......97

ภาพที่ 36 เครื่องทำแผ่นทดสอบ (Sheet former)......97

ภาพที่ 37 เครื่องหาความชื้นในกระดาษ (Moisture balance)......98

ภาพที่ 38 ตู้อบ (Oven)......98

ภาพที่ 39 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear tester)......99

ภาพที่ 40 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester)......99

ภาพที่ 41 เครื่องมือวัดค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่และค่าความขาวสว่าง (ERIC and Brightness tester)......100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตกระดาษโดยการนำกระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์มาใช้เป็นวัตถุดิบ เป็นกระบวนการที่ช่วยลดต้นทุนเพราะสามารถใช้เป็นส่วนผสมของเยื่อใหม่ได้ ทั้งนี้ยังเป็นการรู้จักใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย แต่กระดาษที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักเพื่อเตรียมเป็นน้ำเยื่อนั้น หากเป็นกระดาษที่เคยผ่านการพิมพ์มาแล้วควรจะต้องผ่านกระบวนการดึงหมึกออก (Deinking) เสียก่อน เพราะต้องการให้กระดาษที่ผลิตขึ้นใหม่นั้นมีความขาวสว่างใกล้เคียงกับกระดาษที่ผลิตจากการใช้เยื่อใหม่ ในหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำนั้น อนุภาคของหมึกพิมพ์มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นวิธีการขจัดหมึกที่เหมาะสมคือ การดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง (Wash deinking หรือ Washing) อย่างไรก็ตามการล้างเป็นกระบวนการที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก ดังนั้นงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดึงหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำจึงได้พยายามเปลี่ยนมาใช้วิธีการดึงหมึกออกแบบการลอยฟองอากาศ (Flotation) แทน โดยปัจจุบันได้มีการพยายามใช้เอนไซม์มาช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการดึงหมึกออกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่าความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อที่ผ่านการดึงหมึกโดยใช้เอนไซม์ช่วยจะสูงกว่าการไม่ใช้เอนไซม์ อย่างไรก็ตามความขาวสว่างที่ได้ก็ยังคงต่ำกว่าการล้างเป็นส่วนใหญ่ ส่วนหนึ่งที่ทำให้เป็นเช่นนั้นคือ การที่หมึกเกิดการย้อนกลับไปติดที่เส้นใย (Ink redeposition) นั่นเอง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) สามารถเพิ่มประจุลบในระบบได้ เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีหมู่คาร์บอกซี (Carboxy group) ที่ให้ประจุลบอยู่ ทำให้เส้นใยที่มีประจุลบอยู่แล้วมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส น่าจะช่วยป้องกันการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกได้ ซึ่งน่าจะส่งผลให้การดึงหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำโดยใช้เอนไซม์ มีประสิทธิภาพมากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

ขอบเขตของการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา : กระดาษพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำสีดำ

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา : ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณเซลลูเลส และระยะเวลาที่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective residual ink concentration - ERIC) คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อซึ่งค่าตัวเลขจะแปรผันตรงกับปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ หากตัวเลขมีค่ามาก แสดงว่ามีปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อมาก

ค่าความขาวสว่าง (Brightness) คือ ร้อยละการสะท้อนแสงของวัตถุที่ช่วงความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร โดยค่านี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสะอาดของเยื่อ หากมีค่าสูง แสดงว่าเยื่อมีความสะอาดสูงและมีปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อน้อย

ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) คือ ค่าที่บอกถึงความสามารถในการระบายน้ำออกของเยื่อ เช่น หากค่าสภาพระบายได้มีค่าต่ำ หมายความว่า เยื่อนั้นสามารถอุ้มน้ำได้มาก ระบายน้ำออกมาได้น้อย

ปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) คือ ปริมาณของเยื่อที่เหลือจากกระบวนการดึงหมึกออก เนื่องจากในกระบวนการดึงหมึกออกนั้น เส้นใยบางส่วนจะหลุดออกมาพร้อมกับอนุภาคของหมึกด้วย ทำให้ปริมาณของเยื่อที่เหลืออยู่มีค่าน้อยลง

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ

ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) คือ การวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลในการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสในการดึงหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูล เตรียมการทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้

2. พิมพ์กระดาษตัวอย่างด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำสีดำ เพื่อนำมาใช้ในการดึงหมึกออก หลังจากหมึกแห้งตัวแล้วคำนวณหาร้อยละของหมึกพิมพ์ที่พิมพ์ลงบนกระดาษ

3. เตรียมกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำในแต่ละการทดลองให้มีน้ำหนักเท่า ๆ กัน นำกระดาษมาทำการตัดย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อช่วยให้การตีกระจายเยื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

4. นำกระดาษที่เตรียมไว้ทำการตีกระจายเยื่อเพื่อแยกหมึกออกจากเส้นใย ซึ่งในแต่ละการทดลองจะเติมปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแตกต่างกัน นำเยื่อที่ได้ไปผ่านกระบวนการดึงหมึกออก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพในการดึงหมึกออกที่ดีที่สุด

5. เมื่อได้ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสมแล้ว ให้ทำการทดลองโดยเพิ่มตัวแปรปริมาณการใช้เซลลูเลส และระยะเวลาการให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา

6. ทำการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะ

7. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เพื่อศึกษาผลของการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลส ในการดึงหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

8. เขียนบทความทางวิชาการ เพื่อเผยแพร่ในวารสารวิชาการที่มีค่าดรรชนีวัดผลกระทบ (Impact Factor) และเขียนวิทยานิพนธ์

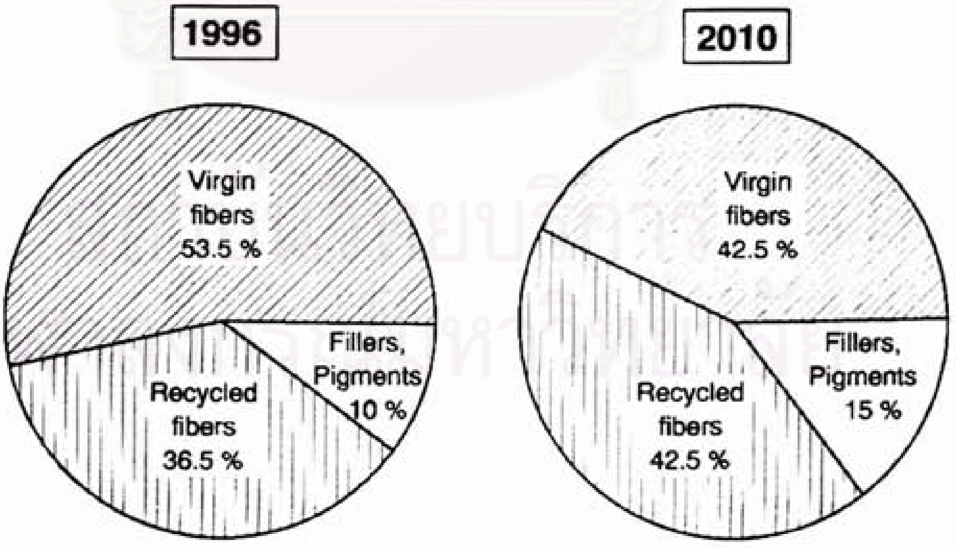
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

กระบวนการรีไซเคิลกระดาษ (Paper recycling) เป็นกระบวนการที่สำคัญมาก โดยจะเห็นจากหลาย ๆ ประเทศได้ระบุไว้ว่าผลิตภัณฑ์บางชนิดจะต้องผลิตมาจากกระดาษรีไซเคิล (Recycled paper) เท่านั้น จึงจะสามารถนำเข้าประเทศได้ แนวโน้มในการใช้กระดาษรีไซเคิลจึงมีความสำคัญมากขึ้นทั้งในการพิมพ์ บรรจุภัณฑ์ หนังสือพิมพ์หรือสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และ จากภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่า จากแนวโน้มที่มีการใช้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี ทำให้คาดการณ์ได้ว่า จากค่าตัวเลขการใช้เยื่อใหม่ในการผลิตกระดาษจะลดลงจากร้อยละ 53.5 ในปี 1996 เป็นร้อยละ 42.5 ในปี 2010 ในขณะที่การใช้เยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 36.5 ในปี 1996 เป็นร้อยละ 42.5 ในปี 2010 (1) อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกระดาษที่จะนำมารีไซเคิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้ว ควรจะต้องนำกระดาษนั้นมาผ่านกระบวนการดึงหมึก (Deinking) ออกเสียก่อน ซึ่งกระบวนการดึงหมึกออกนั้นหมายถึง กระบวนการที่ทำการดึงหมึกออกจากเส้นใยที่ผ่านกระบวนการพิมพ์มาแล้ว เพื่อปรับปรุงสมบัติของเส้นใยให้ดีขึ้น ก่อนที่จะนำเส้นใยนั้นไปขึ้นแผ่นทำกระดาษอีกครั้ง



ภาพที่ 1 แนวโน้มความต้องการใช้เยื่อรีไซเคิลที่เพิ่มขึ้นของโลก (1)

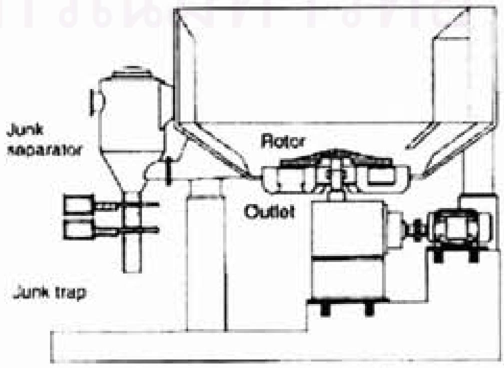
กระบวนการดึงหมึกออก (Deinking) โดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 10 ขั้นตอน ซึ่งในการดึงหมึกออกอาจไม่จำเป็นต้องใช้ครบทั้ง 10 ขั้นตอนก็ได้ และลำดับขั้นตอนในกระบวนการดึงหมึกออกก็สามารถสลับเปลี่ยนลำดับได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษว่าผ่านกระบวนการพิมพ์ด้วยวิธีใดมาก่อนและความเหมาะสมอื่น ๆ ขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการดึงหมึกออกมีดังนี้

1. การตีกระจายเยื่อ (Pulping or repulping)
2. การล้างเยื่อ (Pre-wash)
3. การกรองเยื่อ (Screening)
4. การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning
5. การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning
6. การดึงหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการล้าง (Washing)
7. การดึงหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation)
8. การกระจายหมึก (Dispersion)
9. การฟอกเยื่อ (Bleaching)
10. การเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water circulation and makeup)

1. **กระบวนการดึงหมึกออกจากกระดาษ** (Deinking process)

1.1 <u>การตีกระจายเยื่อ (Pulping or repulping)</u>

เป็นขั้นตอนที่นำกระดาษมาตีกระจายเป็นเยื่อโดยการใช้เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) การตีกระจายเยื่อนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการดึงหมึกออก เพราะเป็นขั้นตอนที่หมึกมีการแยกตัวออกจากผิวหน้ากระดาษโดยอาศัยแรงกล และ/หรือสารเคมี รวมถึงเป็นขั้นตอนที่ขนาดของหมึกพิมพ์ถูกควบคุมมากที่สุด โดยทั่วไปแล้วอาจจะมีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น ลงไปในขั้นตอนนี้ด้วยเพื่อช่วยในการกระจายเยื่อหรือฟอกเยื่อ (1)



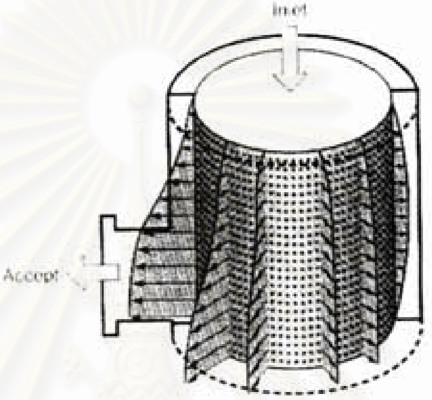
ภาพที่ 2 เครื่องตีกระจายเยื่อ (1)

1.2 <u>การล้างเยื่อ (Pre-wash)</u>

เป็นขั้นตอนขจัดน้ำออกจากเยื่อ หลังผ่านขั้นตอนการตีกระจายเยื่อแล้ว เพื่อปรับความเข้มข้นของเยื่อให้เพิ่มสูงขึ้น

1.3 <u>การกรองเยื่อ (Screening)</u>

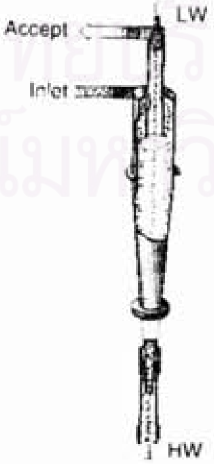
เป็นขั้นตอนนี้แยกวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เช่น คลิปหนีบกระดาษ ลวดเย็บกระดาษ เป็นต้น ออกจากเยื่อที่ผ่านการตีกระจายมาแล้ว โดยผ่านสกรีน (Screen) เพราะหากสิ่งเหล่านี้หลุดลอดเข้าไปในระบบ อาจจะไปทำความเสียหายให้เครื่องจักรในขั้นตอนอื่น ๆ ได้



ภาพที่ 3 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบสกรีน (Screen) (1)

1.4 <u>การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning</u>

เป็นขั้นตอนที่ใช้แยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กและมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ต่ำกว่า 1 หรือมีความหนาแน่น (Density) น้อยกว่าเส้นใย ซึ่งการใช้สกรีนไม่สามารถกำจัดได้ อาทิเช่น เม็ดพลาสติก เป็นต้น



ภาพที่ 4 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Centrifugal reverse cleaner (1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Centrifugal reverse cleaner มีหลักการทำงานดังนี้ คือ เครื่องจะมีการหมุนวนด้วยแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้เส้นใยซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าเกิดการชนกระทบกับผนังของเครื่อง และถูกคัดออกจากเครื่องทางด้านล่าง ในขณะที่สิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเบากว่าเส้นใยจะอยู่ตรงบริเวณส่วนกลางของเครื่อง และถูกคัดออกจากทางด้านบนของเครื่อง (ภาพที่ 4)

1.5 <u>การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning</u>

ในขั้นตอนนี้จะคล้ายกับขั้นตอน Reverse cleaning หากแต่เป็นการแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กและมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 หรือมีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยซึ่งการใช้สกรีนไม่สามารถกำจัดได้

ภาพที่ 5 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Centrifugal forward cleaner (1)

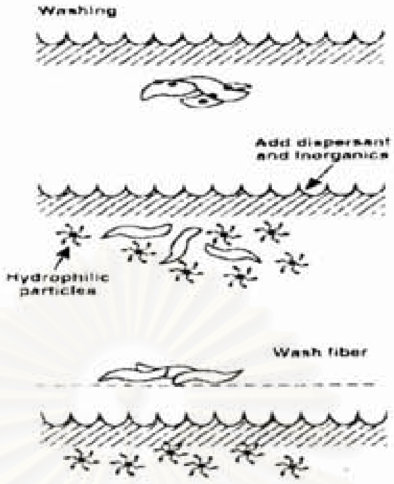
จากภาพที่ 5 สิ่งเจือปนที่มีความถ่วงจำเพาะที่มากกว่า 1 หรือมีค่าความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยจะถูกคัดแยกออกมาทางด้านล่าง ส่วนเส้นใยจะถูกแยกออกไปทางด้านบน

1.6 <u>การดึงหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการล้าง (Washing)</u>

ขั้นตอนนี้เป็นการขจัดหมึกออกจากเส้นใย โดยการใช้น้ำล้างเยื่อผ่านตะแกรงที่เล็กมาก ๆ ซึ่งเส้นใยไม่สามารถลอดผ่านไปได้หรือลอดผ่านได้เล็กน้อย ในขณะที่น้ำจะชะล้างพาเอาอนุภาคของหมึกที่กระจายอยู่ออกไป โดยจะทำการล้างซ้ำหลายรอบจนเส้นใยมีค่าความขาวสว่างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการใช้สารลดแรงตึงผิวจำพวกสารช่วยกระจาย (Dispersants) ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นตัวช่วยในการพาอนุภาคของหมึก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

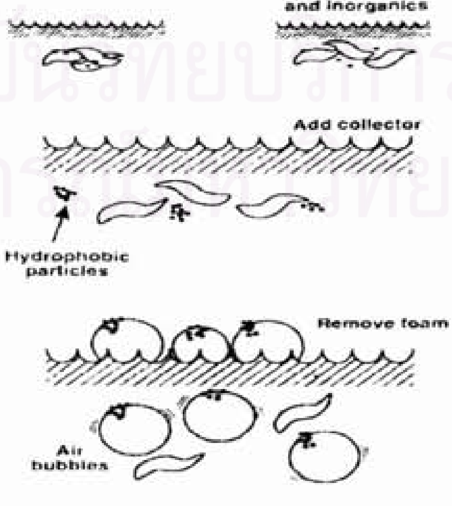
ออกไปกับน้ำด้วย อนุภาคหมึกที่เหมาะสมในการดึงหมึกออกด้วยวิธีนี้คือ อนุภาคหมึกที่มีขนาดเท่ากับหรือน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 กระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง (2)

1.7 <u>การดึงหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation)</u>

การดึงหมึกออกโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เหตุผลที่เทคนิคนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการดึงหมึกออกจากเส้นใย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำน้อยและปริมาณผลผลิตที่ได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการสูญเสียเส้นใยน้อยกว่าวิธีการล้าง นอกจากนี้หมึกที่กำจัดออกมาแล้วยังสามารถนำไปจัดการต่อได้ง่าย การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในหมึกยูวี หมึกโทนเนอร์ เป็นต้น (2)

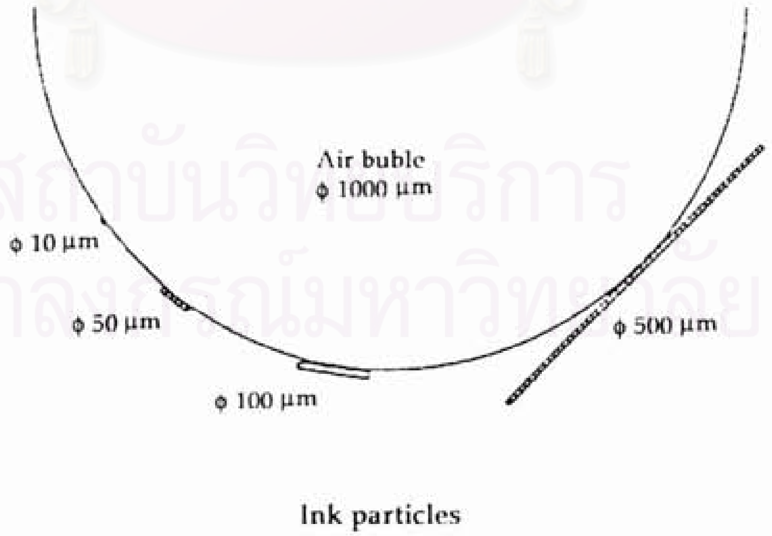


ภาพที่ 7 กระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การดึงหมึกออกด้วยวิธีนี้จะมีการใช้สารลดแรงตึงผิวจำพวก Collectors มาช่วยในการทำให้หมึกมีสมบัติในการไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากขึ้น ทำให้หมึกมาติดที่ฟองอากาศมากขึ้น จากนั้นอนุภาคหมึกที่มาติดกับฟองอากาศก็จะลอยขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell) เพื่อถูกกำจัดออกต่อไป (ภาพที่ 7)

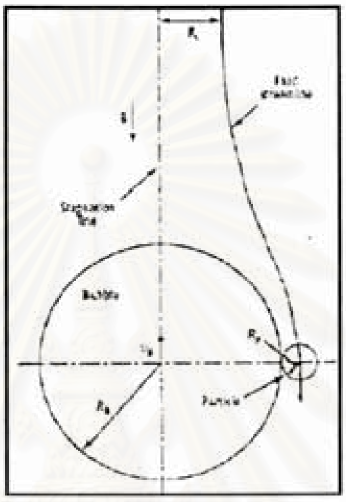
ขนาดของฟองอากาศถ้ามีขนาดใหญ่ก็จะมีข้อดีคือ สามารถลอยผ่านเครือข่ายของผิวหน้าที่มีเส้นใยอยู่และพาอนุภาคหมึกหลุดออกไปได้ และทำให้อนุภาคของหมึกสามารถติดไปได้มาก แต่ถ้าขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่เกินไป อาจจะทำให้เกิดผลเสียขึ้นได้ เนื่องจากฟองอากาศจะพาเส้นใยออกไปด้วย ทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ลดลง โดยทั่วไปแล้วขนาดอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างฟองอากาศและอนุภาคของหมึก คือ 5:1 (ฟองอากาศ:อนุภาคของหมึก) ซึ่งการยึดติดกันของฟองอากาศกับอนุภาคหมึกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณ ขนาด รวมทั้งรูปร่างของอนุภาคหมึกและฟองอากาศ ซึ่งทั้งหมดจะต้องมีความสัมพันธ์กัน ถ้ามีจำนวนของอนุภาคหมึกและฟองอากาศมาก โอกาสที่จะเกิดการชนกันก็จะมีมากขึ้น โดยที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะสามารถยึดติดกับอนุภาคหมึกที่มีขนาดเล็กได้ดี ในขณะที่ฟองอากาศขนาดใหญ่จะสามารถยึดติดกับอนุภาคของหมึกทั้งที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็กได้ (ภาพที่ 8) แต่อย่างไรก็ตามในระบบที่ใช้ฟองอากาศขนาดใหญ่ก็จะมีพื้นที่ผิวในการชนกับอนุภาคหมึกน้อยกว่าในระบบที่ใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก ดังนั้นในการดึงหมึกออกถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคหมึกที่มีขนาดเล็กออกไปควรจะใช้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก (3)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคของหมึกและขนาดของฟองอากาศ (3)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยทั่วไปแล้วขนาดอนุภาคของหมึกที่เหมาะสมในการดึงหมึกออกด้วยวิธีนี้คือ 10-100 ไมโครเมตร เพราะถ้าอนุภาคของหมึกมีขนาดใหญ่เกินไป อนุภาคของหมึกจะถูกแรงต่าง ๆ กระทำจนทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาได้ง่าย (ภาพที่ 8) แต่ถ้าอนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กเกินไป อนุภาคของหมึกอาจจะไม่ไปชนกับฟองอากาศ เนื่องจากอนุภาคหมึกที่เล็กนั้นจะไหลตามเส้นกระแส (Streamline) มากกว่าที่จะชนกับฟองอากาศ (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นกระแส ขนาดของฟองอากาศ และขนาดอนุภาคของหมึก (4)

1.8 <u>การกระจายหมึก (Dispersion)</u>

การขจัดหมึกออกด้วยวิธีนี้ไม่ได้เป็นการดึงหมึกออกอย่างแท้จริง หากแต่เป็นขั้นตอนที่ทำให้อนุภาคหมึกมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ จนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า โดยที่หมึกนั้นยังมีปริมาณของหมึกอยู่เท่าเดิม ฉะนั้นในภาพรวมแล้วค่าความขาวสว่างโดยรวมจึงมีค่าลดลง หากแต่จะไม่สามารถเห็นอนุภาคของหมึกด้วยตาเปล่าได้ การกระจายหมึกนี้นิยมใช้กับหมึกที่มีขนาดใหญ่ อาทิเช่น หมึกยูวี และหมึกโทนเนอร์ เป็นต้น

1.9 <u>การฟอกเยื่อ (Bleaching)</u>

เยื่อที่ผ่านการดึงหมึกออกแล้ว ส่วนมากจะถูกนำไปผ่านการฟอกเยื่อเพื่อปรับปรุงความขาวสว่างโดยรวมของเยื่อที่ได้อีกครั้ง ซึ่งผลที่ได้จากการฟอกเยื่อนั้นจะขึ้นกับชนิดของเยื่อและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อเป็นสำคัญ

1.10 <u>การเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water circulation and makeup)</u>

ขั้นตอนนี้เป็นการนำน้ำที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการดึงหมึกออกมาทำการปรับแต่งสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่า pH เพื่อให้มีค่าเหมาะสมก่อนที่จะนำกลับไปเวียนใช้ใหม่ในกระบวนการดึงหมึกออกต่อไป

2. **การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก** (Ink redeposition)

การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อนั้น ทำให้ค่าความสว่างของเยื่อลดลงและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อเพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ Ben และคณะ (5) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อที่มีผลต่อการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก โดยตัวแปรในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเร็วในการตีกระจายเยื่อ เวลาในการตีกระจายเยื่อ เวลาในการเก็บเยื่อ และพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการตีเยื่อ (Specific energy) ในการทดลองมีการใช้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกล (Thermomechanical pulping) ที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี เมื่อนำกระดาษมาผ่านการตีกระจายเยื่อแล้ว จะแบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไปทำการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างแบบ Hyperwashing ซึ่งเป็นการล้างเยื่อด้วยน้ำซ้ำหลาย ๆ รอบจนกระทั่งน้ำที่ได้ออกมาหลังจากการล้าง (Filtrate) มีลักษณะใส การล้างแบบ Hyperwashing นั้นสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับอนุภาคหมึกที่ยังคงเหลือติดอยู่กับเส้นใยอย่างแท้จริง โดยหากปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังจากการล้างยังคงมีค่าสูง แสดงว่ามีการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกสูง ซึ่งผลทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ Ben และคณะ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี และใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อมากขึ้น ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก็มีค่าสูงขึ้นด้วย รวมทั้งหากมีการใช้ความเข้มข้นของเยื่อสูง ความเร็วในการตีกระจายเยื่อสูง จะยิ่งทำให้ปัญหาการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกเกิดมากขึ้น กล่าวคือ การตีเยื่อโดยใช้เวลานาน ความเข้มข้นของเยื่อสูง และความเร็วในการตีกระจายสูง จะส่งผลให้ขนาดอนุภาคของหมึกยิ่งเล็กลงมาก จนกระทั่งมีโอกาสย้อนกลับไปติดที่เส้นใยได้มาก โดยอนุภาคของหมึกเหล่านั้นจะฝังตัวอยู่บริเวณผิวที่ไม่เรียบของช่องว่างตรงกลางของเส้นใย (Lumen) มากกว่าบริเวณผิวหน้าของเส้นใย

3. **ความสามารถในการดึงหมึกพิมพ์ออก** (Deinkability)

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดึงหมึกพิมพ์ออกมีหลายอย่าง เช่น ชนิดของหมึกพิมพ์ ชนิดของกระดาษ และกระบวนการพิมพ์กระดาษนั้น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ตัวแปรหลักที่มีผลมากต่อความสามารถในการดึงหมึกพิมพ์ออกนั้น มีอยู่ 2 ประการ คือ สภาพผิวหน้าของกระดาษและสมบัติของหมึกพิมพ์ โดยทั่วไปแล้วการดึงหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษที่ไม่เคลือบผิวนั้นจะยากกว่าการดึงหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวมาแล้ว ในส่วนของสมบัติของหมึกพิมพ์นั้น หมึกพิมพ์ที่ใช้ระบบการพิมพ์ต่างกันและมีระบบการแห้งตัวต่างกัน ย่อมส่งผลให้ความสามารถในการดึงหมึกพิมพ์ออกต่างกันไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการพิมพ์ กลไลการแห้งตัว และความสามารถในการดึงหมึกออก (6)

ระบบการพิมพ์	กลไกการแห้งตัว	ความสามารถในการดึงหมึกออก
- ออฟเซตสำหรับพิมพ์หนังสือพิมพ์	การดูดซึม และออกซิเดชัน	ดึงหมึกออกดี ถ้าไม่มีการเก็บ หลังจากการเก็บ การหลุดออกของหมึกไม่ดี ทำให้เกิดปื้นหมึกและจุดหมึก
- เลตเตอร์เพรส	การดูดซึม และออกซิเดชัน	
- ออฟเซตป้อนแผ่น, ออฟเซตแห้งตัวด้วยความร้อน	การดูดซึม, การระเหย และออกซิเดชัน	
- กราวัวร์	การระเหย	ดึงหมึกออกดี แต่มีแนวโน้มที่เยื่อจะมีสี ซึ่งเกิดจากสีย้อม
- เฟล็กโซกราฟี	การระเหย	หมึกฐานน้ำ การดึงหมึกออกไม่ดี ถ้าค่า pH ในระบบเป็นเบส
- เครื่องพิมพ์เลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสาร (UV และ IR)	แห้งตัวด้วยการฉายรังสี	หมึกโทนเนอร์หลุดออกยากและเกิดจุดหมึกมาก

4. สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการดึงหมึกออก (Deinking chemicals)

การเลือกใช้สารเคมีในกระบวนการดึงหมึกออกนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่จะนำมาดึงหมึกพิมพ์ออก ระบบที่ใช้ในการพิมพ์ ชนิดของหมึกพิมพ์ ขั้นตอนของกระบวนการดึงหมึกออก และคุณภาพของเยื่อหลังดึงหมึกออกที่ต้องการ เป็นต้น โดยสารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นตัวยึด (Binder) ไม่ใช่ส่วนที่เป็นสารสี (Pigment) (7) สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการดึงหมึกออก มีดังนี้ คือ

4.1 <u>โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)</u>

จะใส่ในขั้นตอน Repulping หรือ Bleaching เพื่อช่วยในปรับค่า pH ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อให้มีค่าเป็นเบส เพื่อเส้นใยจะได้พองตัวรับน้ำได้มากและมีความหยุ่นตัว ทำให้ขจัดหมึกออกได้ดีขึ้น ด้วยการใช้แรงเสียดทาน อีกทั้งยังเป็นการใส่เพื่อป้องกันการรวมตัวของอนุภาคหมึกที่มีขนาดเล็กซึ่งทำให้ดึงหมึกออกได้ยากโดยวิธีการล้าง และเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) ซึ่งต้องการภาวะที่เป็น

เบสในการทำปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการใส่ NaOH มากเกินไปลงไปในกระดาษที่ทำมาจากเยื่อไม้บดจะทำให้เยื่อสุดท้ายที่ได้จากการรีไซเคิลมีสีเหลืองและคล้ำ ซึ่งเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Alkali Darkening" หรือความหมองคล้ำด้วยด่าง

4.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2)

จะใส่ในขั้นตอน Repulping หรือ Bleaching ซึ่ง H_2O_2 เป็นสารฟอกเยื่อซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น โดย H_2O_2 จะทำปฏิกิริยากับ NaOH ทำให้เกิด OOH^- (Perhydroxyl ion) ซึ่งเป็นสารฟอกเยื่อที่แท้จริง (True bleaching agent) ตามสมการที่ 1 (4) นอกจากนี้ยังช่วยในการทำลายอัลคิดเรซิน (alkyd resin) ซึ่งเป็นตัวยึดที่พบมากในหมึกออฟเซต

$$H_2O_2 + NaOH \longrightarrow HOO^- + Na^+ + H_2O \qquad (1)$$

pH = 10-11.5, อุณหภูมิ = 40-80 °C

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่มีโลหะหนักจำพวกแมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น รวมถึงสภาวะที่มีค่า pH และอุณหภูมิสูง การสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถป้องกันได้โดยการใส่สารที่เรียกว่า "Stabilizing agent" เช่น สารคีเลติง (Chelating agents) และโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; Na_2SiO_3) โดยที่สาร Stabilizing agent นี้จะไม่ได้ไปทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงสภาพ แต่จะไปทำให้สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการคงสภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4.3 สารจับโลหะหนัก (Chelating agents หรือ Chelants)

จะใส่ในขั้นตอน Repulping หรือ Bleaching เพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก โดยจะไปจับโลหะหนักไว้ ก่อนที่โลหะหนักจะไปเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ชนิดของสารจับโลหะหนักที่นิยมใช้กันในกระบวนการดึงหมึกออก ได้แก่ DTPA (Diethylenetriaminepentacetic acid) และ EDTA (Ethylenediaminetetracetic acid) เป็นต้น โดย DTPA ซึ่งมีโครงสร้าง 5 แขน จับโลหะหนักได้ดีและแข็งแรงกว่า EDTA ที่มีโครงสร้าง 4 แขน การจับกับโลหะหนักของ DTPA จะเรียงลำดับดังต่อไปนี้ (เรียงจากง่ายไปยาก): $Ni^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Al^{3+}$

4.4 โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; Na_2SiO_3)

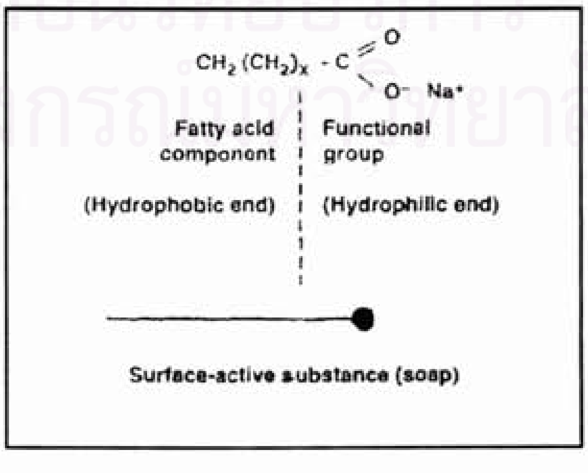
จะใส่ในขั้นตอน Repulping หรือ Bleaching โซเดียวซิลิเกตจะไปจับกับโลหะโดยเกิดเป็นคอลลอยด์กับโลหะ นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตยังช่วยในการดึงหมึกออกโดยทำให้หมึกกระจายตัวมากขึ้น และย้อนกลับมาเกาะติดที่เส้นใยได้น้อยลง โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเคมีที่ใช้ได้ดีกับเยื่อไม้บดเพราะทำให้เกิดความเหลืองน้อย และยังทำหน้าที่เป็น pH buffer อีกด้วย

4.5 <u>สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerating chemicals)</u>

จะใส่ในขั้นตอนของการทำ Repulping, Screening หรือ Cleaning ซึ่งสารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม เป็นสารเคมีที่ใช้สำหรับหมึกพวกโทนเนอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีโครงสร้างของรูปร่างเป็นแบบแผ่นแบน ซึ่งหมึกเหล่านี้อาจมีขนาดใหญ่เกินไปที่จะนำมาขจัดออกโดยวิธีการล้างหรือลอยฟองอากาศ ดังนั้นจึงพยายามทำให้หมึกมารวมกันเป็นกลุ่มก้อน และมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยการใช้สารเคมีนี้ จากนั้นหมึกจะถูกกำจัดออกไปโดยวิธีการ Screen หรือ Forward cleaning ต่อไป

4.6 <u>สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)</u>

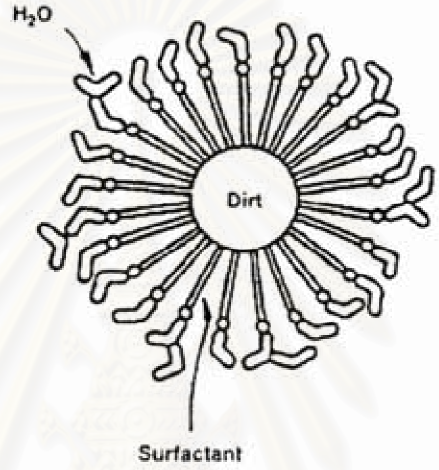
จะใส่ในขั้นตอน Repulping, Flotation หรือ Washing โดยทั่วไปแล้วสารลดแรงตึงผิวเป็นคำรวมที่ใช้ครอบคลุมตั้งแต่ Dispersants, Collectors, Wetting agents, และ Displectors เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) โดยส่วนที่เป็น Hydrophobic part จะประกอบด้วย C และ H ซึ่งโมเลกุลเป็นได้ทั้งโครงสร้างเส้นตรงหรือเป็นกิ่ง รวมถึงสามารถเป็นโมเลกุลแบบอิ่มตัวและแบบไม่อิ่มตัว (ภาพที่ 10) ในขณะที่ส่วนที่เป็น Hydrophilic ทำให้สามารถแบ่งประเภทของสารลดแรงตึงผิวออกเป็น Non-ionic และ Ionic surfactants โดย Ionic surfactants สามารถแบ่งย่อย ออกได้เป็นประจุบวก (Cationic) ประจุลบ (Anionic) และมีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ด้วยกัน(Amphoteric) ในกระบวนการดึงหมึกออกนั้นโดยทั่วไปนิยมใช้ Non-ionic surfactants มากกว่า เนื่องจากสามารถทำงานได้ดี เป็นอิสระจากค่า pH และความกระด้างของน้ำ (Water hardness) ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในกระบวนการดึงหมึกออกนั้นอยู่ที่ร้อยละ 0.2 - 2.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้และวิธีการดึงหมึกออกเป็นสำคัญ



ภาพที่ 10 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว (2)

4.7 Dispersants

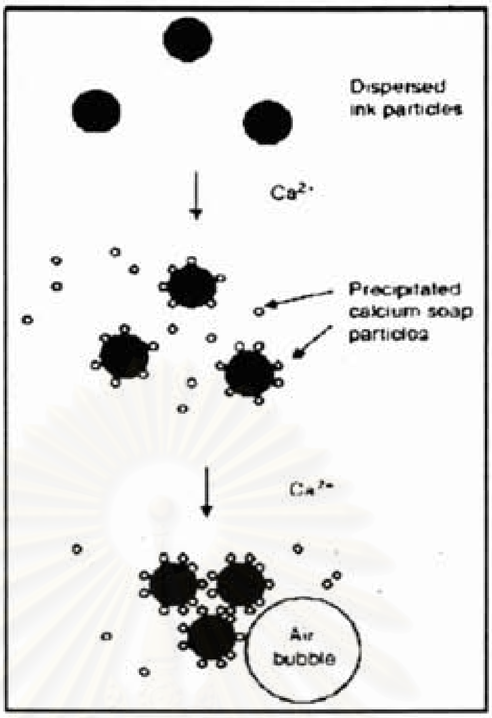
เป็นสารที่ใส่ในขั้นตอน Repulping หรือ Washing เพื่อช่วยในการกำจัดหมึกพิมพ์ด้วยวิธีการล้าง โดย Dispersants ไปช่วยทำให้หมึกกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ และทำให้มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ด้วยการฟอร์มตัวเป็น "Micelle" (ภาพที่ 11) โดยเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปแล้วส่วนที่เป็น Hydrophilic ของสารลดแรงตึงผิวจะหันเข้าหาน้ำ ในขณะส่วนที่เป็น Hydrophobic จะหันเข้าหาหมึกหรือคราบสกปรก



ภาพที่ 11 ลักษณะของ Micell (8)

4.8 Collectors

เป็นสารเคมีที่ใส่ในขั้นตอน Repulping หรือ Flotation เพื่อช่วยในกระบวนการดึงหมึกออกแบบการลอยฟองอากาศ โดยอนุภาคของหมึกพิมพ์จะสัมผัสกับ Collector ทำให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และเริ่มเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จากนั้นกลุ่มของอนุภาคหมึกจะไปสัมผัสกับฟองอากาศต่อ และถูกกำจัดออกไปตรงบริเวณผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ (ภาพที่ 12) นอกจากนั้น Collector ยังทำหน้าที่ช่วยปรับแรงตึงผิวของฟองอากาศให้มีความแข็งแรงมากพอ ที่จะสามารถพาอนุภาคของหมึกลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อกำจัดต่อไป



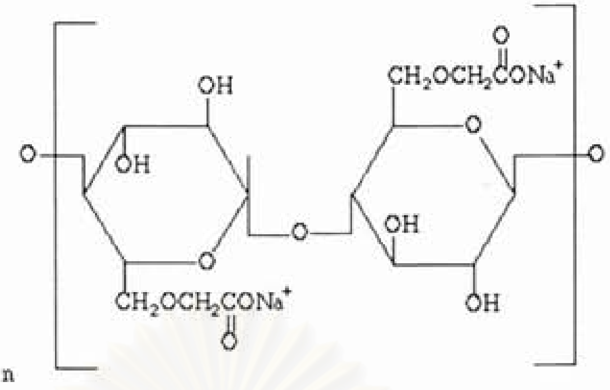
ภาพที่ 12 การทำงานของ Collector (1)

4.9 Displectors

ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในกระบวนการดึงหมึกออกแบบลูกผสม คือสามารถใช้ได้กับวิธีการล้างและการลอยฟองอากาศ โดยจะให้แรงยึดเกาะต่อฟองอากาศได้ดีในกรณีของการลอยฟองอากาศ และในขณะเดียวกันก็มีสมบัติชอบน้ำมากพอที่จะไม่ทำให้อนุภาคของหมึกกลับมาติดกับเส้นใยอีก รวมทั้งทนต่อสภาพน้ำกระด้างและไม่ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกรัน (Scaling) Displector เป็นสารสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นของเหลวและมักจะมีกลุ่ม Alkoxylated fatty acid derivatives อยู่ด้วย

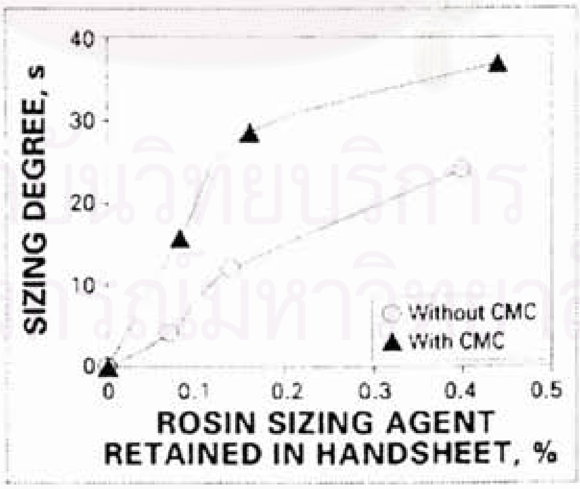
5. **คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ** CMC (Carboxymethylcellulose)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ CMC คือเซลลูโลสที่มีหมู่คาร์บอกซีเมทิลมาแทนที่ไฮโดรเจน โดยที่สารตัวนี้จะให้ประจุลบ (ภาพที่ 13) โดยทั่วไปแล้วเป็นการยากที่ CMC จะถูกเส้นใยดูดซับ เพราะว่าเส้นใยมีประจุลบ และ CMC ก็มี Carboxyl groups ที่เป็นประจุลบเช่นกัน จึงมีแรงผลักกันทางไฟฟ้าเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาอิทธิพลการดูดซับ CMC ของเส้นใยที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เส้นใยสามารถดูดซับ CMC ได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้การดูดซับ CMC ของเส้นใยก็ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อด้วย (9)



ภาพที่ 13 โครงสร้างของ CMC (10)

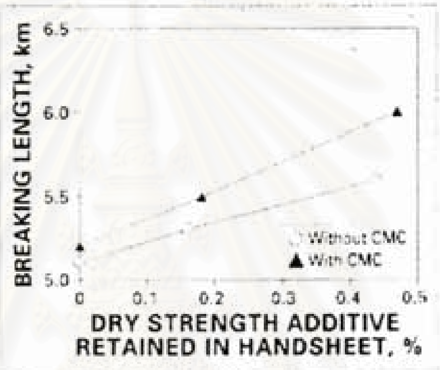
อย่างไรก็ตาม เมื่อ CMC สามารถถูกดูดซับที่ผิวหน้าของเส้นใยได้แล้ว การเติม CMC ยังมีผลต่อสมบัติด้านอื่น ๆ ของกระดาษอีกด้วย จากการศึกษาของ Watanabe และคณะ (9) ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการใส่ CMC ที่มีผลต่อการกักเก็บสารเคมีชนิดอื่นของเส้นใยพบว่า การใส่ CMC ลงไปในเยื่อก่อนที่จะใส่สารเคมี อาทิเช่น สารกันซึมชนิด Rosin (Rosin sizing agant) สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษแห้ง (Dry strength additive) และสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษเปียก (Wet strength additive) มีผลทำให้กระดาษสามารถกักเก็บสารเคมีเหล่านี้ได้มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการซึมน้ำของกระดาษสูงขึ้น (ภาพที่ 14)



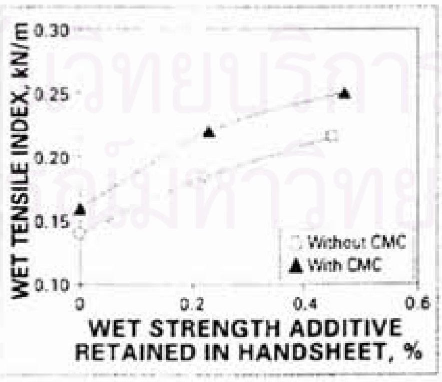
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการต้านทานการซึมน้ำ และปริมาณของสารกันซึมที่ถูกกักเก็บในแผ่นกระดาษ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีการใส่และไม่มีการใส่ CMC (9)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้ CMC ยังมีผลทำให้ความแข็งแรงของกระดาษในขณะแห้ง ซึ่งบอกโดยระยะทางที่กระดาษขาด (Breaking length) มีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 15) และค่าความแข็งแรงเมื่อกระดาษเปียก ซึ่งบอกโดยค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเมื่อกระดาษเปียก (Wet tensile index) มีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 16) นอกจากนี้การใช้ CMC ยังทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีต่าง ๆ ได้น้อยลง เนื่องจากการกักเก็บสารเคมีของเส้นใยดีขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการใช้ CMC ทำให้ประจุลบในระบบมากขึ้น และการกระจายตัวของประจุลบในระบบดีขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มการกักเก็บสารเคมีดังกล่าวซึ่งเป็นประจุบวกได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานของสารเคมีเหล่านี้จึงเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่กระดาษขาด และปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษแห้งที่ถูกกักเก็บในแผ่นกระดาษ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีการใส่และไม่มีการใส่ CMC (9)



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเมื่อกระดาษเปียก และปริมาณสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษเปียกที่ถูกกักเก็บในแผ่นกระดาษ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีการใส่และไม่มีการใส่ CMC (9)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

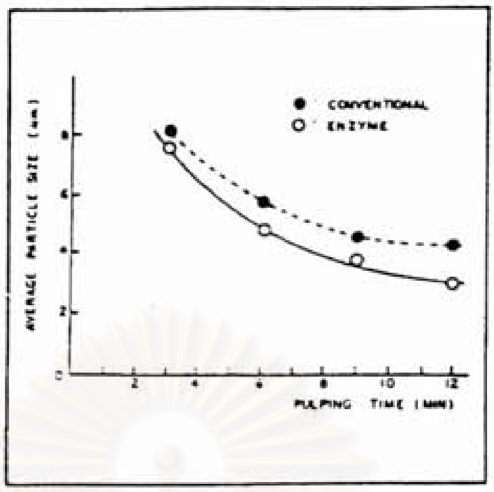
6. **ความสำคัญของเอนไซม์ในกระบวนการดึงหมึก**

เป็นที่รู้กันว่ากระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์มาแล้ว หากต้องการจะนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องมีการดึงหมึกออกก่อน เพื่อให้กระดาษที่ผลิตขึ้นมาใหม่จากเยื่อที่ใช้แล้วมีความขาวสว่างมากขึ้น ขั้นตอนการดึงหมึกออกจากเยื่อเป็นขั้นตอนที่สามารถเลือกใช้ได้หลายวิธี อย่างไรก็ตามการใช้เทคโนโลยีชีวภาพมาช่วยในการดึงหมึกออกนั้นกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากหมึกบางชนิดไม่สามารถถูกกำจัดออกได้ด้วยวิธีทั่ว ๆ ไปดังที่กล่าวมาแล้ว กอปรทั้งการใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ อาทิเช่น การใช้เอนไซม์ยังช่วยทำให้สามารถลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในระบบได้ รวมถึงความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้ราคาของเอนไซม์มีแนวโน้มที่ลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำเอนไซม์เข้ามาช่วยในกระบวนการดึงหมึก

ในกระดาษมีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) โดยที่เซลลูโลสคือ คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภท Polysaccharide ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) มาต่อกันเป็นพอลิเมอร์ ส่วนเฮมิเซลลูโลสก็เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภท Polysaccharide เช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่จะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลหลายชนิด กล่าวคือ น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น Glucose, Manose และ Galactose น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม เช่น Xylose และ Arabinose

จากความรู้พื้นฐานองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนี้ ทำให้ทราบว่าสามารถนำเอนไซม์มาช่วยในการดึงหมึกออกจากเส้นใยได้ โดยเอนไซม์ที่เลือกมาใช้ต้องสามารถไปย่อยสลายหรือตัดพันธะของน้ำตาลหรือแป้งที่ต่อเรียงกันเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ ซึ่งเอนไซม์ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการดึงหมึกออกได้แก่ เซลลูเลส (Celluloses) เฮมิเซลลูเลส (Hemicellulase) และอะไมเลส (Amylase) เป็นต้น (11) การเลือกใช้เอนไซม์เหล่านี้มีผลทำให้กรรมวิธีในการดึงหมึกออกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้สารเคมีแบบเดิม ทั้งนี้เพราะเอนไซม์เป็นผลผลิตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทางชีวภาพจึงไม่ก่อปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

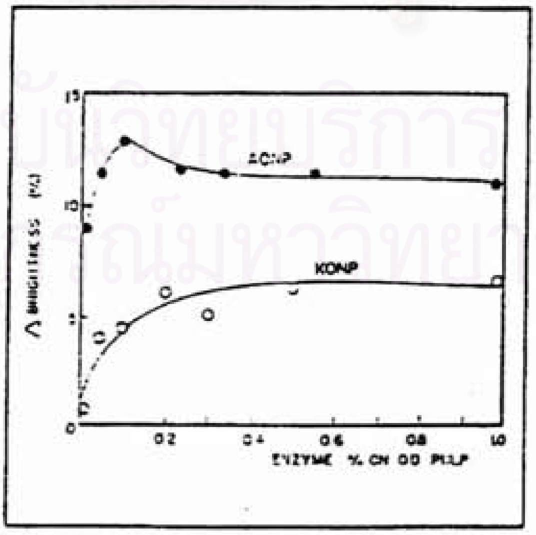
ในปี 1991 Kim และคณะ (12,13) ได้ทำการศึกษาการดึงหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์โดยใช้เซลลูเลส โดยใช้ค่า pH เท่ากับ 4.7 ในการทดลองมีการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ 2 ชนิด คือ หนังสือพิมพ์เก่าจากประเทศอเมริกา (AONP) และหนังสือพิมพ์เก่าจากประเทศเกาหลี (KONP) พบว่าเมื่อเติมเอนไซม์ลงไปเท่ากับร้อยละ 0.5 สามารถลดเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อลงได้ เมื่อเทียบกับการไม่ใช้เอนไซม์ นอกจากนี้การเติมเอนไซม์ลงไปในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อยังช่วยลดขนาดของอนุภาคหมึกได้เมื่อใช้เวลาในการตีเยื่อเท่ากับกรณีที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 17 ผลของเซลลูเลสที่มีต่อขนาดอนุภาคของหมึก
และเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ (12)

ในส่วนของค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ผลิตได้นั้น พบว่าเมื่อเติมเซลลูเลสลงไปในกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ พบว่าปริมาณเซลลูเลสที่เติมลงไปเล็กน้อยคือร้อยละ 0.1-0.15 ให้ค่าการเพิ่มของค่าความขาวสว่างสูงสุด โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูเลสให้มากขึ้น กลับไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความขาวสว่าง (ภาพที่ 18)

นอกจากนี้ยังพบว่า ในกระดาษหนังสือพิมพ์ต่างชนิดกันยังได้ผลที่คล้ายกันด้วยคือปริมาณเอนไซม์ที่เติมลงไปเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าความขาวสว่างสูงที่สุด

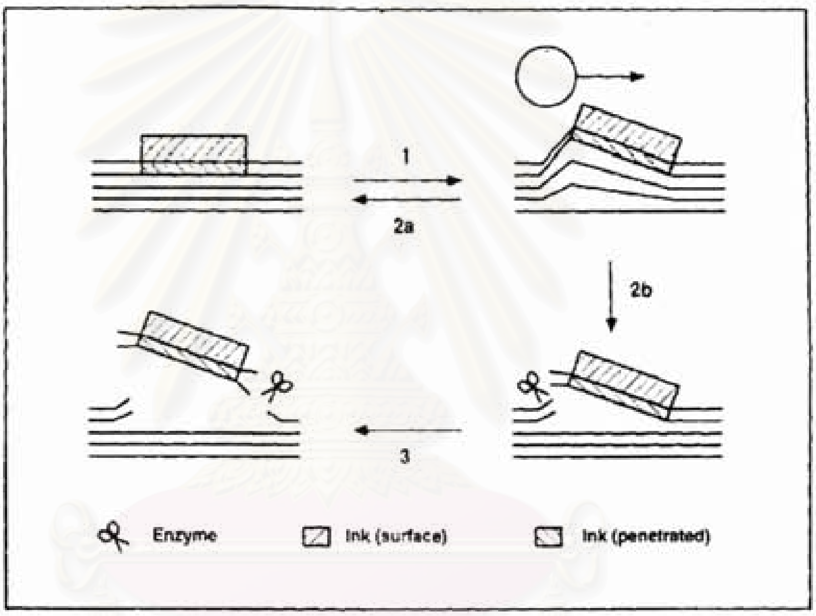


ภาพที่ 18 ผลของปริมาณเซลลูเลสกับค่าความขาวสว่างของกระดาษ 2 ชนิด (12)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในด้านสมบัติความแข็งแรงของเยื่อที่ผลิตได้พบว่า ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index) และดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก มีค่ามากขึ้นเมื่อเติมเอนไซม์ในปริมาณที่พอเหมาะ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเส้นใยเล็ก ๆ ในระบบซึ่งจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยยาวจะถูกเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาจนเกือบหมด คงเหลือแต่เส้นใยที่มีความยาวอยู่ในระบบจำนวนที่มากกว่า จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษโดยรวมเพิ่มขึ้น (14)

ในปี 1994 Zeyer และคณะ (15) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการดึงหมึก และได้เสนอข้อคิดเห็นเกี่ยวกับโมเดลการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่อเส้นใยดังนี้



ภาพที่ 19 โมเดลการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ (15)

ในตอนแรกเส้นใยจะถูกปิดกั้นโดยชั้นของหมึกพิมพ์ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ แต่เมื่อมีแรงเสียดทานอันเกิดขึ้นมาจากการตีกระจายเยื่อ หรือการผสมเยื่อจะทำให้เอนไซม์สามารถไปตัดพันธะได้ เพราะการตีกระจายเยื่อนั้นทำให้รูปแบบการยึดติดของหมึกบนเส้นใยบิดเบี้ยวไปและไปช่วยเปิดผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น สามารถตัดสายโซ่ของเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ และเมื่อเส้นใยถูกตัด อนุภาคของหมึกที่อยู่บนผิวหน้าของเส้นใยก็จะสามารถหลุดออกมาได้เพื่อถูกกำจัดออกจากระบบต่อไป

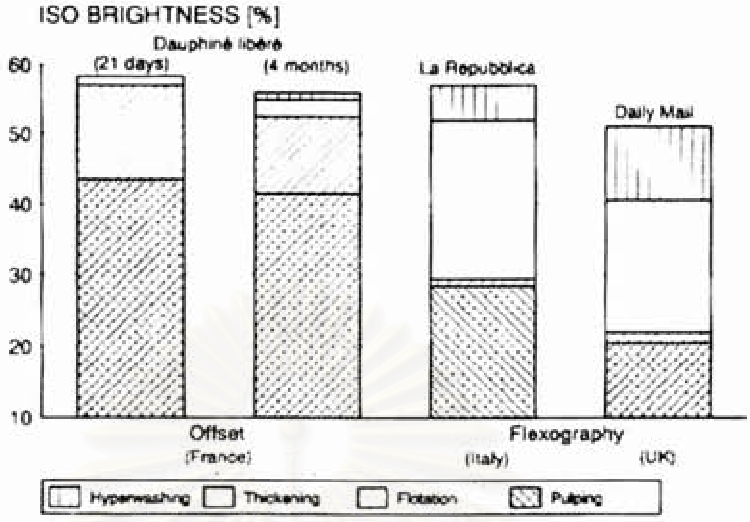
7. ปัญหาของการดึงหมึกออกจากเส้นใยของหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

ระบบการพิมพ์แต่ละชนิดมีการใช้หมึกแตกต่างกันออกไป เพื่อให้เหมาะสมกับระบบการพิมพ์นั้น ๆ ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ของหมึกรวมไปถึงขนาดอนุภาคของหมึกที่ใช้ในแต่ละระบบการพิมพ์ย่อมที่จะแตกต่างกันออกไปด้วย ส่งผลให้การเลือกใช้วิธีการดึงหมึกออกจากเส้นใยมีความแตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

ตารางที่ 2 ขนาดของอนุภาคหมึกในแต่ละระบบการพิมพ์ (1)

ประเภทของหมึกพิมพ์	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคของหมึก (ไมโครเมตร)	
	กระดาษไม่เคลือบผิว	กระดาษเคลือบผิว
เลตเตอร์เพรส (Letterpress)	2-30	10-100
ออฟเซต (Offset)	2-30	50-100
เฟล็กโซฐานน้ำ (Water-based flexo)	0.3-1	0.7-2
กราวัวร์ (Gravure)	2-30	5-30
โทนเนอร์ (Toner)	40-400	40-400

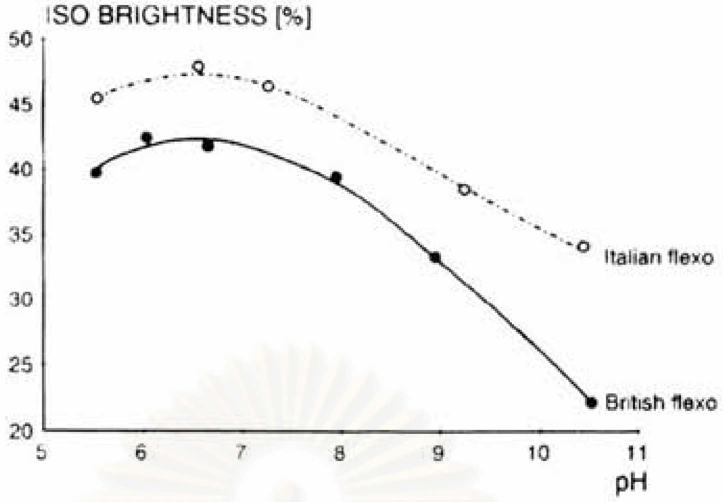
จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าขนาดอนุภาคของหมึกพิมพ์เลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสารซึ่งเป็นหมึกโทนเนอร์จะมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยรองลงมาเป็นหมึกออฟเซต เลตเตอร์เพรส กราวัวร์และเฟล็กโซฐานน้ำตามลำดับ เนื่องจากว่าอนุภาคของหมึกเฟล็กโซฐานน้ำนั้นมีอนุภาคหมึกที่ค่อนข้างเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของหมึกพิมพ์อื่น ๆ คือมีขนาดเพียง 0.3-2 ไมโครเมตร ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมในการดึงหมึกออกคือวิธีการล้าง เพราะวิธีนี้เหมาะสำหรับการดึงหมึกที่มีขนาดอนุภาคของหมึกที่เล็กกว่า 10 ไมโครเมตร แต่เนื่องจากว่าในการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างนั้น ต้องใช้ปริมาณน้ำที่นำมาล้างเยื่อมาก ทำให้ค่อนข้างสิ้นเปลือง และน้ำจากการล้างเยื่อที่มีปริมาณมาก ๆ นั้นยากต่อการนำไปปรับสภาพ จึงได้มีความพยายามเปลี่ยนมาใช้วิธีการดึงหมึกออกแบบการลอยฟองอากาศแทน



ภาพที่ 20 ความขาวสว่างที่ได้จากการดึงหมึกออกด้วยวิธีต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษหนังสือพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยระบบออฟเซต และที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ (1)

จากภาพที่ 20 จะเห็นได้ว่าค่าความขาวสว่างหลังจากการตีกระจายเยื่อ (Pulping) และการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation) ในกรณีของหมึกออฟเซตนั้น จะมีค่าสูงกว่าในกรณีของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีมาก ทั้งนี้เนื่องจากการตีกระจายเยื่อในภาวะที่เป็นด่างส่งผลให้หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟียิ่งมีการกระจายตัวมีขนาดเล็กมากยิ่งขึ้น และขนาดอนุภาคที่เล็กเหล่านี้ไม่เหมาะสมกับวิธีการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการทดลองต่อ โดยนำเยื่อที่ได้ไปผ่านการทำให้ความเข้มข้นสูงขึ้น (Thickening) จะทำให้หมึกที่มีขนาดเล็ก ๆ เหล่านี้สามารถลอดผ่านตะแกรงออกไปกับน้ำได้มากขึ้น ค่าความขาวสว่างจึงเพิ่มสูงขึ้น และหากนำเยื่อที่ได้ไปทำการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีที่เรียกว่า Hyperwashing จะยิ่งทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ผลิตจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีมีค่าสูงกว่าหมึกออฟเซต ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการล้างนั้นเป็นการดึงหมึกออกที่เหมาะสมกับหมึกที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ๆ เหมือนหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำนั่นเอง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วถึงข้อได้เปรียบของกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการล้าง จึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงวิธีการดึงหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำโดยการลอยฟองอากาศ เพื่อให้การดึงหมึกออกมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยหนึ่งในวิธีดังกล่าวคือ การลดค่า pH ในการตีกระจายเยื่อและการลอยฟองอากาศ ซึ่งพบว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ผลิตได้หลังการดึงหมึกออกจะมีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 ผลของค่า pH ที่ใช้ในกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ที่มีต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษหนังสือพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ (1)

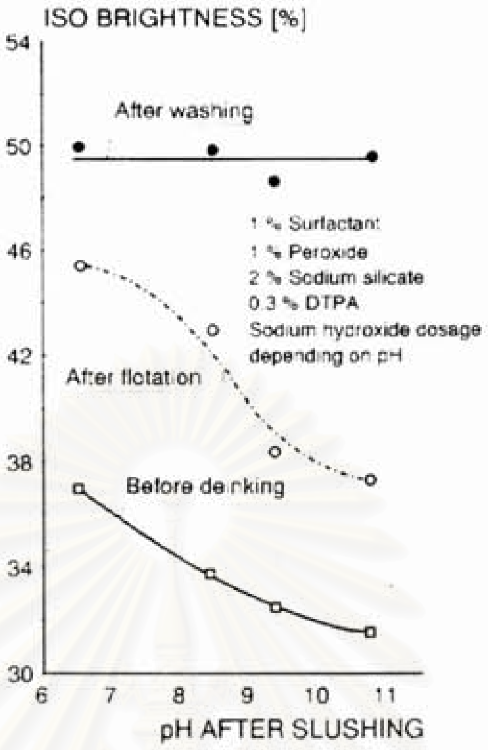
จากภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่า pH สูงขึ้น ความขาวสว่างของเยื่อที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารยึด (Binder) ในหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำนั้นคืออะคริลิกเรซิน (Acrylic resins) (ตารางที่ 3) ซึ่งสามารถละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นเบส ส่งผลให้อนุภาคของหมึกที่ติดอยู่กับสารยึดเกิดการกระจายตัวและมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ซึ่งไม่เหมาะกับการถูกกำจัดออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ดังนั้นค่าความขาวสว่างที่ได้จึงลดลงเมื่อค่า pH ในระบบสูงขึ้น

จากภาพที่ 22 จะเห็นได้ว่าการใช้ค่า pH หลังจากการตีกระจายเยื่อที่อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อก่อนการดึงหมึกออกและหลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารยึด (Acrylic resins) ในหมึกพิมพ์เฟล็กโซ-กราฟีฐานน้ำละลายได้น้อยลง อนุภาคของหมึกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น หมึกจึงถูกกำจัดออกได้ง่ายมากขึ้น โดยลอดผ่านตะแกรงทำแผ่นทดสอบในระหว่างการทำแผ่นทดสอบ และการกำจัดหมึกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีของการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างนั้น ค่า pH ที่ใช้นั้นไม่มีผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ผลิตได้เลย แม้ว่าขนาดอนุภาคของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อใช้ค่า pH เป็นกลาง แต่ขนาดที่ใหญ่ขึ้นนั้นก็ยังจัดได้ว่าไม่ใหญ่มากเกินไปที่จะถูกกำจัดออกด้วยวิธีการล้าง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างนั้นสามารถทำได้ทุกสภาวะของค่า pH โดยที่ประสิทธิภาพในการดึงหมึกออกไม่ลดลง และไม่จำเป็นต้องควบคุมค่า pH ในระบบ

ตารางที่ 3 ชนิดของสารยึดและตัวพาในหมึกแต่ละประเภท (1)

กระบวนการพิมพ์	สารยึด (Binder)	ตัวพา (Carrier)
ออฟเซตป้อนม้วน	ไฮโดรคาร์บอนเรซิน (Hydrocarbon resin)	น้ำมันปิโตรเลียมช่วงกลั่นแคบ (Mineral oil)
ออฟเซต เลตเตอร์เพรส	น้ำมันชักแห้ง (Drying oils) อัลคิดเรซิน (Alkyd resin) ฟีนอลโมดิฟายด์โคโลโฟนี่เรซิน (Phenol-modified colophony resin) ไฮโดรคาร์บอนเรซิน (Hydrocarbon resin)	น้ำมันปิโตรเลียมช่วงกลั่นแคบ(Mineral oil)
กราวัวร์	อนุพันธ์โคโลโฟนี่ (Colophony derivatives) ไฮโดรคาร์บอนเรซิน (Hydrocarbon resin)	โทลูอีน (Toluene)
เฟล็กโซกราฟี (บรรจุภัณฑ์) กราวัวร์ (บรรจุภัณฑ์)	เซลลูโลส ไนเตรต (Cellulose nitrate) พอลิไวนิลแอซิเทต (Polyvinyl acetate) พอลิแอไมด์ (Polyamides)	เอทานอล (Ethanol) ไอโซโพรพานอล (isopropanaol) เอทิลแอซิเทต (Ethyl acetate) เบนซีน (Benzene)
เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ	อะคริลิกเรซิน (Acrylic resins)	น้ำ (Water)
กราวัวร์ (ฐานน้ำ)	มาเลอิกเรซิน (Maleic resins)	แอลกอฮอล์ (Alcohols)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 22 ผลของค่า pH หลังจากการตีกระจายเยื่อที่มีผลต่อความขาวสว่างของเยื่อที่ได้ หลังจากการตีกระจายเยื่อ การลอยฟองอากาศ และการล้าง (1)

8. เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก

8.1 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness)

เป็นค่าการทดสอบสมบัติในการให้น้ำไหลผ่านได้ของเยื่อ ค่าสภาพระบายได้ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือ Canadian standard freeness (CSF) (มาตรฐาน TAPPI T-227) (16) โดยเยื่อที่มีขนาดสั้นจะให้ค่าสภาพระบายได้ที่ต่ำกว่าเยื่อที่มีขนาดยาวในปริมาณที่เท่ากัน ผลของค่าสภาพระบายได้จะรายงานเป็นค่ามิลลิลิตร (ml)

8.2 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield)

เป็นค่าปริมาณผลผลิตที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการดึงหมึกออกแล้ว โดยสามารถคำนวณได้จากปริมาณน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศและปริมาณน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาจากกระบวนการลอยฟองอากาศ โดยใช้สมการที่ 2

$$\%Yield = \frac{Feed - Reject}{Feed} \times 100 \qquad (2)$$

โดย Feed = น้ำหนักของน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ

Reject = น้ำหนักของน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาจากกระบวนการลอยฟองอากาศ

8.3 <u>การทำแผ่นทดสอบ (Handsheet)</u>

ในการทดลองจะนำเยื่อที่ได้ทั้งก่อนและหลังดึงหมึกออกไปทำเป็นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO-5269/2 (17) จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดค่าความขาวสว่าง ค่าปริมาณหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก

8.4 <u>ความขาวสว่าง (Brightness)</u>

ความขาวสว่างในอุตสาหกรรมกระดาษจะเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน (457 นาโนเมตร) (18) เปรียบเทียบกับแผ่นกระจายแสงที่ให้การสะท้อนแสงอย่างสมบูรณ์ (Perfect reflecting diffuser) ตามมาตรฐาน ISO 2469-1977 ความขาวสว่างเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับการกระเจิงแสง (Light scattering) ของกระดาษเท่านั้น ฉะนั้นค่าความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์เฉพาะในการระบุสมบัติการฟอกเยื่อหรือสมบัติในการดึงหมึกออกเท่านั้น การวัดความขาวสว่างยังขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะเชิงเรขาคณิตของระบบแสง (Optical geometry) เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดความขาวสว่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ Technidyne, Elrepho, G.E. และ Photovolt เป็นต้น

ส่วนสาเหตุที่เลือกใช้ช่วงแสงสีน้ำเงินในการวัดค่าความขาวสว่างนั้น เนื่องจากเป็นเพราะว่าตามนุษย์และทางด้านจิตวิทยานั้นชอบสีน้ำเงินมากกว่าสีอื่นๆ เมื่อสิ่งของเริ่มเก่า มักมีสีเหลืองปนในสีเดิม ดังนั้นสีน้ำเงินที่เป็นสีคู่ตรงข้ามของสีเหลืองที่แสดงถึงความใหม่ จึงทำให้สีน้ำเงินเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่ไม่ได้ฟอกขาว (Unbleached paper) จะมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล และการฟอกกระดาษก็คือการเพิ่มสีน้ำเงินให้กับกระดาษนั่นเอง

8.5 <u>ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC, Effective Residual Ink Concentration)</u>

เป็นการวัดค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 pm-97) (19) โดยการใช้ทฤษฎี Kubelka-Munk (20) และเป็นค่าที่ได้มาจากการวัดค่าการสะท้อนแสงในช่วงอินฟาเรด (IR) ที่ความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร ซึ่งสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของหมึกจะมากกว่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของเส้นใยและองค์ประกอบอื่นๆ

ในการวัดค่าการสะท้อนแสงของแผ่นทดสอบ จะทำการวัดค่า R_∞ และ R_0 โดยกำหนดให้

R_∞ คือ ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษแผ่นที่ทดสอบรองด้านหลังด้วยกระดาษชนิดเดียวกันหลาย ๆ แผ่น

R_0 คือ ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษแผ่นที่ทดสอบรองด้านหลังด้วยวัตถุสีดำ

เมื่อได้ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษมาแล้ว จะนำค่าที่ได้นี้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (s) โดยใช้สมการที่ 3

$$s = [\ 1000/(w\ (\ 1/\ R\infty - R_0))]\ \ln (1 - R_0\ R\infty)\ /\ (1 - R_0/R\infty)] \quad (3)$$

โดย w คือน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (กรัม/ตารางเมตร)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงออกมา นำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) โดยใช้สมการที่ 4

$$k = s\ [(1- R\infty)^2\ /\ 2\ R\infty] \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) โดยใช้สมการที่ 5

$$ERIC = (k_{sheet}\ /\ k_{ink})\ 10^6 \quad (5)$$

โดย k_{sheet} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเยื่อหรือกระดาษที่มีหมึกรวมอยู่ด้วย

k_{ink} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของหมึก

8.6 <u>ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)</u>

คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ โดยใช้สมการที่ 6

$$\text{Tensile index} = \frac{\text{Tensile strength}}{\text{Basis weight}} \quad (6)$$

โดยมีหน่วยเป็น N m/g

8.7 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index)

คือ การวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ โดยใช้สมการที่ 7

$$\text{Tear index} = \frac{\text{Tearing strength}}{\text{Basis weight}} \qquad (7)$$

โดยมีหน่วยเป็น mN m^2/g

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารปริทรรศน์

Watanabe และคณะ (9) ได้ทำการศึกษาถึงการพัฒนาระบบ Wet-end ให้ดีขึ้นโดยใช้ CMC (Carboxymethyl-cellulose) จากการศึกษาพบว่าการใส่ CMC เติมลงไปในน้ำเยื่อจะช่วยให้สมบัติของกระดาษทางด้านการต้านทานน้ำ ดรรชนีความแข็งแรงในขณะเปียกและความแข็งแรงต่อแรงดึงดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ CMC ที่มีค่า D.S. (Degree of substitution) ต่ำลง ทั้งนี้เพราะว่า เมื่อค่า D.S. ของ CMC ต่ำลง ทำให้เส้นใยสามารถดูดซับ CMC ได้ดีขึ้น เนื่องจากการผลักกันทางไฟฟ้า (Electrical repulsion) ระหว่าง CMC และเส้นใยโดยรวมต่ำลง และจากการที่เส้นใยสามารถดูดซับ CMC ได้มากนั้น ส่งผลให้การกระจายตัวของประจุลบในระบบดีขึ้น ทำให้การกักเก็บสารเคมี อาทิเช่น สารเติมแต่ง สารกันซึม สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียกและแห้งดีขึ้น ส่งผลให้สารเคมีเหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Kim และคณะ (12,13) ได้ทำการศึกษาการดึงหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์โดยใช้เซลลูเลส โดยใช้ค่า pH เท่ากับ 4.7 ในการทดลองมีการใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ 2 ชนิด คือ หนังสือพิมพ์เก่าจากประเทศอเมริกาและหนังสือพิมพ์เก่าจากประเทศเกาหลีพบว่าเมื่อเติมเอนไซม์ลงไปเท่ากับร้อยละ 0.5 สามารถลดเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อลงได้เมื่อเทียบกับการไม่ใช้เอนไซม์ นอกจากนี้การเติมเอนไซม์ลงไปในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อยังช่วยลดขนาดของอนุภาคหมึกได้เมื่อใช้เวลาในการตีเยื่อเท่ากับกรณีที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ ในส่วนของค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ผลิตได้นั้น พบว่าเมื่อเติมเซลลูเลสลงไปในกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเล็กน้อย คือร้อยละ 0.1-0.15 ให้ค่าการเพิ่มของค่าความขาวสว่างสูงสุด โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูเลสให้มากขึ้น กลับไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความขาวสว่าง นอกจากนี้ยังพบว่ากระดาษหนังสือพิมพ์ต่างชนิดกันก็ยังให้ผลที่คล้ายกันด้วยคือ พบว่าปริมาณเอนไซม์ที่เติมลงไปเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าความขาวสว่างสูงที่สุด

Prasad และคณะ (14) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เอนไซม์ช่วยในการดึงหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยระบบออฟเซต โดยใช้ส่วนผสมของเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส ที่สภาวะ pH เท่ากับ 5.5 จากการทดลองพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้เอนไซม์ เนื่องจากเอนไซม์ที่เติมลงไปนั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยเล็ก ๆ ได้ดีกว่า ส่งผลให้ปริมาณของเส้นใยเล็ก ๆ นั้นน้อยลง เมื่อพื้นที่ผิวของเส้นใยทั้งระบบลดน้อยลงจึงทำให้มีค่าการระบายน้ำที่สูงขึ้น เพราะความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงนั่นเอง ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรงของเยื่อที่ผลิตได้พบว่าการใช้เอนไซม์ทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเส้นใยขนาดสั้นซึ่งมีพื้นที่ผิวมากถูกเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาไปเกือบหมด และคงเหลือปริมาณของเส้นใย

ขนาดยาวอยู่มากจึงทำให้ความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความขาวสว่างนั้นพบว่าการใช้เอนไซม์มีผลทำให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่ไม่ได้มีการใช้เอนไซม์

Zeyer และคณะ (15) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการดึงหมึก และได้เสนอข้อคิดเห็นเกี่ยวกับโมเดลการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่อเส้นใย ดังนี้คือ ในตอนแรกเส้นใยจะถูกปิดกั้นโดยชั้นของหมึกพิมพ์ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ แต่เมื่อมีแรงเสียดทานอันเกิดขึ้นมาจากการตีกระจายเยื่อหรือการผสมเยื่อจะทำให้เอนไซม์สามารถไปตัดพันธะได้ เพราะการตีกระจายเยื่อนั้นทำให้รูปแบบการยึดติดของหมึกบนเส้นใยบิดเบี้ยวไปและไปช่วยเปิดผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น เอนไซม์จึงสามารถตัดสายโซ่ของเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลสได้ และเมื่อเส้นใยถูกตัด อนุภาคของหมึกที่อยู่บนผิวหน้าของเส้นใยก็จะสามารถหลุดออกมาได้เพื่อถูกกำจัดออกจากระบบต่อไป

Welt และ Dinus (21) ได้สรุปความเป็นไปได้ของการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการดึงหมึกออกไว้คร่าว ๆ ดังนี้

1. เซลลูเลสอาจไปทำให้ผิวหน้าของเส้นใยแตกออกจนหมึกที่ผิวหน้าของเส้นใยสามารถหลุดออกมาได้

2. เอนไซม์อาจเข้าไปทำให้ผิวหน้าของเส้นใยเปลี่ยนเป็นสารตัวอื่นที่มีความแข็งแรงของพันธะต่ำลงด้วยวิธีการ Depolymerization ส่งผลให้หมึกสามารถหลุดออกมาได้ง่ายโดยการตีกระจายเยื่อ

3. เอนไซม์อาจเข้าไปลดความแข็งแรงของพันธะโดยการเอาเส้นใยเล็ก ๆ ที่บริเวณผิวหน้าของกระดาษออก จึงทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น

4. เฮมิเซลลูเลสอาจเข้าไปทำให้ลิกนิน (Lignin) ที่ผิวหน้าของเส้นใยหลุดออกมาพร้อมกับอนุภาคของหมึก โดยการทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นโครงสร้างซับซ้อนของลิกนินและส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต (Lignin carbohydrate complex) จึงทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น

5. มีความเป็นไปได้ที่เซลลูเลสจะเข้าไปลอกเส้นใยย่อย ๆ (Fibrils) จากผิวหน้าของเส้นใย จนทำให้หมึกหลุดออกมาพร้อมกับเส้นใยย่อย ๆ เหล่านี้ได้

6.เอนไซม์จะเข้าไปทำลายสายโซ่ของเซลลูโลสให้ผิดรูปไปที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใย ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำงานได้ง่ายขึ้น (ลักษณะเดียวกับข้อเสนอแนะของ Zeyer และคณะ)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

หมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมีขนาดอนุภาคของหมึกเล็กมาก ดังนั้นวิธีการดึงหมึกออกที่เหมาะสมควรเป็นวิธีการล้าง อย่างไรก็ตามการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างมีข้อเสียคือมีการใช้น้ำในปริมาณมาก นอกจากนี้ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้จากวิธีการล้างยังต่ำกว่าค่าปริมาณผลผลิตที่ได้จากวิธีการลอยฟองอากาศ เนื่องจากมีการสูญเสียเส้นใยบางส่วนออกมากับน้ำที่ล้างเยื่อ (22) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีความพยายามปรับเปลี่ยนมาใช้วิธีการดึงหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำออกโดยใช้วิธีการลอยฟองอากาศนั้น จะต้องเตรียมเยื่อโดยใช้ค่า pH ในช่วงที่เป็นกลางหรือเป็นกรดเพื่อป้องกันไม่ให้สารยึด ซึ่งในที่นี้คือ อะคริลิกเรซิน (Acrylic resins) สามารถละลายมากเกินไป เพราะจะทำให้อนุภาคหมึกมีขนาดเล็กมากและเกิดการกระจายตัวมากจนเกินไป นอกจากนี้การใช้ค่า pH ในสภาวะที่เป็นกรดยังช่วยให้เส้นใยสามารถดูดซับ CMC ได้ดีอีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้เอนไซม์ในการทดลองนี้จึงเป็นเอนไซม์ที่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เป็นกรดด้วยเช่นกัน

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาถึงผลของการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน ซึ่งตอนที่ 1 จะเป็นการศึกษาของปริมาณการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่เหมาะสม โดยจะทำการศึกษาการใช้ CMC ที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (O.D. weight) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 มาใช้ในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไป โดยในการทดลองตอนที่ 2 จะมี 3 ตัวแปรดังนี้คือ

1. ปริมาณการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ไม่ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเลย และใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1

2. ปริมาณการใช้เซลลูเลส โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ร้อยละ 0.1 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

3. เวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาหลังการตีกระจายเยื่อ โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ 10 และ 40 นาที

ในแต่การทดลองจะมีการทำการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะรวมกันทั้งสิ้น 2 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลไปคำนวณทางสถิติต่อไป

การทดลอง

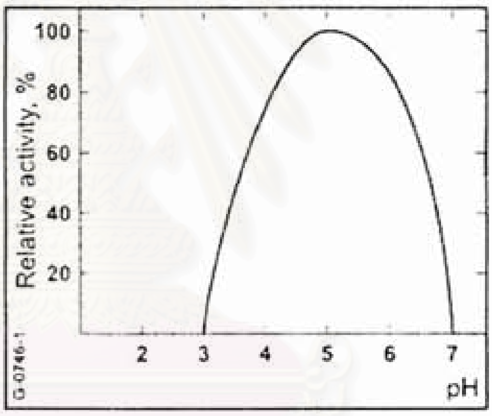
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1. กระดาษปอนด์ 60 แกรม บริษัท C.A.S. Paper จำกัด
2. หมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำสีดำ บริษัท Siegwerk (ประเทศไทย) จำกัด
3. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) : Niklacell CH 5 F บริษัท Sunolin จำกัด ประเทศออสเตรีย
4. เซลลูเลส (Cellulase enzyme) : Celluclast 1.5 L (novozymes) บริษัท The East Asiatic (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
5. สารลดแรงตึงผิว : Eka RF 4283 (Non-ionic surfactant) บริษัท Eka Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด
6. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) บริษัท LAB-SCAN จำกัด ประเทศโปแลนด์
7. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) ยี่ห้อ Formax รุ่น 450H บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell) ยี่ห้อ Voith รุ่น Delta 25 บริษัท Voith ประเทศเยอรมัน
9. เครื่องทำแผ่นกระดาษ (Sheet former) ยี่ห้อ PTI รุ่น RK-2A KWT บริษัท Paper Testing Association ประเทศออสเตรีย
10. เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness tester) ยี่ห้อ Regmed รุ่น CF/A บริษัท Regmed ประเทศบราซิล
11. เครื่องวัดความขาวสว่างและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Brightness & ERIC tester) ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color-Touch PC บริษัท Technidyne Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear tester) ยี่ห้อ ProTear Electronic Elmendorf Tear Tester บริษัท Thwing–Albert Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
13. เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester) ยี่ห้อ Strograph รุ่น E-S บริษัท Toyo Seiki Seisaku – Sho จำกัด ประเทศญี่ปุ่น
14. เครื่องชั่ง (Balance) ยี่ห้อ GX-30K บริษัท A&D Co.,Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
15. เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (Balance) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PM 2500 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

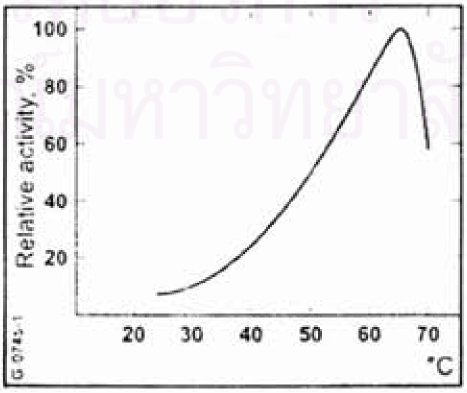
16. เครื่องหาความชื้นของกระดาษ (Moisture balance) ยี่ห้อ Kett รุ่น FD-600 บริษัท Kett Electric Laboratory ประเทศญี่ปุ่น
17. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมัน
18. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 98128 บริษัท Hanna Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา

ลักษณะของเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลอง (Celluclast 1.5 L)

Celluclast 1.5 L เป็นของเหลวสีน้ำตาล โดยใช้เชื้อราสายพันธุ์ Trichoderma reesei ในการเพาะเลี้ยงเอนไซม์ มีความถ่วงจำเพาะ 1.2 g/ml และมีกัมมันตภาพของเอนไซม์เป็น 700 EGU/g เมื่อ EGU คือตัวย่อของ Endo-Glucanase Units เพื่อแสดงกัมมันตภาพของเอนไซม์



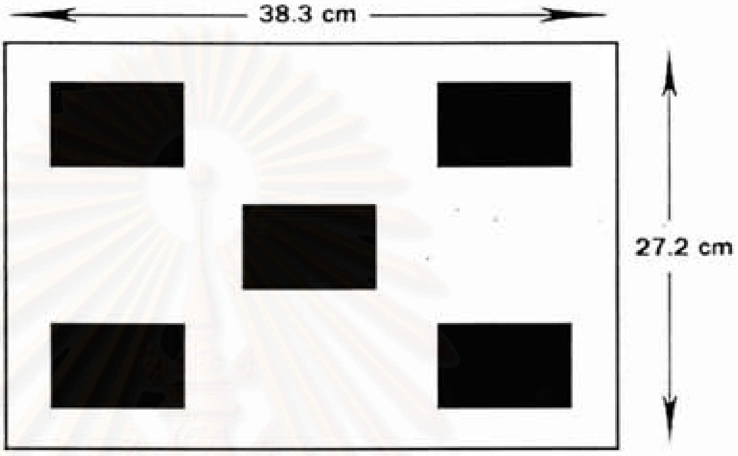
ภาพที่ 23 อิทธิพลของค่า pH ของกัมมันตภาพของเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 24 อิทธิพลของอุณหภูมิของกัมมันตภาพของเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 23 และภาพที่ 24 แสดงลักษณะเฉพาะของกัมมันตภาพของเอนไซม์ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ pH 4.8 ตามลำดับ โดยใช้ CMC เป็นสารตั้งต้นที่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่เอนไซม์สามารถทำงานได้ดี คือ pH 4.5-6.0 อุณหภูมิ 50–60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 25 รูปแบบตัวอย่างการพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นจากนำกระดาษปอนด์ที่มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร มาทำการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ โดยในการพิมพ์นั้นมีการควบคุมปริมาณของหมึกพิมพ์ โดยใช้รูปแบบตัวอย่างการพิมพ์ดังปรากฏในภาพที่ 23 ตลอดม้วนกระดาษ จากนั้นนำกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์มาแล้วมาหาค่าปริมาณหมึกพิมพ์ที่ครอบคลุมบริเวณผิวหน้ากระดาษ (Ink coverage) โดยการตัดกระดาษให้มีขนาดเท่า ๆ กัน มีปริมาณพื้นที่หมึกเท่ากันดังภาพที่ 25 และคำนวณเปรียบเทียบกับขนาดเท่ากันแต่ไม่มีหมึกพิมพ์อยู่ที่ผิวหน้ากระดาษ จากการคำนวณพบว่ากระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่า Ink coverage เท่ากับร้อยละ 1.43 (วิธีการคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ก) จากนั้นนำกระดาษที่ตัดเตรียมไว้แล้วซึ่งมีขนาด 27.2 x 38.3 ซ.ม. มาเก็บไว้ในห้องควบคุมสภาวะ

ในการทดลองในแต่ละสภาวะจะมีการใช้กระดาษ 250 กรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือใช้กระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้วในแต่ละการทดลองจำนวน 45 แผ่น (ขนาด 27.2 x 38.3 ซ.ม.) นำกระดาษที่เตรียมไว้มาตัดย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ และแช่น้ำทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัวและง่ายต่อการตีกระจายเป็นเยื่อ

หลังจากครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำกระดาษมาทำการตีกระจายเยื่อเพื่อแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย ก่อนที่จะนำเยื่อนั้นมาเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกออกโดยวิธีการลอย

ฟองอากาศ นำเยื่อที่ได้ทั้งในส่วนที่ผ่านการดึงหมึกออกแล้ว และไม่ผ่านการดึงหมึกออก มาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ CMC การใช้เซลลูเลส และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา โดยดรรชนีที่ใช้วัดประสิทธิภาพการดึงหมึก ได้แก่ ค่าสภาพระบายได้ ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ค่าความขาวสว่าง ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 : การหาปริมาณ CMC ที่เหมาะสม (ยังไม่ใช้เอนไซม์)

1. นำกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ มาทำการตีกระจายเยื่อก่อนที่จะนำไปดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยขั้นตอนในการเตรียมเยื่อมีดังนี้คือ

1.1 นำกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ มาตัดเป็นชิ้นโดยให้มีขนาดเท่า ๆ กัน (ประมาณ 2x2 ซม.) แล้วนำไปแช่น้ำที่ความเข้มข้นเยื่อร้อยละ 7 ปิดฝาทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัว ซึ่งจะช่วยให้การตีกระจายเยื่อทำได้ง่ายและดีขึ้น

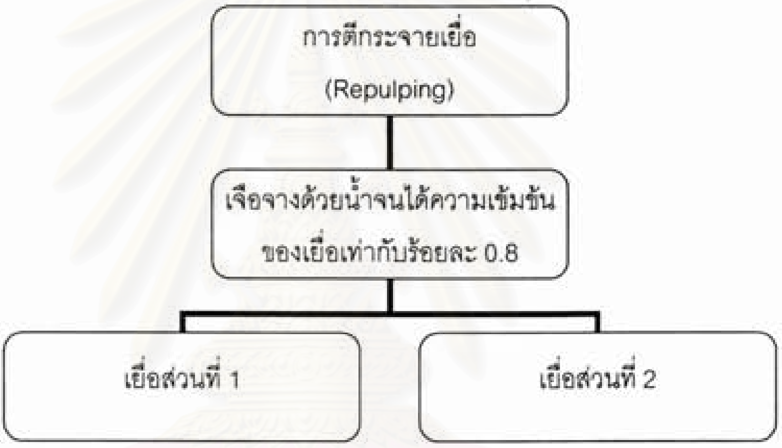
1.2 เมื่อครบเวลาในการแช่กระดาษตามที่กำหนดไว้ นำกระดาษนั้นมาตีกระจายเพื่อทำให้เป็นเยื่อและเพื่อให้อนุภาคของหมึกแยกตัวออกจากเส้นใย โดยใช้ความเข้มข้นของเยื่อในการตีกระจายเยื่อร้อยละ 7 เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อของเครื่อง 300 รอบต่อนาที ค่า pH 4.5 (กำหนดใช้ค่า pH 4.5 เนื่องจากในการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งมีการใช้เซลลูเลสนั้น จะยังใช้ค่า pH ค่านี้เช่นกัน เนื่องจากเซลลูเลสสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่ pH อยู่ในช่วง 4-5)

1.3 สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อได้แก่ สารลดแรงตึงผิว (Eka RF 4283) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และมีการใช้ CMC ปริมาณร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้งตามลำดับ โดยสารเคมีเหล่านี้ถูกใส่ลงไปพร้อมกันในเครื่องตีกระจายเยื่อ

1.4 ในระหว่างการตีกระจายเยื่อจะมีการหยุดเครื่องทุก ๆ 5 นาที เพื่อทำการคนเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อเพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษเกาะกันเป็นก้อน แต่หลังจากการตีกระจายเยื่อผ่านนาทีที่ 30 ไปแล้ว จะไม่มีการหยุดเครื่องและทำการตีกระจายเยื่อไปจนครบ 60 นาที

1.5 เมื่อตีกระจายเยื่อครบ 60 นาที เติมน้ำลงไป 1 ลิตร และปรับอุณหภูมิให้ถึง 90 องศาเซลเซียส ลดอัตราความเร็วในการตีกระจายเยื่อของเครื่องที่ 170 รอบต่อนาที เพื่อให้อุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อสามารถไต่ระดับสูงขึ้นจนถึง 90 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อถึง 90 องศาเซลเซียสแล้ว ให้หยุดเครื่องแต่ยังคงตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 5 นาที ทั้งนี้เพื่อเป็นการเลียนแบบการทำลองตอนที่ 2 ซึ่งมีการใช้เอนไซม์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีนั้น เป็นการหยุดการทำงานของเซลลูเลสนั่นเอง

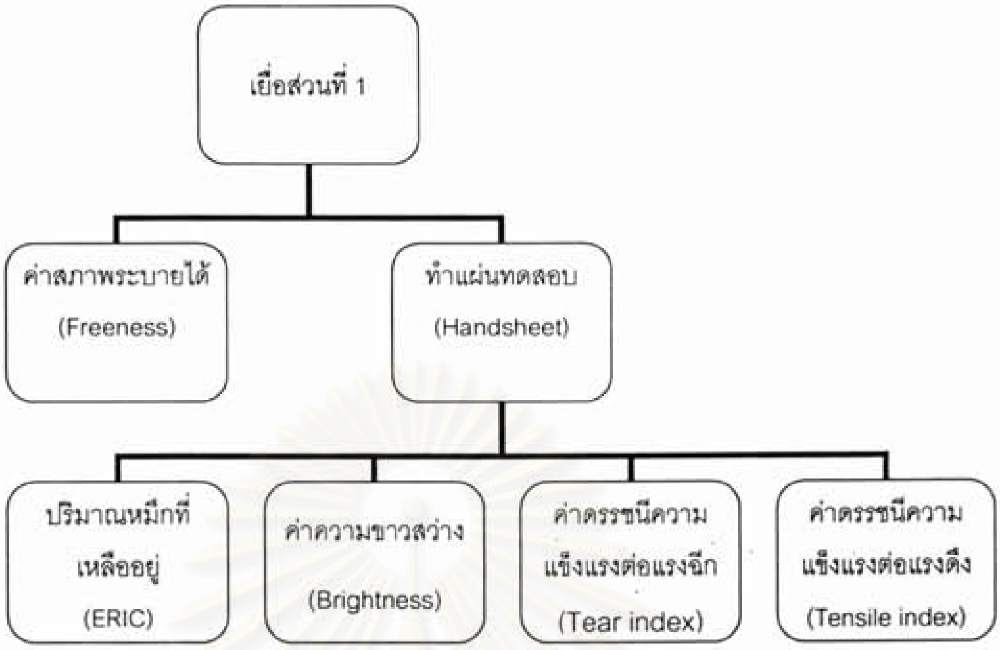
2. นำเยื่อที่ได้หลังจากขั้นตอนการตีกระจายเยื่อไปทำการเจือจางด้วยน้ำ ให้มีค่าความเข้มข้นของเยื่อเป็นร้อยละ 0.8 จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน (ภาพที่ 26)



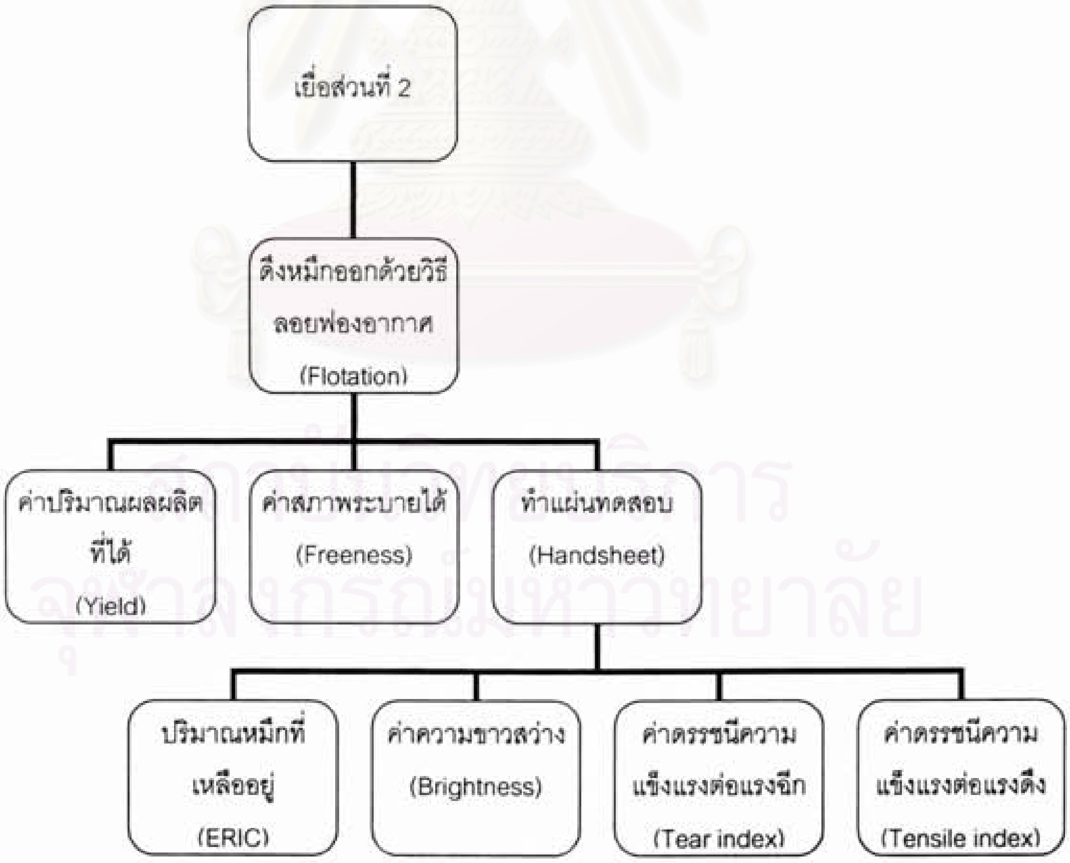
ภาพที่ 26 การเตรียมเยื่อก่อนเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกออก

2.1 นำเยื่อส่วนที่ 1 (ไม่ผ่านกระบวนการดึงหมึกออก) ไปวัดค่าสภาพระบายได้ และนำเยื่อส่วนที่เหลือไปทำแผ่นทดสอบขนาด 60 แกรม จำนวน 5 แผ่น เพื่อวัดปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (ภาพที่ 27)

2.2 นำเยื่อส่วนที่ 2 ไปเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของฟองอากาศ 3 ลิตรต่อนาที และใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ผ่านการดึงหมึกออกแล้วมาทำการวัดค่าสภาพระบายได้ คำนวณค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ และนำส่วนที่เหลือไปทำแผ่นทดสอบขนาด 60 แกรม จำนวน 5 แผ่น เพื่อวัดปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (ภาพที่ 28)



ภาพที่ 27 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 1



ภาพที่ 28 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งทั้ง 4 สภาวะ อันได้แก่ ไม่ใส่ CMC ใส่ CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ และนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย

4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้สถิติเพื่อตรวจสอบปริมาณ CMC ที่เหมาะสม เพื่อนำค่า CMC ที่ได้ไปใช้ในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไป

ตอนที่ 2 : ศึกษาผลของการใช้ CMC ร่วมกับเอนไซม์ ต่อประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก

1. นำกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมาทำการตีกระจายเยื่อเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของการใช้ CMC ร่วมกับการใช้เอนไซม์ในการดึงหมึกออก โดยคำนึงถึงเวลาที่ทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (Reaction time) หลังการตีเยื่อด้วย ดังนี้

ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองตอนที่ 2

ตัวแปร	ระดับต่ำ	ระดับสูง
ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	0	ค่าที่เหมาะสม (จากขั้นตอนที่ 1)
ปริมาณ Enzyme ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	0.1	0.3
Reaction time (หลังตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 60 นาที)	10 นาที	40 นาที

จากตารางที่ 4 จะได้การทดลองทั้งหมดเป็น 2^3 หรือ 8 สภาวะดังแสดงในตารางที่ 5 และในการทดลองตอนที่ 2 นี้จะใช้สภาวะในการตีกระจายเยื่อเหมือนตอนที่ 1 กล่าวคือใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที ค่า pH 4.5 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยหลังจากที่ตีกระจายเยื่อเป็นเวลา 60 นาทีและทิ้งให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจนครบกำหนดเวลาแล้ว จะมีการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1.1 นำกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ มาตัดเป็นชิ้นโดยให้มีขนาดเท่า ๆ กัน (ประมาณ 2x2 ซม.) แล้วนำไปแช่น้ำที่ความเข้มข้นเยื่อร้อยละ 7 ปิดฝาทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษอ่อนตัว ซึ่งจะช่วยให้การตีกระจายเยื่อทำได้ง่ายและดีขึ้น

1.2 นำกระดาษที่แช่น้ำที่ความเข้มข้นเยื่อร้อยละ 7 มาตีกระจายเพื่อทำให้เป็นเยื่อและเพื่อให้อนุภาคของหมึกแยกตัวออกจากเส้นใย โดยใช้ความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 7 เวลาในการตีกระจายเยื่อ 60 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อของเครื่อง 300 รอบต่อนาที และค่า pH 4.5

1.3 สารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารลดแรงตึงผิว (Eka RF 4283) ที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ในส่วนของ CMC และเซลลูเลสนั้น ให้ใส่ตามปริมาณค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5 ตามสภาวะการทดลองนั้น ๆ โดยสารเคมีทั้งหมดถูกใส่ลงไปพร้อมกันในเครื่องตีกระจายเยื่อ ยกเว้นเซลลูเลสซึ่งถูกใส่ลงไปหลังการตีเยื่อผ่านไปแล้ว 10 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าค่า pH ในเครื่องตีกระจายเยื่อมีค่าคงที่เท่ากับ 4.5 ซึ่งเป็นค่า pH ที่เซลลูเลสสามารถทำงานได้ดี (ในช่วง 10 นาทีแรกให้วัดค่า pH ทุก ๆ 1 นาที และทำการปรับค่า pH จนคงที่ก่อนที่จะเติมเอนไซม์)

1.4 ในระหว่างการตีกระจายเยื่อจะมีการหยุดเครื่องทุก ๆ 5 นาที เพื่อทำการคนเยื่อในเครื่องตีกระจายเยื่อป้องกันไม่ให้กระดาษเกาะกันเป็นก้อน แต่หลังจากการตีกระจายเยื่อผ่านนาทีที่ 30 ไปแล้ว จะไม่มีการหยุดเครื่องและทำการตีกระจายเยื่อไปจนครบ 60 นาที

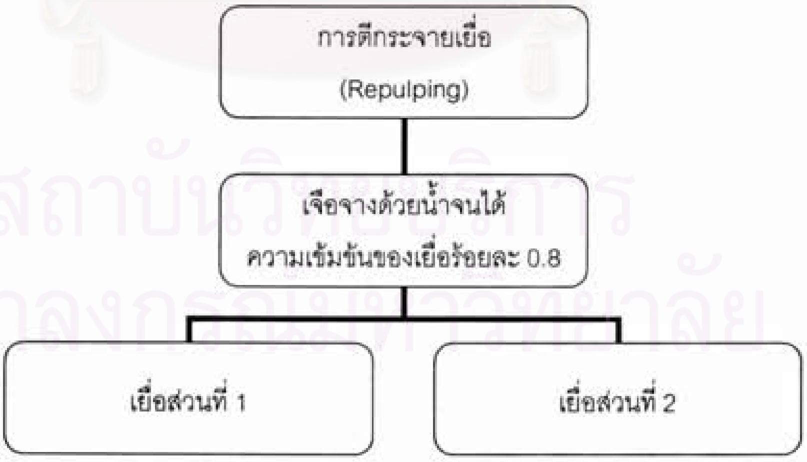
1.5 เมื่อตีกระจายเยื่อจนครบ 60 นาที ให้เติมน้ำลงไป 1 ลิตร และทำการปรับปรับอุณหภูมิให้เป็น 90 องศาเซลเซียส ลดอัตราในการตีกระจายเยื่อของเครื่องไปที่ 170 รอบต่อนาที เพื่อให้มั่นใจว่าอุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อสูงขึ้นจนเป็น 90 องศาเซลเซียส จากนั้นให้หยุดเครื่องแต่ยังคงตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์

2.นำเยื่อที่ได้หลังจากขั้นตอนการตีกระจายเยื่อไปทำการเจือจางด้วยน้ำให้มีค่าความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 0.8 จากนั้นแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน (ภาพที่ 29)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 การทดลองทั้ง 8 สภาวะในตอนที่ 2

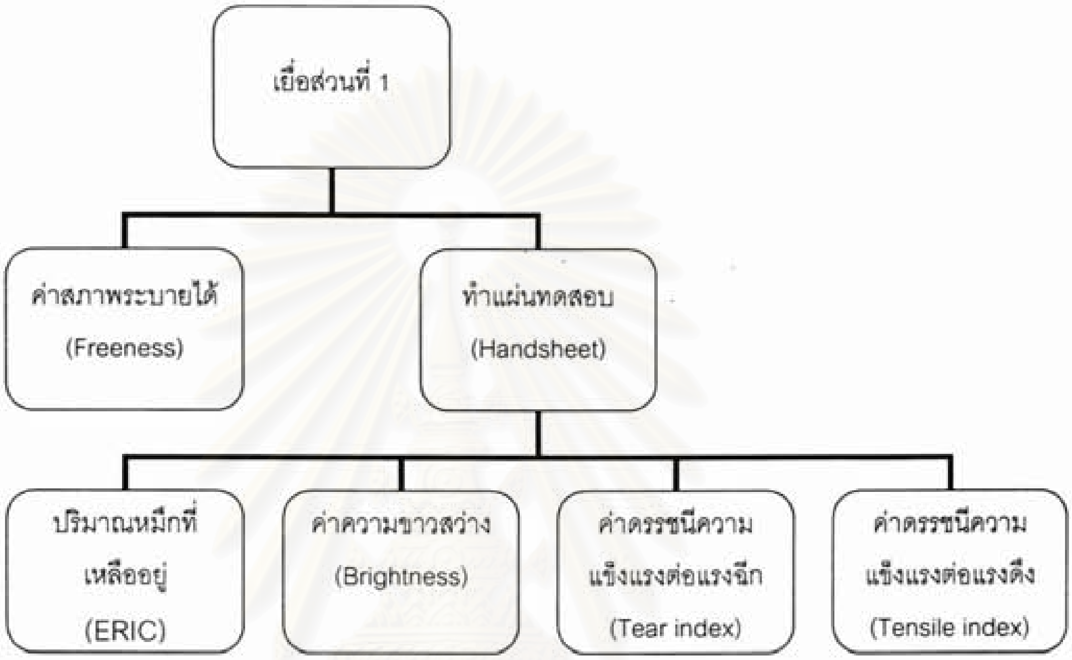
สภาวะ	ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ปริมาณ Enzyme ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	Reaction time หลังการตีกระจายเยื่อ (นาที)
1	0	0.1	10
2	0	0.1	40
3	0	0.3	10
4	0	0.3	40
5	ค่าที่เหมาะสม (จากขั้นตอนที่ 1)	0.1	10
6	ค่าที่เหมาะสม (จากขั้นตอนที่ 1)	0.1	40
7	ค่าที่เหมาะสม (จากขั้นตอนที่ 1)	0.3	10
8	ค่าที่เหมาะสม (จากขั้นตอนที่ 1)	0.3	40



ภาพที่ 29 การเตรียมเยื่อก่อนเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกออก (ตอนที่ 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 นำเยื่อส่วนที่ 1 (ไม่ผ่านกระบวนการดึงหมึกออก) ไปวัดค่าสภาพระบายได้ และนำเยื่อส่วนที่เหลือไปทำแผ่นทดสอบขนาด 60 แกรม จำนวน 5 แผ่น เพื่อวัดปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (ภาพที่ 30)

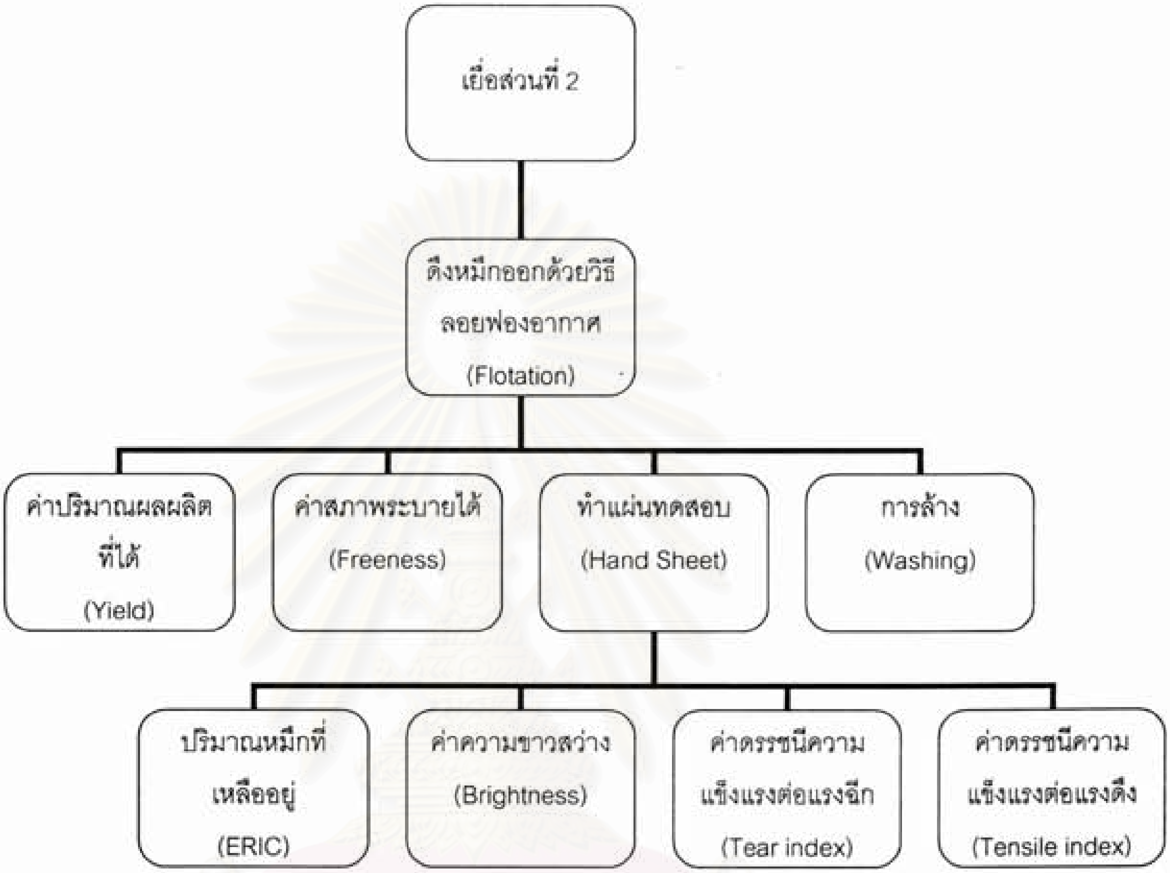


ภาพที่ 30 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 1 (ตอนที่ 2)

2.2 นำเยื่อส่วนที่ 2 ไปเข้าสู่กระบวนการดึงหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยใช้อัตราการไหลของฟองอากาศ 3 ลิตรต่อนาที และใช้เวลาในการลอยฟองอากาศ 10 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ผ่านการดึงหมึกออกแล้วมาทำการวัดค่าสภาพระบายได้ คำนวณค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ และนำไปทำแผ่นทดสอบขนาด 60 แกรม จำนวน 5 แผ่น เพื่อวัดปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง นำเยื่อส่วนที่เหลือไปทำการดึงหมึกออกต่อด้วยวิธีการล้าง (ภาพที่ 31)

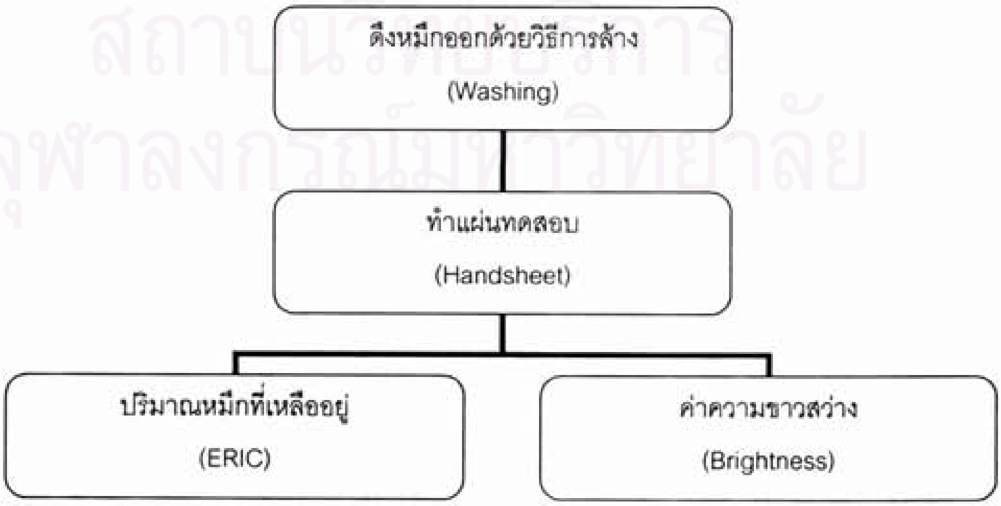
2.3 นำเยื่อส่วนที่เหลือจากการลอยฟองอากาศมาทำการล้าง โดยตักน้ำเยื่อมาจำนวน 40 กรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง ใส่ในถุงผ้าที่มีรูเปิดเป็นช่องเล็ก ๆ แล้วทำการล้างด้วยน้ำ 20 ลิตร พร้อมทั้งกวนเยื่อไปด้วยในขณะล้าง เมื่อน้ำที่ใช้ในการล้างไหลผ่านรูเปิดจนหมด ให้ทำการบีบน้ำที่เหลือออกจากเยื่อให้หมด จากนั้นนำเยื่อที่เหลือจากการล้างไปเจือจางด้วยน้ำ 5 ลิตร กวนให้เข้ากัน และนำน้ำเยื่อที่ได้ไปทำแผ่นทดสอบขนาด 60 แกรม จำนวน 5 แผ่น เพื่อวัด

ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ และค่าความขาวสว่าง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแผ่นทดสอบที่ได้หลังจากการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (ภาพที่ 32)



ภาพที่ 31 กระบวนการหลังการตีเยื่อของเยื่อส่วนที่ 2 (ตอนที่ 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 32 กระบวนการหลังการล้าง

3. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งทั้ง 8 สภาวะการทดลอง จากนั้นนำผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้สถิติต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. คำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศ โดยคำนวณจากปริมาณน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศและปริมาณน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาจากกระบวนการลอยฟองอากาศ

2. นำเยื่อส่วนที่ได้จากการดึงหมึกออกและเยื่อส่วนที่ไม่ได้ผ่านการดึงหมึกออกไปวัดค่าสภาพระบายได้ (มาตรฐาน TAPPI T-227) และนำไปทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน (มาตรฐาน ISO-5269/2)

3. นำแผ่นทดสอบทั้งหมด ไปวัดปริมาณของหมึกที่เหลืออยู่และค่าความขาวสว่าง โดยใช้เครื่อง Technidyne Color - Touch PC

3.1 ในการวัดปริมาณของหมึกที่เหลืออยู่และค่าความขาวสว่าง ทำการวัดด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นทดสอบ โดยวัดด้านละ 9 จุด ทั้งในแบบที่มีแผ่นทดสอบชนิดเดียวกันรองด้านหลังหลาย ๆ แผ่น และแบบที่รองด้านหลังแผ่นทดสอบด้วยวัตถุสีดำ

3.2 ปริมาณหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่ได้มาจากการวัดค่าการสะท้อนแสงในช่วงอินฟาเรด (IR) ที่ความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของหมึกจะมากกว่าค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของเส้นใยและองค์ประกอบอื่น ๆ

4. นำแผ่นทดสอบทั้งหมดไปวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก และความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามลำดับ

5. นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาว่าตัวแปรอันได้แก่ ปริมาณ CMC ที่ใช้ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา มีผลต่อประสิทธิภาพการดึงหมึกออกอย่างไร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

กระดาษตัวอย่างก่อนที่จะทำการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมีค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ค่าความขาวสว่าง ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง เป็นดังนี้

ตารางที่ 6 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ความขาวสว่าง ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกและดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษตัวอย่าง

สมบัติที่วัด	ค่าเฉลี่ยของกระดาษตัวอย่าง
ERIC	27.95 ±0.78
Brightness (%)	94.60 ±0.19
Tear index (mN m^2/g)	5.36 ±0.06
Tensile index (N m/g)	30.48 ±1.15

ผลการทดลองตอนที่ 1
การหาปริมาณ CMC ที่เหมาะสม (ยังไม่ใช้เอนไซม์)

การทดลองตอนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่เหมาะสม โดยจะทำการทดลองใช้ CMC ที่ปริมาณร้อยละ 0 ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งเมื่อหาค่าปริมาณ CMC ที่เหมาะสมได้แล้ว จะนำไปใช้ในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไปซึ่งเป็นการใช้ CMC ร่วมกับเซลลูเลส โดยจะทำการวิเคราะห์จากผลข้อมูลค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ความขาวสว่าง สภาพการระบายได้ ปริมาณผลผลิตที่ได้ ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง เพื่อพิจารณาเลือกใช้ปริมาณ CMC ที่เหมาะสม

ตารางที่ 7 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ค่าเฉลี่ย ERIC ก่อนดึงหมึกออก ±S.D.	ค่าเฉลี่ย ERIC หลังดึงหมึกออก ±S.D.
0	528.42 ±5.13	253.94 ±2.61
0.1	612.76 ±18.81	352.59 ±18.65
0.2	381.51 ±31.24	196.97 ±34.35
0.3	373.08 ±2.87	183.42 ±2.53

หมายเหตุ : ค่า ERIC ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่าเป็น 27.95 ±0.78

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 7 พบว่า การใช้ CMC มีผลทำให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อลดน้อยลงและเมื่อใช้ CMC เพิ่มขึ้น แนวโน้มของปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลงทั้งในส่วนของก่อนและหลังดึงหมึกออก ยกเว้นที่ปริมาณการใช้ CMC ร้อยละ 0.1 ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่า CMC ซึ่งให้ประจุลบไปเพิ่มประจุลบในระบบทำให้เส้นใยที่มีประจุลบเช่นเดียวกันมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้อนุภาคหมึกที่หลุดออกมาไม่ย้อนกลับไปติดที่เส้นใยและสามารถขจัดออกได้ง่ายในการลอยฟองอากาศ จึงส่งผลให้ค่าความขาวสว่างที่ได้เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก่อนการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	81929.3	3	27309.77	46.21593	0.00146	6.591382
Within Groups	2363.667	4	590.9167			
Total	84292.97	7				

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	35482.56	3	11827.52	16.71955	0.009972	6.591382
Within Groups	2829.627	4	707.4066			
Total	38312.19	7				

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติดังปรากฏในตารางที่ 8 และ 9 พบว่า ปริมาณ CMC ต่าง ๆ ที่เติมลงไปในแต่ละการทดลองนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ปริมาณ CMC มีผลกับค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ทั้งก่อนและหลังดึงหมึกพิมพ์ออก โดยดูจากค่า F ที่คำนวณได้ที่ค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit)

ตารางที่ 10 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อเมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ค่าเฉลี่ย Brightness ก่อนดึงหมึกออก (ร้อยละ) ±S.D.	ค่าเฉลี่ย Brightness หลังดึงหมึกออก (ร้อยละ) ±S.D.
0	66.29	76.05
	±0.25	±0.38
0.1	64.61	72.43
	±0.83	(±0.80)
0.2	72.54	80.48
	±1.19	±2.46
0.3	72.13	80.11
	±0.60	±0.90

หมายเหตุ : ค่า Brightness ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่าร้อยละ 94.60 ±0.19

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 10 พบว่า การใช้ CMC จะทำให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้ CMC ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นในกรณีที่ใช้ CMC ร้อยละ 0.1 นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าความขาวสว่างจะแปรผกผันกับปริมาณหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่ (ตารางที่ 7) กล่าวคือ หากมีปริมาณหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่มาก ก็จะส่งผลให้ได้ค่าความขาวสว่างมีค่าต่ำ และหากมีปริมาณหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่น้อยก็จะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมีค่าสูง อย่างไรก็ตามแม้ค่าความสว่างจะเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าน้อยลง จากการดึงหมึกออก และการใช้ CMC ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ แต่ค่าความขาวสว่างและค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ก็ไม่สามารถทำให้ได้ค่าเท่ากับกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์ และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติตามที่ปรากฏในตารางที่ 11 และ 12 พบว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลต่อค่าความขาวสว่างทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณซึ่งมีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit)

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่างก่อนการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	97.68025	3	32.56008	40.85459	0.001853	6.591382
Within Groups	3.1879	4	0.796975			
Total	100.8682	7				

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	86.57564	3	28.85855	10.1667	0.024208	6.591382
Within Groups	11.35415	4	2.838538			
Total	97.92979	7				

จากผลการทดลองเบื้องต้นเมื่อพิจารณาดูจากผลของการใช้ CMC ต่าง ๆ กันที่มีต่อค่าความขาวสว่างและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ทำให้คาดว่าค่าปริมาณ CMC ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ต่อในการทดลองตอนที่ 2 น่าจะเป็นปริมาณ CMC ร้อยละ 0.2 หรือ 0.3 อย่างไรก็ดีควรมีการพิจารณาสมบัติอื่น ๆ ของเยื่อที่ได้หลังจากการดึงหมึกออกด้วย ก่อนที่จะทำการเลือกค่า CMC ที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ตารางที่ 13 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ CMC ที่ใช้ (% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ค่าเฉลี่ย Freeness ก่อนดึงหมึกออก (ml)	ค่าเฉลี่ย Freeness หลังดึงหมึกออก (ml)	ค่า Freeness ที่ลดลง (ml)
0	428	390	38
0.1	414	385	29
0.2	402	392	10
0.3	409	400	9

จากผลการทดลองในตารางที่ 13 พบว่าค่าสภาพระบายได้หลังการดึงหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศในทุกการทดลองมีค่าลดลง นั่นเป็นเพราะว่าในกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศได้นำพาเอาเส้นใยขนาดยาวส่วนหนึ่งออกไปด้วย จึงทำให้ในระบบคงเหลือเส้นใยขนาดสั้นที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีกว่าเส้นใยขนาดยาวในปริมาณที่มากกว่า จึงส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้มีค่าลดลง

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้ก่อนการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	703.375	3	234.4583	3.12091	0.150169	6.591382
Within Groups	300.500	4	75.1250			
Total	1003.875	7				

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้หลังการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	217	3	72.33333	0.247929	0.85939	6.591382
Within Groups	1167	4	291.75			
Total	1384	7				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 14 และตารางที่ 15 วิเคราะห์ผลทางสถิติได้ว่า ปริมาณ CMC ที่เติมลงไปปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ในแต่ละการทดลองนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ CMC ไม่มีผลกับค่าสภาพระบายได้ทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกพิมพ์ออก โดยดูจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit) และสอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองที่ปรากฏในตารางที่ 13 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าสภาพระบายได้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อมีการใช้ CMC

ตารางที่ 16 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ค่าเฉลี่ย Yield (ร้อยละ)
0	90.44
0.1	90.04
0.2	91.48
0.3	91.08

จากผลการทดลองในตารางที่ 16 พบว่าค่าปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการดึงหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศในทุกการทดลองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 17 พบว่าปริมาณ CMC ที่ใช้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยดูจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit) กล่าวคือ CMC ไม่มีผลกับปริมาณผลผลิตที่ได้

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	2.489638	3	0.829879	1.492421	0.34451	6.591382
Within Groups	2.22425	4	0.556063			
Total	4.713888	7				

ตารางที่ 18 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ค่าเฉลี่ย Tear index ก่อนดึงหมึกออก (mN m^2/g) ±S.D.	ค่าเฉลี่ย Tear index หลังดึงหมึกออก (mN m^2/g) ±S.D.
0	3.06	3.49
	±0.09	±0.07
0.1	3.35	3.60
	±0.06	±0.10
0.2	3.58	3.77
	±0.10	±0.05
0.3	3.45	3.71
	±0.09	±0.07

หมายเหตุ : ค่า Tear index ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 5.36 ±0.06 mN m^2/g

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 18 พบว่า เมื่อใช้ CMC มีผลทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในส่วนของก่อนและหลังดึงหมึกออก ยกเว้นที่การใช้ปริมาณ CMC ร้อยละ 0.3 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อนำผลข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติปรากฏผลดังนี้ (ตารางที่ 19 และ 20)

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกก่อนการดึงหมึกออก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.293038	3	0.097679	200.3675	8.18E-05	6.591382
Within Groups	0.00195	4	0.000488			
Total	0.294988	7				

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.090938	3	0.030313	65.54054	0.00074	6.591382
Within Groups	0.00185	4	0.000462			
Total	0.092788	7				

จากตารางที่ 19 และตารางที่ 20 วิเคราะห์ผลทางสถิติได้ว่า ปริมาณ CMC ที่เติมลงไปปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 ในแต่ละการทดลองนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ CMC มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกพิมพ์ออก โดยดูจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit)

การที่ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ CMC นั้น อาจเป็นเพราะว่า CMC นั้นเป็นสารเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษอยู่แล้ว (Dry streng agent) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า CMC ซึ่งให้ประจุลบไปเพิ่มประจุลบในระบบ ทำให้เส้นใยที่มีประจุลบเช่นเดียวกันมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น การเกิดเป็นแผ่นกระดาษดีขึ้น และทำเส้นใยสามารถสร้างพันธะต่อกันได้ดี จึงส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ได้จากการใส่ CMC มีค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มมากขึ้น แต่ทว่าการเติม CMC ร้อยละ 0.3 ทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า CMC ไปเพิ่มประจุลบในระบบมากจนเกินไป จึงทำให้เส้นใยที่เป็นประจุลบอยู่แล้วมีการผลักกันมากจนเกินไป จึงส่งผลให้ความสามารถในการสร้างพันธะต่อกันของเส้นใยลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 21 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) เมื่อใช้ CMC ปริมาณต่าง ๆ กัน

ปริมาณ CMC ที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	ค่าเฉลี่ย Tensile index ก่อนดึงหมึกออก (N m/g) ±S.D.	ค่าเฉลี่ย Tensile index หลังดึงหมึกออก (N m/g) ±S.D.
0	17.14	18.01
	±0.47	±0.16
0.1	17.39	19.52
	±0.27	±0.34
0.2	18.50	20.34
	±0.64	±0.35
0.3	17.98	20.09
	±0.58	±0.24

หมายเหตุ : ค่า Tensile index ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 30.48 ±1.15 N m/g

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 21 พบว่าเมื่อใช้ CMC มีผลทำให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในส่วนของก่อนและหลังการดึงหมึกออก ยกเว้นที่การใช้ปริมาณ CMC ร้อยละ 0.3 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อนำผลข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติปรากฏผลดังนี้ (ตารางที่ 22 และ 23)

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	2.24465	3	0.748217	4.524364	0.089428	6.591382
Within Groups	0.6615	4	0.165375			
Total	2.90615	7				

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการดึงหมึกออก

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	6.5226	3	2.1742	116.5791	0.000239	6.591382
Within Groups	0.0746	4	0.01865			
Total	6.5972	7				

จากตารางที่ 22 ซึ่งแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ CMC ไม่มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนการดึงหมึกออก โดยดูจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit) เมื่อใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อย่างไรก็ดีหากใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 จะพบว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนการดึงหมึกออกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า P-value เท่ากับ 0.089428) ในขณะที่จากตารางที่ 23 วิเคราะห์ผลทางสถิติได้ว่า ปริมาณ CMC ที่เติมลงไปในแต่ละการทดลองนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ CMC มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการดึงหมึกพิมพ์ออก โดยดูจากค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า F ที่ได้จากตาราง (F crit) การที่ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใส่ CMC เข้าไปในระบบนั้นอาจเป็นเพราะด้วยเหตุผลเดียวกับที่อธิบายไว้ในกรณีของค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกนั่นเอง

โดยสรุป จากผลการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่เหมาะสม โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) หรือกล่าวได้ว่า ใช้ผลการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เป็นตัวตัดสินใจ โดยทำการวิเคราะห์จากผลข้อมูลค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ความขาวสว่าง สภาพการระบายได้ ปริมาณผลผลิตที่ได้ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ซึ่งผลที่ได้พบว่าการใช้ปริมาณ CMC มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อที่ได้กล่าวไปข้างต้น และจากการพิจารณาผลการทดลองที่ปรากฏพบว่าปริมาณ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ทดลองในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไป

ผลการทดลองตอนที่ 2

ผลของการใช้ CMC ร่วมกับเอนไซม์ ต่อประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก

ในการทดลองตอนที่ 2 นั้นเป็นการศึกษาตัวแปรที่มีผลกับประสิทธิภาพการดึงหมึกออก โดยศึกษาจาก 3 ตัวแปรคือ ปริมาณ CMC ที่เติมลงไป ปริมาณเอนไซม์ที่เติมลงไป และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้หลังการตีกระจายเยื่อเพื่อให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ในแต่ละตัวแปรจะใช้ค่าที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือที่ระดับต่ำและระดับสูง ซึ่งค่าที่ใช้ในระดับต่ำคือ ไม่ใช้ CMC เลย ใช้ปริมาณเซลลูเลสร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา 10 นาที ในขณะที่ค่าที่ใช้ในระดับสูง คือใช้ปริมาณ CMC ร้อยละ 0.2 ปริมาณเซลลูเลสร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา 40 นาที (ตารางที่ 24) โดยทำการทดลองในภาวะที่เป็นกรด (pH 4.5-5.0) เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคของหมึกที่ติดอยู่กับ Binders (Acrylic resins) เกิดการกระจายตัว และที่ค่าภาวะเดียวกันนี้ เซลลูเลสสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ตารางที่ 24 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2

ชนิดของตัวแปร	ระดับต่ำ	ระดับสูง
ปริมาณ CMC (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	0	0.2
ปริมาณเซลลูเลส (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)	0.1	0.3
ระยะเวลาพักเยื่อ (นาที)	10	40

การวิเคราะห์ผลในแต่ละการทดลองนั้นใช้การวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ANOVA) โดยใช้ค่า P-value อ้างอิงกับที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) กล่าวคือจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้าค่า P-value มากกว่า α และปฏิเสธถ้าค่า P-value เท่ากับหรือน้อยกว่า α โดยที่สมมติฐานหลักคือ การใช้ตัวแปร 3 ตัวแปร ทั้ง 2 ระดับ ส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อ ค่าความขาวสว่าง สภาพการระบายได้ ปริมาณผลผลิตที่ได้ ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง มีค่าเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าตัวแปรทั้งสามไม่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อนั่นเอง

ตารางที่ 25 เป็นตารางที่สรุปภาพรวมของค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ (สามารถดูรายละเอียดตารางวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ANOVA) ได้จากภาคผนวก ข) โดย A คือปริมาณการใช้ CMC, B คือปริมาณการใช้เซลลูเลสและ C คือระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้

เอนไซม์ทำปฏิกิริยา, A*B, A*C และ B*C คือปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัว (2-way interaction) และ A*B*C คือปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามตัว (3-way interaction) สำหรับเครื่องหมายบวก (+) และลบ (-) ที่ปรากฏอยู่ในตารางนั้นเป็นการบอกให้ทราบว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อสมบัติของเยื่อที่พิจารณาอย่างไร อาทิเช่น หากเป็นบวก ก็หมายความว่าถ้าเพิ่มตัวแปรนั้นสมบัติของเยื่อก็จะเพิ่มตามด้วย แต่ถ้าเป็นลบ ก็หมายความว่าการเพิ่มตัวแปรนั้นกลับส่งผลให้สมบัติดังกล่าวมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 25 ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์	A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C
ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	0.000	0.000	0.000	0.451	0.000	0.066	0.199
ก่อนดึงหมึกออก	-	-	-	-	-	-	+
ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.172	0.136
หลังดึงหมึกออก	-	-	-	+	+	+	-
ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000	0.001
หลังการล้าง	-	-	-	+	+	+	+
ค่าความขาวสว่าง	0.000	0.221	0.009	0.254	0.776	0.836	0.204
ก่อนดึงหมึกออก	+	-	+	+	-	-	-
ค่าความขาวสว่าง	0.000	0.017	0.002	0.014	0.254	0.053	0.888
หลังดึงหมึกออก	+	+	+	-	-	-	-
ค่าความขาวสว่าง	0.000	0.002	0.000	0.001	0.056	0.028	0.411
หลังการล้าง	+	+	+	-	-	-	-
สภาพระบายได้	0.123	0.000	0.388	0.000	0.001	0.870	0.974
ก่อนดึงหมึกออก	-	+	+	-	-	-	+

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 25 (ต่อ)

สมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์	A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C
สภาพระบายได้หลังดึงหมึกออก	0.000 -	0.000 +	0.694 -	0.000 -	0.076 -	0.557 -	0.337 -
ปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการลอยฟองอากาศ	0.598 +	0.173 +	0.632 +	0.843 +	0.824 -	0.372 -	0.342 +
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกก่อนดึงหมึกออก	0.000 +	0.002 +	0.120 -	0.061 +	0.020 +	0.779 +	0.185 +
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังดึงหมึกออก	0.000 +	0.000 +	0.010 -	0.001 +	0.000 +	0.362 +	0.233 +
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนดึงหมึกออก	0.000 +	0.000 +	0.000 -	0.000 -	0.003 +	0.002 +	0.000 +
ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังดึงหมึกออก	0.000 +	0.000 +	0.000 -	0.000 -	0.000 +	0.812 -	0.000 +

A คือผลจากการใช้ CMC

B คือผลจากการใช้เซลลูเลส

C คือผลจากระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา

A*B คือผลของปฏิสัมพันธ์จากการใช้ CMC และเซลลูเลส

A*C คือผลของปฏิสัมพันธ์จากการใช้ CMC และเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา

B*C คือผลของปฏิสัมพันธ์จากการใช้เซลลูเลส และเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา

A*B*C คือผลของปฏิสัมพันธ์จากการใช้ CMC การใช้เซลลูเลส และเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องหมายลบ (-) คือผลที่ได้จะแปรผกผันกับการใช้ตัวแปรนั้น ๆ ในเชิงลบ

เครื่องหมายบวก (+) คือผลที่ได้จะแปรผันตรงกับการใช้ตัวแปรนั้น ๆ ในเชิงบวก

ตารางที่ 26 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย ERIC ก่อนดึงหมึกออก ±S.D.
1	0	0.1	10	390.71 ±2.54
2	0	0.1	40	365.98 ±0.32
3	0	0.3	10	385.00(±0.98
4	0	0.3	40	354.64 ±1.04
5	0.2	0.1	10	335.17 ±0.53
6	0.2	0.1	40	298.35 ±0.70
7	0.2	0.3	10	325.95 ±1.61
8	0.2	0.3	40	287.84 ±0.78

หมายเหตุ : ค่า ERIC ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 27.95 ±0.78

จากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก่อนดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผกผันกับการใช้ CMC กล่าวคือ หากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 26 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8)

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 26 พบว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็น 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า

P-value เท่ากับ 0.000 และค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าแปรผกผันกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเซลลูเลสไปช่วยทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสของเส้นใย ทำให้อนุภาคของหมึกที่ติดอยู่บนผิวหน้าของเส้นใย สามารถหลุดออกมาได้มากขึ้น

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 26 พบว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6 และลำดับการทดลองที่ 7 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าแปรผกผันกับระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง

ผลของปฏิสัมพันธ์จากการใช้ CMC และเซลลูเลส (A*B) ปฏิสัมพันธ์จากการใช้เซลลูเลสและเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (B*C) และปฏิสัมพันธ์จากการใช้ทั้ง 3 ตัวแปร (A*B*C) พบว่ามีค่า P-value มากกว่า α ($\alpha = 0.05$) จึงถือว่าปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรดังที่กล่าวมาไม่มีผลกับค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ อย่างไรก็ตามจากผลวิเคราะห์ทางสถิติจากตารางที่ 25 พบว่าปฏิสัมพันธ์จากการใช้ CMC และเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา (A*C) มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และมีค่าแปรผกผันกับปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นร่วมกับใช้เวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเวลาที่นานมากขึ้นทำให้เซลลูเลสสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยและช่วยให้หมึกหลุดออกจากเส้นใยได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาผลทางสถิตินั้นส่วนมากแล้วจะพิจารณาจากผลที่เกิดจากตัวแปรเดี่ยวเป็นหลักมากกว่าการพิจารณาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 27 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย ERIC หลังดึงหมึกออก ±S.D.
1	0	0.1	10	260.77 ±2.54
2	0	0.1	40	226.97 ±0.62
3	0	0.3	10	240.03 ±0.26
4	0	0.3	40	210.42 ±0.76
5	0.2	0.1	10	190.27 ±0.60
6	0.2	0.1	40	174.41 ±0.39
7	0.2	0.3	10	178.18 ±0.55
8	0.2	0.3	40	162.11 ±0.29

หมายเหตุ : ค่า ERIC ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 27.95 ±0.78

ผลจากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผกผันกับการใช้ CMC กล่าวคือ หากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 27 โดยเปรียบเทียบจากการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8)

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 27 พบว่าค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็น 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าแปรผกผันกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลูเลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 27 พบว่า ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6 และลำดับการทดลองที่ 7 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าแปรผกผันกับระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองรวมถึงผลการวิเคราะห์ทางสถิติทำให้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่า ปริมาณ CMC และเซลลูเลสที่ใช้ รวมถึงระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อทั้งในส่วนของก่อนการดึงหมึกและหลังการดึงหมึกออก กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณ CMC และเซลลูเลส รวมถึงใช้ระยะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้สามารถดึงหมึกออกได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลือตกค้างอยู่ในเยื่อมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 28 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างก่อนดึงหมึกออก (ร้อยละ) ±S.D.
1	0	0.1	10	73.31 ±0.93
2	0	0.1	40	74.09 ±0.70
3	0	0.3	10	72.16 ±0.35
4	0	0.3	40	73.66 ±0.61
5	0.2	0.1	10	75.04 ±0.29
6	0.2	0.1	40	76.50 ±0.36
7	0.2	0.3	10	75.51 ±0.39
8	0.2	0.3	40	75.97 ±0.09

หมายเหตุ : ค่า Brightness ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่าร้อยละ 94.60 ±0.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลจากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าความขาวสว่างก่อนดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผันตรงกับการใช้ CMC กล่าวคือหากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 28 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7, และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8)

ผลของการใช้เซลลูเลสจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ตารางที่ 25) พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.221 ซึ่งมีค่ามากกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ไม่มีผลกับค่าความขาวสว่างก่อนการดึงหมึกออก และเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้ดังที่แสดงในตารางที่ 28 จะเห็นได้ว่าการใช้ปริมาณเซลลูเลสมากขึ้น ส่วนใหญ่แล้วส่งผลให้ค่าความขาวสว่างก่อนดึงหมึกออกมีค่าลดลงแต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่าที่ลดลงมากที่สุดคือร้อยละ 1.15 เท่านั้น โดยเปรียบเทียบระหว่างลำดับการทดลองที่ 1 และลำดับการทดลองที่ 3 ซึ่งผลทางสถิติชี้ให้เห็นว่าตัวเลขดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

อย่างไรก็ตามผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 28 พบว่าค่าความขาวสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6 และลำดับการทดลองที่ 7 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.009 และค่าความขาวสว่างมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างก่อนการดึงหมึกออกเพิ่มสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 29 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างก่อนดึงหมึกออก (ร้อยละ) ±S.D.
1	0	0.1	10	75.98 ±0.75
2	0	0.1	40	78.07 ±0.32
3	0	0.3	10	78.18 ±0.47
4	0	0.3	40	79.13 ±0.36
5	0.2	0.1	10	80.51 ±0.61
6	0.2	0.1	40	82.02 ±0.13
7	0.2	0.3	10	81.11 ±0.24
8	0.2	0.3	40	81.33 ±0.24

หมายเหตุ : ค่า Brightness ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่าร้อยละ 94.60 ±0.19

ผลจากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผันตรงกับการใช้ CMC กล่าวคือหากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 29 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8)

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 29 พบว่าค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4 และลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.017 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) และค่าความขาวสว่างมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 29 พบว่าค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6 และลำดับการทดลองที่ 7 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.002 ซึ่งแสดงว่าระยะเวลามีผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออกมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออกเพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าตัวแปรทั้ง 3 อันได้แก่ ปริมาณ CMC และเซลลูเลสที่ใช้ รวมทั้งระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ล้วนมีผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออก โดยหากค่าตัวแปรทั้งสามมีแนวโน้มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า CMC ทำให้อนุภาคของหมึกย้อนกลับมาติดที่เส้นใยได้น้อยลง การใช้เซลลูเลสทำให้อนุภาคหมึกหลุดออกจากเส้นใยได้มากขึ้น ส่งผลให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างมากขึ้น

ตารางที่ 30 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย Freeness ก่อนดึงหมึกออก (ml)	ค่าเฉลี่ย Freeness หลังดึงหมึกออก (ml)	ค่า Freeness ที่เพิ่มขึ้น (ml)
1	0	0.1	10	440	471	31
2	0	0.1	40	462	474	12
3	0	0.3	10	507	541	34
4	0	0.3	40	528	546	18
5	0.2	0.1	10	475	484	9
6	0.2	0.1	40	461	482	21
7	0.2	0.3	10	495	507	12
8	0.2	0.3	40	480	497	17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลจากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.123 ซึ่งมีค่ามากกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้ไม่มีผลกับค่าสภาพระบายได้ก่อนการดึงหมึกออก แต่ภายหลังการดึงหมึกออกแล้วพบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α และผลที่ได้แปรผกผันกับการใช้ CMC กล่าวคือหากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้หลังการดึงหมึกออกมีค่าลดลง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้ไม่สอดคล้องกับการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งพบว่าปริมาณการใช้ CMC ไม่มีผลต่อสภาพระบายได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าในการทดลองตอนที่ 1 นั้น ค่าสภาพระบายได้หลังการดึงหมึกออกจะมีค่าน้อยลง เนื่องจากในกระบวนการดึงหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศนั้นได้นำเส้นใยที่มีขนาดยาวส่วนหนึ่งออกมาด้วย แต่ในการทดลองตอนที่ 2 นั้นมีเอนไซม์ในการทดลองด้วย และจากการทดลองพบว่าค่าสภาพระบายได้หลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้นกลับมีค่ามากขึ้น และเมื่อมองในภาพรวมของค่าสภาพระบายได้ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 เปรียบเทียบกับการทดลองตอนที่ 2 ก็พบว่าค่าสภาพระบายได้ในการทดลองตอนที่ 2 ในทุกภาวะการทดลองจะมีค่าสูงกว่าการทดลองตอนที่ 1 ทั้งหมด นั่นหมายความว่าการใช้เอนไซม์ทำให้เส้นใยที่มีขนาดสั้นในระบบลดน้อยลง ทำให้โดยภาพรวมในระบบมีเส้นใยขนาดกลางและยาวมากขึ้น ค่าสภาพระบายได้จึงมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 30 พบว่าค่าสภาพระบายได้ทั้งในกรณีก่อนการดึงหมึกออกและหลังการดึงหมึกออกมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value ของสภาพระบายได้ก่อนการดึงหมึกออกเท่ากับ 0.000 และค่า P-values ของสภาพระบายได้ก่อนหลังดึงหมึกออกเท่ากับ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) และค่าสภาพระบายได้มีค่าแปรผันตรงกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้เพิ่มสูงขึ้นด้วย อาจเป็นเพราะว่าเอนไซม์ที่เติมลงไปนั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยเล็ก ๆ ได้ดีกว่า ส่งผลให้ปริมาณของเส้นใยเล็ก ๆ นั้นน้อยลง เมื่อพื้นที่ผิวของเส้นใยทั้งระบบลดน้อยลง จึงทำให้มีค่าสภาพระบายได้ที่สูงขึ้น เพราะความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงนั่นเอง

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาพบว่า ผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value ของสภาพระบายได้ก่อนดึงหมึกออกเท่ากับ 0.388 และ ค่า P-value ของสภาพระบายได้หลังดึงหมึกออกเท่ากับ 0.694 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า α

(α = 0.05) นั่นแสดงว่าระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ไม่มีผลกับค่าสภาพระบายได้ทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออก

อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 30 พบว่าค่าสภาพระบายได้ภายหลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติในโรงงานผลิตเยื่อค่าสภาพระบายได้ที่เพิ่มขึ้น 9 – 34 ml ถือว่ามีค่าน้อยมาก และไม่มีผลกับคุณภาพของเยื่อที่ได้

ตารางที่ 31 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตที่ได้ (ร้อยละ)
1	0	0.1	10	89.95
2	0	0.1	40	90.48
3	0	0.3	10	90.59
4	0	0.3	40	90.35
5	0.2	0.1	10	90.26
6	0.2	0.1	40	90.30
7	0.2	0.3	10	90.58
8	0.2	0.3	40	90.65

จากตารางที่ 31 พบว่าค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ในแต่ละการทดลองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.598 ผลจากการใช้เซลลูเลสมีค่า P-value เท่ากับ 0.173 และผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยามีค่า P-value เท่ากับ 0.632 ซึ่งค่า P-value มีค่ามากกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่า 3 ตัวแปรหลักไม่มีผลกับค่าปริมาณผลผลิตที่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 32 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย Tear index ก่อนดึงหมึกออก ($mN\ m^2/g$) ±S.D.
1	0	0.1	10	3.64 ±0.09
2	0	0.1	40	3.58 ±0.07
3	0	0.3	10	3.70 ±0.07
4	0	0.3	40	3.60 ±0.08
5	0.2	0.1	10	3.91 ±0.07
6	0.2	0.1	40	3.90 ±0.08
7	0.2	0.3	10	4.00 ±0.09
8	0.2	0.3	40	4.05 ±0.10

หมายเหตุ : Tear index ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 5.36 ±0.06 $mN\ m^2/g$

จากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกก่อนดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผันตรงกับการใช้ CMC กล่าวคือหากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 32 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8)

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 32 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.002 และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลูเลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มสูงขึ้น

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 32 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4 และลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6) อย่างไรก็ตามจากผลทางสถิติในตารางที่ 25 ซึ่งค่า P-value ของระยะเวลามีค่าเท่ากับ 0.120 ซึ่งค่า P-value มากกว่า α (α = 0.05) จึงถือว่าผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาไม่มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ตารางที่ 33 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย Tear index หลังดึงหมึกออก (mN m^2/g) ±S.D.
1	0	0.1	10	3.75 ±0.08
2	0	0.1	40	3.63 ±0.08
3	0	0.3	10	3.80 ±0.10
4	0	0.3	40	3.66 ±0.06
5	0.2	0.1	10	4.10 ±0.07
6	0.2	0.1	40	4.10 ±0.08
7	0.2	0.3	10	4.25 ±0.07
8	0.2	0.3	40	4.32 ±0.09

หมายเหตุ : Tear index ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 5.36 ±0.06 mN m^2/g

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผันตรงกับการใช้ CMC กล่าวคือหากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 33 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับ

การทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) การใช้ปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้สิ่งที่พบสอดคล้องกับผลการทดลองตอนที่ 1 และสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในการทดลองตอนที่ 1 กล่าวคือ CMC นั้นปกติใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษอยู่แล้ว และนอกจากนี้การใช้ CMC ซึ่งมีประจุลบจึงทำให้เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น การฟอร์มเป็นแผ่นกระดาษดีขึ้น ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากขึ้น

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 33 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเซลลูเลสจะเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยที่มีขนาดสั้นก่อน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวโดยรวมให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาได้มากกว่า ส่งผลให้ระบบเหลือเส้นใยที่มีความยาวโดยเฉลี่ยสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกจึงเพิ่มขึ้น

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 33 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2 และลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4) และจากผลทางสถิติในตารางที่ 25 มีค่า P-value เท่ากับ 0.010 ซึ่งค่า P-value น้อยกว่ากว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยามีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังการดึงหมึกออกอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าแปรผกผันกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก กล่าวคือการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังการดึงหมึกออกลดลง การที่ระยะเวลาที่พักเยื่อนานขึ้นมีแนวโน้มส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการทิ้งให้เซลลูเลสทำปฏิกิริยากับเส้นใยนานเกินไป อาจทำให้เกิดการย่อยสลายของเซลลูโลส (Cellulose degradation) มากขึ้นจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยโดยรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลานานมากขึ้น

ตารางที่ 34 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย Tensile index ก่อนดึงหมึกออก (N m/g) ±S.D.
1	0	0.1	10	18.23 ±0.15
2	0	0.1	40	18.02 ±0.06
3	0	0.3	10	19.51 ±0.11
4	0	0.3	40	19.20 ±0.08
5	0.2	0.1	10	20.37 ±0.24
6	0.2	0.1	40	20.05 ±0.14
7	0.2	0.3	10	21.05 ±0.17
8	0.2	0.3	40	21.23 ±0.09

หมายเหตุ : Tensile index ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 30.48 ±1.15 N m/g

จากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผันตรงกับการใช้ CMC กล่าวคือ หากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 34 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8)

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 34 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลูเลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 34 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4 และลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6) และจากผลทางสถิติในตารางที่ 25 มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าแปรผกผันกับระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่อใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง

ตารางที่ 35 ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย Tensile index หลังดึงหมึกออก (N m/g) ±S.D.
1	0	0.1	10	20.33 ±0.06
2	0	0.1	40	20.03 ±0.09
3	0	0.3	10	21.24 ±0.11
4	0	0.3	40	20.62 ±0.05
5	0.2	0.1	10	22.15 ±0.09
6	0.2	0.1	40	22.05 ±0.15
7	0.2	0.3	10	22.22 ±0.11
8	0.2	0.3	40	22.43 ±0.12

หมายเหตุ : Tensile index ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 30.48 ±1.15 N m/g

จากตารางที่ 25 พบว่าผลจากการใช้ CMC มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (α = 0.05) นั่นแสดงว่าปริมาณ CMC ที่ใช้มีผลกับค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังดึงหมึกออก และผลที่ได้แปรผันตรงกับการใช้ CMC กล่าวคือหากมีการใช้ CMC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 35 โดยเปรียบเทียบระหว่างการที่ไม่ใช้ CMC กับการใช้ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 5, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับ ลำดับการทดลองที่ 6, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7

และลำดับการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) การใช้ปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจสามารถอธิบายโดยใช้หลักการเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนอธิบายถึงผลของ CMC ต่อค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกนั่นเอง กล่าวคือ CMC เป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษอยู่แล้ว นอกจากนี้การใช้ CMC ทำให้เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น การฟอร์มเป็นแผ่นกระดาษดีขึ้น ส่งผลให้กระดาษมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากขึ้น

ผลจากการใช้เซลลูเลสในตารางที่ 35 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลลูเลสที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 3, ลำดับการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4, ลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 7 และลำดับการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 25 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อมีการใช้ปริมาณเซลูเลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น การที่กระดาษมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นเพราะว่าเซลลูเลสเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยที่มีขนาดสั้นก่อน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวโดยรวมมากกว่า ส่งผลให้ระบบเหลือเส้นใยที่มีขนาดยาวมากขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงเพิ่มสูงขึ้น

ผลจากการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 35 พบว่าค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 40 นาที (ลำดับการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 2, ลำดับการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 4 และลำดับการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบกับลำดับการทดลองที่ 6) และจากผลทางสถิติในตารางที่ 25 มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าแปรผกผันกับระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่อใช้ระยะเวลาที่พักเยื่อทิ้งไว้ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง การที่ระยะเวลาที่พักเยื่อนานขึ้นมีแนวโน้มส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของเยื่อที่ได้ทั้งก่อนและหลังการดึงหมึกออกลดลงนั้น อาจเป็นเพราะว่าการทิ้งให้เซลลูเลสทำปฏิกิริยากับเส้นใยนานเกินไปอาจส่งผลให้เกิด Cellulose degradation ได้ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจึงมีแนวโน้มลดลง

นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสังเกตว่าการดึงหมึกออกจากกระดาษโดยวิธีการลอยฟองอากาศ ทำให้ความแข็งแรงของเยื่อที่ได้หลังการดึงหมึกออกสูงขึ้น ดังเห็นได้จากค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการดึงหมึกออกมีค่าสูงกว่าก่อนการดึงหมึกออก แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่มีการใช้ CMC ร่วมกับเซลลูเลสส่งผลให้เส้นใยที่มีขนาดสั้นถูกแยกออกไปกับฟองอากาศเป็นส่วนใหญ่ในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ ส่งผลให้เส้นใยที่เหลือในระบบมีขนาดความยาวโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของเยื่อจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 36 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเปรียบเทียบกับการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย ERIC หลังการลอยฟองอากาศ ±S.D.	ค่าเฉลี่ย ERIC หลังการล้าง ±S.D.	ค่า ERIC ที่ลดลง
1	0	0.1	10	260.77 ±2.54	221.78 ±2.18	38.99
2	0	0.1	40	226.97 ±0.62	185.52 ±0.63	41.45
3	0	0.3	10	240.03 ±0.26	210.36 ±0.66	29.67
4	0	0.3	40	210.42 ±0.76	178.22 ±0.59	32.20
5	0.2	0.1	10	190.27 ±0.60	156.43 ±0.33	33.84
6	0.2	0.1	40	174.41 ±0.39	143.29 ±0.16	31.12
7	0.2	0.3	10	178.18 ±0.55	142.09 ±0.56	36.09
8	0.2	0.3	40	162.11 ±0.29	144.53 ±0.22	17.58

หมายเหตุ : ค่า ERIC ของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่า 27.95 ±0.78

เยื่อที่ผ่านการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศจะนำมาทำการดึงหมึกออกต่อด้วยวิธีการล้าง โดยตักน้ำเยื่อมาจำนวน 40 กรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง ใส่ในถุงผ้าที่มีรูเปิดเป็นช่องเล็ก ๆ แล้วทำการล้างด้วยน้ำ 20 ลิตร พร้อมทั้งกวนเยื่อไปด้วยในขณะล้าง เมื่อน้ำที่ใช้ในการล้างไหลผ่านรูเปิดจนหมด จะทำการบีบน้ำที่เหลือออกจากเยื่อให้หมด จากนั้นนำเยื่อที่เหลือจากการล้างไปเจือจางด้วยน้ำ 5 ลิตร กวนให้เข้ากัน และนำน้ำเยื่อที่ได้ไปทำแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น เพื่อวัดปริมาณหมึกที่เหลืออยู่และค่าความขาวสว่าง จากตารางที่ 36 พบว่าการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างนั้นสามารถทำให้ขจัดอนุภาคของหมึกออกได้มากขึ้นและค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ในเยื่อภายหลังจากการล้างมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามจากค่า ERIC ที่ได้

หลังจากการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้างซึ่งมีค่ามากกว่าค่า ERIC ของกระดาษตัวอย่างก่อนพิมพ์ แสดงให้เห็นว่าแม้การล้างจะเป็นวิธีการขจัดหมึกอย่างมีประสิทธิภาพมากสำหรับหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ แต่ก็ยังไม่สามารถขจัดอนุภาคของหมึกออกได้หมดอยู่ดี อาจเป็นไปได้ว่าอนุภาคของหมึกเฟล็กโซฐานน้ำมีการย้อนกลับไปติดที่เส้นใย โดยอนุภาคของหมึกเหล่านั้นฝังตัวอยู่บริเวณผิวที่ไม่เรียบของช่องว่างตรงกลางของเส้นใย (Lumen) มากกว่าบริเวณผิวหน้าของเส้นใย

ตารางที่ 37 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเปรียบเทียบกับการดึงหมึกออกด้วยวิธีการล้าง

ลำดับ	CMC (ร้อยละ)	เซลลูเลส (ร้อยละ)	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างหลังการลอยฟองอากาศ (ร้อยละ) ±S.D.	ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างหลังการล้าง (ร้อยละ) ±S.D.	ค่าความขาวสว่างที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)
1	0	0.1	10	75.98 ±0.75	77.06 ±0.26	1.08
2	0	0.1	40	78.07 ±0.32	79.06 ±0.62	0.99
3	0	0.3	10	78.18 ±0.47	79.08 ±0.44	0.90
4	0	0.3	40	79.13 ±0.36	80.43 ±0.48	1.30
5	0.2	0.1	10	80.51 ±0.61	81.45 ±0.23	0.94
6	0.2	0.1	40	82.02 ±0.13	82.97 ±0.10	0.95
7	0.2	0.3	10	81.11 ±0.24	82.02 ±0.24	0.91
8	0.2	0.3	40	81.33 ±0.24	82.27 ±0.12	0.94

หมายเหตุ : ค่าความขาวสว่างของกระดาษตัวอย่างก่อนการพิมพ์มีค่าร้อยละ 94.60 ±0.19

จากตารางที่ 37 พบว่าค่าความขาวสว่างหลังจากการล้างมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับค่าความขาวสว่างหลังการดึงหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังการล้างไม่ได้ลดลงมากนัก (ตารางที่ 36) ตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนหนึ่งที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นไปได้ว่า กระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีความแข็งแรงมาก เพื่อให้ประสิทธิภาพในการตีกระจายดีขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการตีกระจายเยื่อนาน ทำให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ก็มีค่าสูงขึ้นด้วย รวมทั้งหากมีการใช้ความเข้มข้นของเยื่อสูง

ความเร็วในการตีกระจายเยื่อสูง จะยิ่งทำให้ปัญหาการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกเกิดมากขึ้น กล่าวคือ การตีเยื่อโดยใช้เวลานาน ความเข้มข้นของเยื่อสูง และความเร็วในการตีกระจายสูง อาจส่งผลให้ขนาดอนุภาคของหมึกยิ่งเล็กลงมาก จนกระทั่งมีโอกาสย้อนกลับไปติดที่เส้นใยได้มากนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. ปริมาณ CMC ที่ใช้ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้และระยะเวลาที่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่และค่าความขาวสว่างที่ได้ กล่าวคือหากเพิ่มค่าตัวแปรทั้งสามให้สูงขึ้น ทำให้ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าลดลงและมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น

2. ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อมากที่สุดคือปริมาณเซลลูเลสที่ใช้ เมื่อใช้ปริมาณเซลลูเลสเพิ่มขึ้น ทำให้เยื่อที่ได้มีค่าสภาพระบายได้สูงขึ้น

3. ตัวแปรทั้งสาม คือปริมาณ CMC ที่ใช้ ปริมาณเซลลูเลสที่ใช้และระยะเวลาที่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยา ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้

4. ปริมาณ CMC ที่ใช้ และปริมาณเซลลูเลสที่ใช้มีผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ กล่าวคือเมื่อใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ CMC มากเกินร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ความแข็งแรงของกระดาษมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่ระยะเวลาที่ให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษเช่นกัน คือเมื่อทิ้งให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับเยื่อนานขึ้น ค่าความแข็งแรงของเยื่อมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน

5. แม้การดึงหมึกออกโดยวิธีการล้างจะเป็นวิธีกำจัดหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำที่มีประสิทธิภาพที่สุดก็ตาม แต่อนุภาคของหมึกก็ไม่สามารถถูกกำจัดออกจนหมดได้ ทั้งนี้อาจจะเกิดการย้อนกลับของอนุภาคหมึกไปติดที่เส้นใยตรงบริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใยนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการใช้สารเคมีที่เพิ่มสมบัติความแข็งแรงของกระดาษร่วมกับการใช้ CMC เนื่องจากการใช้ CMC เพียงอย่างเดียวอาจจะไปเพิ่มประจุลบในระบบมากเกินไป จนทำให้เส้นใยที่มีประจุลบเช่นเดียวกันสร้างพันธะต่อกันได้น้อยลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ผลิตได้มีค่าต่ำลงเมื่อใช้ CMC มากเกินไป

2. ควรทดลองใช้สารชนิดอื่นมาแทน CMC ที่มีสมบัติคล้ายกันหรือให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า อาทิเช่น Sodium silicate (Na_2SiO_3) ในปริมาณต่าง ๆ กัน รวมถึงสารนั้นควรสามารถทำการทดลองในสภาวะที่เป็นกลางได้ดี เพื่อลดการสึกหรอของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตกระดาษ เนื่องจากภาวะค่าความเป็นกรด-เบส ที่เป็นกรด

3. ควรศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการย้อนกลับของหมึกไปติดที่เส้นใย อันได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเร็วในการตีกระจายเยื่อ และเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ เป็นต้น

4. ควรทดลองใช้เครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM) ในการวิเคราะห์ข้อมูลการย้อนกลับของหมึกไปติดที่เส้นใย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Gottsching, L., and Pakarinen, H., Papermaking Science and Technology Vol.7: Recycled Fiber and Deinking, TAPPI Press, Atlanta, GA, 2000, pp. 22, 97, 114, 135, 146, 155, 241, 252, 270, 276, 287.

[2] Ferguson, L.D. Deinking Chemistry: Part 2 TAPPI Journal 75(8) (August 1992) : 49-58.

[3] Carleton, R.J., The Effect of Electrohydraulic Discharge on Flotation Deinking Efficiency, Master'sThesis, School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, USA., 2004.

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

[5] 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.

[6] 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) (June 2000) : 1-33.

[7] Ferguson, L.D., The Role of Pulper Chemistry in Deinking, 1991 Pulping Conference Proceedings, TAPPI Press, Atlanta, GA, 1991, pp. 793-799.

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

[9] Watanabe, M., Gondo, T. and kitao, O. Advanced Wet-End System with Carboxymethyl-Cellulose Tappi Journal 3(5) (May 2004) : 15-19.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[10] FST 605 Food Chemistry Winter 2005, http://class.fst.ohio-state.edu/fst605/lectures/lect20.html, Accessed Date : September 17, 2007.

[11] Bajai, P., and Bajpai, P.K. Deinking with Enzymes: A Review Tappi Journal 81(12) (December 1998) : 111-117.

[12] OW, S. S-K and EOM, T-J., "Biological Deinking Method of Newsprint Wastepaper", EUCEPA Symposium: Additives, Pigment & Fillers Pulp & Paper Industry (Barcelona): XXXVII, 1990, p.85.

[13] Kim, T-J, OW, S. S-K, and EOM, T-J, "Enzymatic Deinking Method of Wastepaper," 1991 Pulping Conference Proceedings, TAPPI Press, Atlanta, GA, p.1023.

[14] Prasad, D.Y., Heimann, J.A. and Joyce, T.W. Enzymatic Deinking of Colored Offset Newsprint Nordic Pulp and Paper Research Journal 8(2) (1993) : 284.

[15] Zeyer, C., Joyce, T.W., Heitmann, J.A., and Rucker, J.W. Factors Influencing Enzyme Deinking of Recycled Fiber Tappi Journal 77(10) (October 1994) : 174-175.

[16] T227 om-99, Freeness of Pulp (Canadian Standard Method), TAPPI Press, Atlanta, GA, 1999.

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

[18] T227 sp-97, Brightness of Pulp: Paper and Paperboard (Directional Reflectance at 457 nm), TAPPI Press, Atlanta, GA, 1997.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[19] T567 pm-97, Determination of Effective Residual Ink Concentration by Infrared Reflectance Measurement, TAPPI Press, Atlanta, GA, 1997.

[20] Vahey, D.W., Zhu, J.Y., and Houtman C.J. On Measurement of Effective Residual Ink Concentration (ERIC) of Deinked Paper Using Kubelka-Munk Theory Progress in Paper Recycling 16(1) (2006) : 3-11.

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

[22] Chaiarrekij, S., Enzymatic Deinking of Flexographic Water-Based Inks, Master's Thesis, Department of Paper and Printing Science and Engineering, Western Michigan University, USA, 2001, p. 124.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวน

การคำนวณปริมาณของหมึกพิมพ์ที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ

ปริมาณของหมึกพิมพ์ที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ (Ink coverage) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักหมึกบนกระดาษต่อน้ำหนักกระดาษเปล่าที่ยังไม่ได้พิมพ์ โดยน้ำหนักของหมึกที่พิมพ์บนกระดาษมีค่าเท่ากับน้ำหนักกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้วลบด้วยกระดาษเปล่าที่ยังไม่ได้พิมพ์ในปริมาณพื้นที่ที่เท่ากัน โดยคำนวณได้จาก

$$\text{Ink coverage (\%)} = \frac{\text{Printed area} - \text{Non-printed area}}{\text{Non-Printed area}} \times 100$$

กระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมี Ink coverage เท่ากับ ร้อยละ 1.43 โดยคำนวณจากน้ำหนักกระดาษที่ยังไม่ได้พิมพ์ 1 แผ่น หนักเฉลี่ย 6.2032 กรัม และกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้ว 1 แผ่น หนักเฉลี่ย 6.2918 กรัม

การคำนวณความเข้มข้นของน้ำเยื่อ

ความเข้มข้นเยื่อ (Consistency) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้งต่อน้ำหนักเยื่อก่อนอบซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักเยื่อแห้งบวกกับน้ำหนักน้ำ โดยคำนวณได้จาก

$$\text{\% Consistency} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น (Moisture content) ในแผ่นกระดาษคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในแผ่นกระดาษ ต่อน้ำหนักทั้งหมดของกระดาษก่อนอบ โดยน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นในแผ่นกระดาษ มีค่าเท่ากับน้ำหนักกระดาษก่อนอบลบด้วยน้ำหนักกระดาษหลังอบ โดยคำนวณได้จาก

$$\text{\% Moisture content} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}}{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ}} \times 100$$

การคำนวณน้ำหนักเยื่อแห้ง

นำกระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปหาความชื้นโดยใช้เครื่องหาความชื้นของกระดาษ ผลที่ได้คือกระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 10.4 และน้ำหนักของกระดาษที่นำมาใช้ในการทดลองต่อ 1 สภาวะ จำนวน 45 แผ่น มีน้ำหนักที่ยังไม่ได้หักความชื้นออกเท่ากับ 283.05 กรัม

(10.4 x 283.05) / 100 = 29.44 กรัม

ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษ คือ 29.44 กรัม

ดังนั้นน้ำหนักเยื่อแห้ง คือ 283.05 – 29.44 = 253.61 กรัม

การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้

การคำนวณ Surfactant ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่ง Surfactant เท่ากับ 0.5 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 253.61 กรัม จะต้องชั่ง Surfactant เท่ากับ

(253.61 x 0.5) / 100 = 1.27

ต้องใช้ Surfactant เท่ากับ 1.27 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 253.61 กรัม

การคำนวณ CMC ร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่ง CMC เท่ากับ 0.1 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 253.61 กรัม จะต้องชั่ง CMC เท่ากับ

(253.61 x 0.1) / 100 = 0.25

ต้องใช้ CMC เท่ากับ 0.25 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 253.61 กรัม

การคำนวณ CMC ร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่ง CMC เท่ากับ 0.2 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 253.61 กรัม จะต้องชั่ง CMC เท่ากับ

$$(253.61 \times 0.2) / 100 = 0.50$$

ต้องใช้ CMC เท่ากับ 0.50 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 253.61 กรัม

การคำนวณ CMC ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่ง CMC เท่ากับ 0.3 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 253.61 กรัม จะต้องชั่ง CMC เท่ากับ

$$(253.61 \times 0.3) / 100 = 0.76$$

ต้องใช้ CMC เท่ากับ 0.76 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 253.61 กรัม

การคำนวณเซลลูเลส ร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่งเซลลูเลส เท่ากับ 0.1 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 253.61 กรัม จะต้องชั่งเซลลูเลส เท่ากับ

$$(253.61 \times 0.1) / 100 = 0.25$$

ต้องใช้เซลลูเลส เท่ากับ 0.25 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 253.61 กรัม

การคำนวณเซลลูเลส ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

หมายความว่า น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะต้องชั่งเซลลูเลส เท่ากับ 0.3 กรัม ถ้าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 253.61 กรัม จะต้องชั่งเซลลูเลส เท่ากับ

$$(253.61 \times 0.3) / 100 = 0.76$$

ต้องใช้เซลลูเลส เท่ากับ 0.76 กรัม ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง 253.61 กรัม

<u>หมายเหตุ</u> การชั่งสารเคมีจะชั่งสารที่ได้ทำการเจือจางไว้แล้วเพื่อลดความผิดพลาดจากการชั่งสารในปริมาณน้อย ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูลดิบผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA)

ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for ERIC1

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		342.97	0.3990	859.51	0.000
CMC	-62.23	-31.11	0.3990	-77.97	0.000
Enzyme	-9.16	-4.58	0.3990	-11.48	0.000
Time	-32.47	-16.23	0.3990	-40.68	0.000
CMC*Enzyme	-0.63	-0.32	0.3990	-0.79	0.451
CMC*Time	-4.93	-2.46	0.3990	-6.17	0.000
Enzyme*Time	-1.70	-0.85	0.3990	-2.12	0.066
CMC*Enzyme*Time	1.12	0.56	0.3990	1.40	0.199

Analysis of Variance for ERIC1

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	20040.3	20040.3	6680.10	2622.07	0.000
2-Way Interactions	3	110.1	110.1	36.71	14.41	0.001
3-Way Interactions	1	5.0	5.0	4.99	1.96	0.199
Residual Error	8	20.4	20.4	2.55		
Pure Error	8	20.4	20.4	2.55		
Total	15	20175.8				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 39 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for ERIC2

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		205.40	0.3317	619.14	0.000
CMC	-58.30	-29.15	0.3317	-87.87	0.000
Enzyme	-15.42	-7.71	0.3317	-23.24	0.000
Time	-23.83	-11.92	0.3317	-35.92	0.000
CMC*Enzyme	3.23	1.61	0.3317	4.86	0.001
CMC*Time	7.87	3.93	0.3317	11.86	0.000
Enzyme*Time	1.00	0.50	0.3317	1.50	0.172
CMC*Enzyme*Time	-1.10	-0.55	0.3317	-1.66	0.136

Analysis of Variance for ERIC2

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	16818.4	16818.4	5606.14	3183.67	0.000
2-Way Interactions	3	293.3	293.3	97.76	55.52	0.000
3-Way Interactions	1	4.9	4.9	4.85	2.75	0.136
Residual Error	8	14.1	14.1	1.76		
Pure Error	8	14.1	14.1	1.76		
Total	15	17130.6				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 40 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Brightness1

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		74.5306	0.1549	481.03	0.000
CMC	2.4538	1.2269	0.1549	7.92	0.000
Enzyme	-0.4113	-0.2056	0.1549	-1.33	0.221
Time	1.0513	0.5256	0.1549	3.39	0.009
CMC*Enzyme	0.3812	0.1906	0.1549	1.23	0.254
CMC*Time	-0.0913	-0.0456	0.1549	-0.29	0.776
Enzyme*Time	-0.0663	-0.0331	0.1549	-0.21	0.836
CMC*Enzyme*Time	-0.4287	-0.2144	0.1549	-1.38	0.204

Analysis of Variance for Brightness1

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	29.1806	29.1806	9.7269	25.32	0.000
2-Way Interactions	3	0.6362	0.6362	0.2108	0.55	0.663
3-Way Interactions	1	0.7353	0.7353	0.7353	1.91	0.204
Residual Error	8	3.0728	3.0728	0.3841		
Pure Error	8	3.0728	3.0728	0.3841		
Total	15	33.6209				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 41 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความขาวสว่าง (Brightness) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Brightness2

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		79.5406	0.1328	598.93	0.000
CMC	3.4063	1.7031	0.1328	12.83	0.000
Enzyme	0.7938	0.3969	0.1328	2.99	0.017
Time	1.1937	0.5969	0.1328	4.49	0.002
CMC*Enzyme	-0.8363	-0.4181	0.1328	-3.15	0.014
CMC*Time	-0.3262	-0.1631	0.1328	-1.23	0.254
Enzyme*Time	-0.6037	-0.3019	0.1328	-2.27	0.053
CMC*Enzyme*Time	-0.0387	-0.0194	0.1328	-0.15	0.888

Analysis of Variance for Brightness2

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	54.6305	54.6305	18.2102	63.54	0.000
2-Way Interactions	3	4.6811	4.6811	1.5604	5.53	0.024
3-Way Interactions	1	0.0060	0.0060	0.0060	0.02	0.888
Residual Error	8	2.2575	2.2575	0.2822		
Pure Error	8	2.2575	2.2575	0.2822		
Total	15					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 42 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้ (Freeness) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Freeness1

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		480.94	1.847	260.44	0.000
CMC	-6.38	-3.19	1.847	-1.73	0.123
Enzyme	42.88	21.44	1.847	11.61	0.000
Time	3.38	1.69	1.847	0.91	0.388
CMC*Enzyme	-23.38	-11.69	1.847	-6.33	0.000
CMC*Time	-17.87	-8.94	1.847	-4.84	0.001
Enzyme*Time	-0.62	-0.31	1.847	-0.17	0.870
CMC*Enzyme*Time	0.13	0.06	1.847	0.03	0.974

Analysis of Variance for Freeness1

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	7561.2	7561.19	2520.40	46.19	0.000
2-Way Interactions	3	3465.2	3465.19	1155.06	21.17	0.000
3-Way Interactions	1	0.1	0.06	0.06	0.00	0.974
Residual Error	8	436.5	436.50	54.56		
Pure Error	8	436.5	436.50	54.56		
Total	15	11462.9				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 43 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสภาพระบายได้ (Freeness) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Freeness2

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		500.25	1.225	408.45	0.000
CMC	-15.50	-7.75	1.225	-6.33	0.000
Enzyme	45.00	22.50	1.225	18.37	0.000
Time	-1.00	-0.50	1.225	0.41	0.694
CMC*Enzyme	-26.00	-13.00	1.225	10.61	0.000
CMC*Time	-5.00	-2.50	1.225	-2.04	0.076
Enzyme*Time	-1.50	-0.75	1.225	-0.61	0.557
CMC*Enzyme*Time	-2.50	-1.25	1.225	-1.02	0.337

Analysis of Variance for Freeness2

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	9065.0	9065.0	3021.67	125.90	0.000
2-Way Interactions	3	2813.0	2813.0	937.67	39.07	0.000
3-Way Interactions	1	25.0	25.0	25.00	1.04	0.337
Residual Error	8	192.0	192.0	24.00		
Pure Error	8	192.0	192.0	24.00		
Total	15	12095.0				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 44 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield) เมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Yield

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		90.3925	0.09780	924.30	0.000
CMC	0.1075	0.0537	0.09780	0.55	0.598
Enzyme	0.2925	0.1462	0.09780	1.50	0.173
Time	0.0975	0.0487	0.09780	0.50	0.632
CMC*Enzyme	0.0400	0.0200	0.09780	0.20	0.843
CMC*Time	-0.0450	-0.0225	0.09780	-0.23	0.824
Enzyme*Time	-0.1850	-0.0925	0.09780	-0.95	0.372
CMC*Enzyme*Time	0.1975	0.0987	0.09780	1.01	0.342

Analysis of Variance for Yield

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.4265	0.4265	0.14216	0.93	0.470
2-Way Interactions	3	0.1514	0.1514	0.05047	0.33	0.804
3-Way Interactions	1	0.1560	0.1560	0.15602	1.02	0.342
Residual Error	8	1.2242	1.2242	0.15303		
Pure Error	8	1.2242	1.2242	0.15303		
Total	15	1.9581				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 45 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Tear index1

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.79625	0.008615	440.65	0.000
CMC	0.33250	0.16625	0.008615	19.30	0.000
Enzyme	0.07750	0.03875	0.008615	4.50	0.002
Time	-0.03000	-0.01500	0.008615	-1.74	0.120
CMC*Enzyme	0.03750	0.01875	0.008615	2.18	0.061
CMC*Time	0.05000	0.02500	0.008615	2.90	0.020
Enzyme*Time	0.00500	0.00250	0.008615	0.29	0.779
CMC*Enzyme*Time	0.02500	0.01250	0.008615	1.45	0.185

Analysis of Variance for Tear index1

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.469850	0.469850	0.156617	131.89	0.000
2-Way Interactions	3	0.015725	0.015725	0.005242	4.41	0.041
3-Way Interactions	1	0.002500	0.002500	0.002500	2.11	0.185
Residual Error	8	0.009500	0.009500	0.001187		
Pure Error	8	0.009500	0.009500	0.001188		
Total	15	0.497575				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 46 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Tear index2

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.95125	0.007756	509.44	0.000
CMC	0.48250	0.24125	0.007756	31.10	0.000
Enzyme	0.11000	0.05500	0.007756	7.09	0.000
Time	-0.05250	0.02625	0.007756	-3.38	0.010
CMC*Enzyme	0.07500	0.03750	0.007756	4.38	0.001
CMC*Time	0.08750	0.04375	0.007756	5.64	0.000
Enzyme*Time	0.01500	0.00750	0.007756	0.97	0.362
CMC*Enzyme*Time	0.02000	0.01000	0.007756	1.29	0.233

Analysis of Variance for Tear index2

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.99065	0.990650	0.330217	343.08	0.000
2-Way Interactions	3	0.05402	0.054025	0.018008	18.71	0.001
3-Way Interactions	1	0.00160	0.00160	0.001600	1.66	0.233
Residual Error	8	0.00770	0.00770	0.000963		
Pure Error	8	0.00770	0.00770	0.000962		
Total	15	1.05398				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 47 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) ก่อนการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Tensile index1

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		19.7063	0.01139	1730.43	0.000
CMC	1.9300	0.9650	0.01139	84.74	0.000
Enzyme	1.0800	0.5400	0.01139	47.42	0.000
Time	-0.1675	-0.0838	0.01139	-7.35	0.000
CMC*Enzyme	-0.1475	-0.0737	0.01139	-6.48	0.000
CMC*Time	0.0950	0.0475	0.01139	4.17	0.003
Enzyme*Time	0.1000	0.0500	0.01139	4.39	0.002
CMC*Enzyme*Time	0.1475	0.0738	0.01139	6.48	0.000

Analysis of Variance for Tensile index1

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	19.6774	19.6774	6.55914	3161.03	0.000
2-Way Interactions	3	0.1631	0.1631	0.05438	26.20	0.000
3-Way Interactions	1	0.0870	0.0870	0.08703	41.94	0.000
Residual Error	8	0.0166	0.0166	0.00208		
Pure Error	8	0.0166	0.0166	0.00208		
Total	15	19.9442				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 48 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) ค่าดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) หลังการดึงหมึกออกเมื่อใช้ปริมาณตัวแปรในระดับต่าง ๆ (การทดลองตอนที่ 2)

Estimated Effects and Coefficients for Tensile index2

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		21.3825	0.005078	4211.21	0.000
CMC	1.6575	0.8288	0.005078	163.22	0.000
Enzyme	0.4850	0.2425	0.005078	47.76	0.000
Time	-0.1975	-0.0987	0.005078	-19.45	0.000
CMC*Enzyme	-0.2675	-0.1337	0.005078	-26.34	0.000
CMC*Time	0.2550	0.1275	0.005078	25.11	0.000
Enzyme*Time	-0.0025	-0.0012	0.005078	-0.25	0.812
CMC*Enzyme*Time	0.1550	0.0775	0.005078	15.26	0.000

Analysis of Variance for Tensile index2

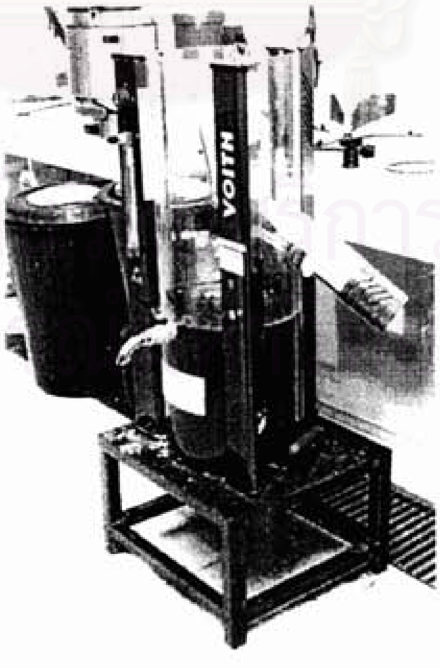
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	12.0862	12.0862	4.02872	9766.59	0.000
2-Way Interactions	3	0.5463	0.5463	0.18212	441.49	0.000
3-Way Interactions	1	0.0961	0.0961	0.09610	232.97	0.000
Residual Error	8	0.0033	0.0033	0.00041		
Pure Error	8	0.0033	0.0033	0.00041		
Total	15	12.7319				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

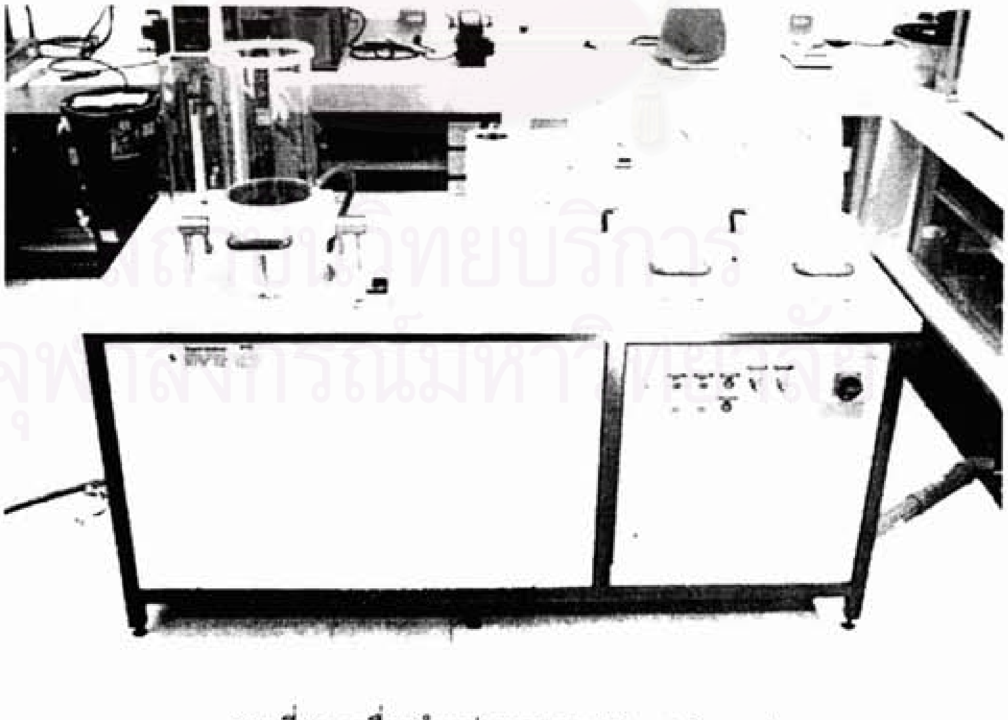
ภาพที่ 31 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper)



ภาพที่ 32 เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 33 เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ (Freeness Tester)



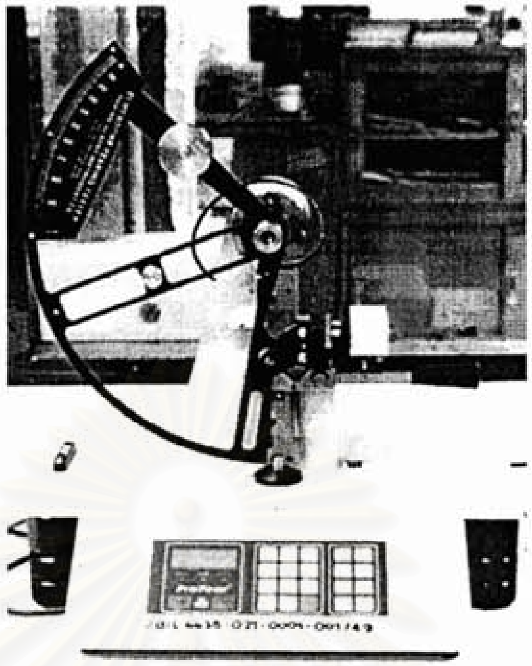
ภาพที่ 34 เครื่องทำแผ่นทดสอบ (Sheet former)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 35 เครื่องหาความชื้นในกระดาษ (Moisture balance)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

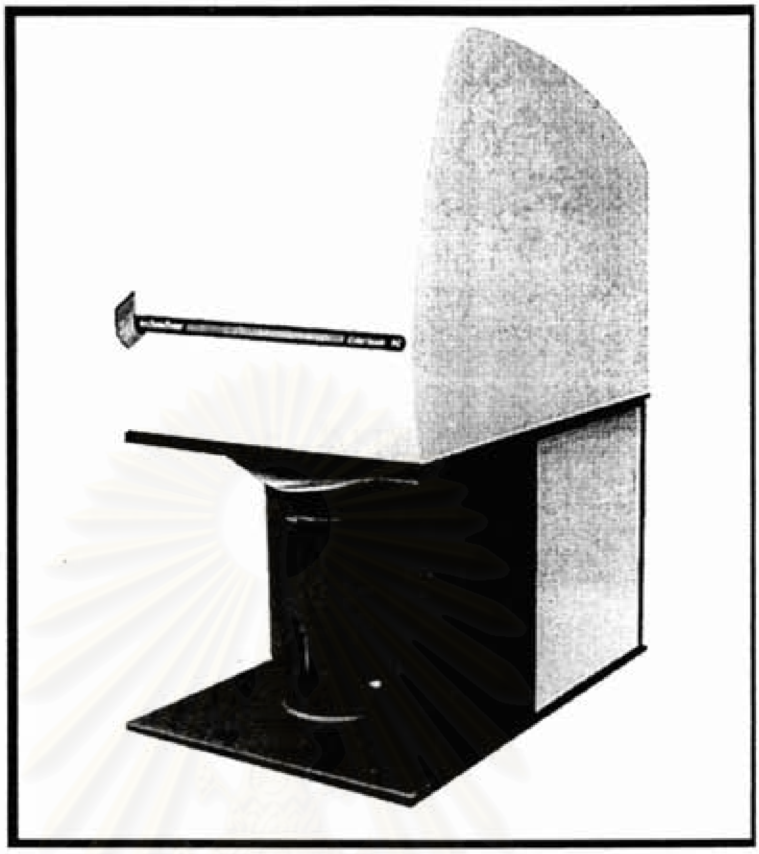
ภาพที่ 36 ตู้อบ (Oven)



ภาพที่ 37 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear tester)

ภาพที่ 38 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 41 เครื่องมือวัดค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่และค่าความขาวสว่าง

(ERIC and brightness tester)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายธนาวุธ ลิ้มพานิชย์ วันที่เกิดวันที่ 4 กรกฎาคม 2524 ที่จังหวัดอุดรธานี จบการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุ-ภัณฑ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี 2547 จากนั้นจึงมาศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษา ในปี 2550 โดยมีผลงานทางวิชาการเรื่อง "ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเงินออกจากน้ำยาคงภาพที่ใช้แล้วโดยวิธีดึงดูดด้วยแผ่นขั้วไฟฟ้า" ซึ่งผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิสาขา การจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 ระหว่างวันที่ 30 มกราคม – 2 กุมภาพันธ์ 2549 นอกจากนี้ในระหว่างการศึกษาได้ทำงานเป็นช่างภาพอิสระให้กับหลาย ๆ องค์กร และเป็นเจ้าของเวปไซต์ http://www.dpixmania.com

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย