

ผลของเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซานต่อการกำจัดหมึกเพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำ
ด้วยวิธีลอยฟองอากาศ

นางสาวเจียณี ภัคพงษ์พันธุ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFECTS OF HEPTANOL, CARBOXYMETHYL CELLULOSE AND CHITOSAN ON
FLOTATION DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED INK

Miss. Dhear Packpongphanchai

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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซาน ต่อการกำจัดหมึกเพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีลอย ฟองอากาศ
โดย	นางสาวเจียณี ภัคพงษ์พันธุ์ชัย
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หรรหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. กุณทีนี สุวรรณกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข)

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

เกียรติ ภัคพงษ์พันธุ์ชัย : ผลของเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซานต่อการกำจัดหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีลอยฟองอากาศ. (EFFECTS OF HEPTANOL, CARBOXYMETHYL CELLULOSE AND CHITOSAN ON FLOTATION DEINKING OF FLEXOGRAPHIC WATER-BASED INK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:
 รศ. ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ, 104 หน้า.

การกำจัดหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำโดยทั่วไปจะใช้วิธีการล้าง เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของหมึก หากแต่วิธีนี้เป็นการสิ้นเปลืองน้ำ การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกได้ แต่อาจไม่ได้ประสิทธิภาพที่ตึก เนื่องจากอนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กเกินไป งานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้สารเคมีที่เป็นตัวแปร 3 ชนิดรวมกันคือเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซาน ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการลอยฟองอากาศ โดยแต่ละชนิดจะมีการศึกษา 3 ระดับ คือ เฮปทานอลร้อยละ 0, 3, 6 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 0, 0.2, 0.4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และไคโทซานร้อยละ 0, 0.1, 0.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้ปัจจัยที่ใช้พิจารณาประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออก ได้แก่ ปริมาณผลผลิตที่ได้ สภาพระบายน้ำ ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีก ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใส่สารเคมี โดยเฉพาะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถช่วยให้กระดาษที่ผลิตได้มีปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำลงและมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สมบัติความแข็งแรงของกระดาษ ซึ่งวัดจากดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความต้านทานแรงฉีกพบว่า กระดาษที่ขึ้นรูปได้หลังจากกำจัดหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าการใช้เฮปทานอล และไคโทซาน โดยยังพบอีกว่าการใช้ไคโทซานนอกจากจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกต่ำที่สุดแล้วเมื่อใช้ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่นจะทำให้ประสิทธิภาพของสารเคมีนั้นๆ ลดลงทั้งนี้เนื่องจากความเป็นประจวบของไคโทซาน

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

5272350023 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : FLEXOGRAPHIC WATER-BASED INK / FLOTATION DEINKING /
HEPTANOL / CARBOXYMETHYL CELLULOSE (CMC) / CHITOSAN

DHEAR PACKPONGPHANCHAI: EFFECTS OF HEPTANOL, CARBOXYMETHYL
CELLULOSE AND CHITOSAN ON FLOTATION DEINKING OF FLEXOGRAPHIC
WATER-BASED INK. ADVISOR: ASSOC. PROF. NATTAYA PONGSTABODEE,
Ph.D., 104 pp.

Flexographic water-based ink is generally deinked by washing process but this process consumes a lot of water. Flotation deinking is one of the techniques to reduce volume of water used but the efficiency is not quite good due to too small ink particle size of this ink. This research was aimed to study the improvement of flotation deinking efficiency using three chemicals which were heptanol, carboxymethyl cellulose (CMC) and chitosan, The dosage levels of heptanol were 0, 3 and 6% based on oven dry (O.D.) pulp weight. Those of CMC were 0, 0.2 and 0.4% based on O.D. and for chitosan, the dosage were 0, 0.1 and 0.3% based on O.D. The factors used to evaluate deinking efficiency were yield, freeness, fiber morphology, effective residual ink concentration (ERIC), brightness, opacity, smoothness tensile index and tear index. The results showed that those chemicals, especially CMC reduced the effective residual ink concentration and improved paper brightness. Furthermore, paper strength which is indicated by tensile strength index and tear index showed that strength of paper after flotation deinking was enhanced. CMC provided better deinking efficiency than heptanol and chitosan. Moreover, the results indicated that chitosan, not only gave less deinking efficiency but if it was used with other chemicals, it decreased the effectiveness of those chemicals in deinking because of the positive charge of chitosan.

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

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคารุณาและอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ ผู้ที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนอาจารย์ที่ปรึกษาอีกท่านหนึ่ง ที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา รวมทั้งช่วยชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา และอุปสรรคต่างๆ ตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข และ อาจารย์ ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาดำเนินการสอบ ให้คำแนะนำ รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.นุจรินทร์ เหลืองสะอาด และภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในการช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องพิมพ์เพลตโซกราฟี บริษัท เจลิมชัยชาญ จำกัด ในการอนุเคราะห์หมึกพิมพ์เพลตโซกราฟีฐานน้ำ บริษัท ดับบลิวพีเอส (ประเทศไทย) จำกัด ในการอนุเคราะห์กระดาษปรีฟ และบริษัท Eka Chemicals จำกัด ในการอนุเคราะห์สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ รวมทั้งภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่อง

ขอขอบคุณพี่สมชาย ภวชินวร และ พี่ๆ เพื่อนๆ ในหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ และภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาการศึกษา จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ คุณพ่อ และครอบครัว ที่คอยเลี้ยงดู เป็นกำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
กระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษ (Deinking process).....	4
เคมีของการลอยฟองอากาศ (Deinking chemistry).....	10
สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ (Deinking chemicals).....	14
การย้อนกลับไปที่ติดที่เส้นใยของหมึก (Ink redeposition).....	20
ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก (Deinkability).....	21
แอลกอฮอล์ และเฮปทานอล (Alcohol and heptanol).....	22
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC).....	24
ไคติน และไคโทซาน (Chitin and chitosan).....	25
เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก.....	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
วิธีการทดลอง.....	35
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงแสง พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูล.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
สมบัติของกระดาษก่อนพิมพ์และหลังพิมพ์.....	41
ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองดั่งหมึกออก.....	42
-ปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield).....	42
-สภาพกระดาษได้ (Freeness).....	44
-ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology).....	47
-ความเป็นประจุของน้ำเยื่อ (Particle charge).....	50
-ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective Residual Ink Content, ERIC).....	52
-ความขาวสว่าง (Brightness).....	55
-ความทึบแสง (Opacity).....	57
-ความเรียบ (Smoothness).....	60
-ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index).....	62
-ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index).....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	68
สรุปผลการวิจัย.....	68
ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	75
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบของผลการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	90
ภาคผนวก ง ภาพอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	101

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการพิมพ์ กลไกการแห้งตัว และความสามารถ ในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก.....	22
3-1	อัตราความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ.....	37
4-1	สมบัติของกระดาษตัวอย่างก่อนและหลังการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟี.....	42
4-2	ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตที่ได้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ.....	43
4-3	ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	46
4-4	ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	48
4-5	ค่าเฉลี่ยร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	49
4-6	ค่าเฉลี่ยความเป็นประจุของของน้ำเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศ.....	51
4-7	ค่าเฉลี่ยปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอย ฟองอากาศ.....	53
4-8	ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	56
4-9	ค่าเฉลี่ยความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	58
4-10	ค่าเฉลี่ยความเรียบของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ.....	61
4-11	ค่าเฉลี่ยดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอย ฟองอากาศ.....	63
4-12	ค่าเฉลี่ยดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอย ฟองอากาศ.....	65
4-13	ค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติต่างๆ.....	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	เครื่องตีกระจายเยื่อ.....	5
2-2	เครื่องกรองเยื่อ.....	5
2-3	เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning และ Forward cleaning.....	6
2-4	การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้างและการลอยฟองอากาศ.....	8
2-5	การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง.....	8
2-6	การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ.....	9
2-7	การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของหมึกขนาดต่างๆ กับฟองอากาศ.....	11
2-8	การชนกันของฟองอากาศขนาดใหญ่กับอนุภาคหมึก.....	12
2-9	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหมึกพิมพ์และวิธีที่ใช้ในการกำจัด.....	12
2-10	การไหลของอนุภาคหมึกตามแนวเส้นกระแส.....	13
2-11	โครงสร้างของ DTPA และ EDTA.....	16
2-12	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	18
2-13	ลักษณะของ Micelle.....	19
2-14	ลักษณะการทำงานของสารรวบรวม.....	19
2-15	ลักษณะการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก.....	21
2-16	การแสดงสมบัติความเป็นกรดและด่างของแอลกอฮอล์.....	23
2-17	การแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล.....	24
2-18	โครงสร้างของไคติน.....	26
2-19	โครงสร้างของไคโทซาน.....	26
3-1	รูปแบบตัวอย่างการพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3-2	บริเวณที่วัดความหนาแน่นของหมึกด้วยเครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์.....	36
3-3	เครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์ (Spectrodensitometer).....	36
3-4	เครื่องวัดประจุอนุภาค (Particle charge detector).....	38
3-5	การใส่สารเคมีในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ.....	39
3-6	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Optical tester).....	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่สังคมให้ความสำคัญ โดยเฉพาะปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากวัสดุเหลือใช้ ปัจจุบันจึงมีการรณรงค์นำวัสดุใช้แล้วต่างๆ กลับมาใช้ใหม่ กระดาษเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีการใช้มาก การนำกระดาษกลับมาใช้ใหม่หรือการนำกระดาษมารีไซเคิลจึงเป็นการช่วยลดปัญหาขยะที่เกิดจากกระดาษ นอกจากนี้ยังเป็นการนำกระดาษเหลือใช้มาสร้างมูลค่า ช่วยลดการใช้พลังงาน รวมถึงช่วยลดต้นทุนต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วการผลิตกระดาษจากเยื่อกระดาษรีไซเคิลนั้นควรมีการกำจัดหมึกพิมพ์ออกก่อน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของกระดาษนั้นให้สูงขึ้น ซึ่งในกรณีของกระดาษที่พิมพ์ด้วยหมึกเพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำนั้น การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation) ยังให้ประสิทธิภาพไม่สูงนัก อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า การกำจัดหมึกออกจากกระดาษได้มีการใช้เทคนิคใหม่ๆ เพื่อทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกดีขึ้น เช่น การกำจัดหมึกร่วมกับการใช้เอนไซม์ การใช้แอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นสารที่ใช้ทั่วไปในงานคัดแยกแร่โดยการลอยฟองอากาศ การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารที่ช่วยป้องกันการย้อนกลับมาติดของอนุภาค (Anti-redeposition agent) ที่ใช้ทั่วไปในผงซักฟอก รวมทั้งการใช้ไคโทซาน ซึ่งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกโดยวิธีลอยฟองอากาศได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับผลการใช้สารเคมี ได้แก่ เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไคโทซาน ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกพิมพ์เพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำออกจากกระดาษด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยวิเคราะห์ผลจากสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้หลังการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศเป็นสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลของการใช้เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซาน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกเพ็ล็กโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซาน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมักพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 สภาวะ คือสภาวะที่ 1 เป็นการทดลองสภาวะควบคุม ซึ่งเป็นการทดลองที่ไม่มีสารเคมี คือ เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือโคโทซาน มีการใช้ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่ออยู่ในช่วงกรด คือ $\text{pH } 5 \pm 0.2$ และใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สำหรับสภาวะที่ 2 เป็นการทดลองที่มีการใส่เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซาน โดยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ ใช้ค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิเหมือนกับการทดลองในสภาวะที่ 1 สำหรับตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ชนิดของสารเคมีที่ใช้และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมักพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยในแต่ละสภาวะจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลความมีนัยสำคัญของตัวแปรดังกล่าวโดยใช้การออกแบบทางแฟกทอเรียล (Factorial design)

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การลอยฟองอากาศ คือ การทำให้อนุภาคหมักไปเกาะติดกับฟองอากาศ แล้วลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไป

ค่าปริมาณหมักที่เหลืออยู่ คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของหมักที่เหลืออยู่ในเยื่อ หากมีค่ามากแสดงว่า มีปริมาณหมักที่เหลืออยู่ในเยื่อมาก

ค่าความขาวสว่าง คือ ร้อยละการสะท้อนแสงของวัตถุในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 457 นาโนเมตร โดยค่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงร้อยละความสะอาดของเยื่อ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า เยื่อมีความสะอาดสูง และมีปริมาณหมักที่เหลืออยู่น้อย

ค่าสภาพระบายได้ คือ ค่าที่บอกถึงความสามารถในการระบายน้ำได้ของเยื่อ โดยหากค่าสภาพระบายได้มีค่าสูง หมายถึง เยื่อสามารถอุ้มน้ำได้น้อย และสามารถระบายน้ำออกมาได้มาก

ปริมาณผลผลิตที่ได้ คือ ปริมาณของเยื่อที่เหลือจากกระบวนการกำจัดหมักออก เนื่องจากในกระบวนการกำจัดหมักออกนั้น เส้นใยบางส่วนมีโอกาสที่จะหลุดออกมาพร้อมกับอนุภาคของหมัก ทำให้ปริมาณของเส้นใยที่เหลืออยู่ลดลง

ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกแรงดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง จึงต้องใช้แรงดึงสูง โดยค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น Nm/g

ดัชนีความต้านทานแรงฉีก คือ การวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาทดสอบ ซึ่งหากมีค่าสูงแสดงว่า กระดาษมีความต้านทานแรงฉีกสูง จึงต้องใช้แรงในการฉีกสูง โดยค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีหน่วยเป็น mN m²/g

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลผลของการใช้เฮปทานอล คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซาน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกฟเล็คโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษ (Deinking process)

การนำกระดาษที่ผ่านงานพิมพ์มาแล้วกลับมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษใหม่ หรือการรีไซเคิลกระดาษควรมีการกำจัดหมึกพิมพ์ออกก่อน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและคุณภาพให้กับเยื่อกระดาษรีไซเคิลที่ผลิตได้ โดยกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องทำครบทุกขั้นตอน และสามารถสลับเปลี่ยนลำดับแต่ละขั้นตอนได้ ตามความเหมาะสมกับกระบวนการพิมพ์ที่ใช้ในการพิมพ์กระดาษ ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ได้แก่

2.1.1 การตีกระจายเยื่อ (Pulping or repulping)

เป็นขั้นตอนการตีกระจายกระดาษให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้อนุภาคของหมึก รวมทั้งสิ่งปลอมปนอื่นๆ เช่น กาวเหนียว หรือ ฟอลย์ (Foil) หลุดออกจากเส้นใย โดยความเข้มข้นของเยื่อ (Consistency) ที่นิยมใช้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 4-6 การเพิ่มความเข้มข้นของเยื่อให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดแรงเสียดทานในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของหมึกและสิ่งปลอมปนอื่นๆ หลุดออกจากเส้นใยได้ง่ายยิ่งขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกหมึกให้สูงขึ้น ทั้งนี้ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อมักมีการใส่สารเคมีลงไปด้วย ได้แก่ สารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดหมึกหรือสารฟอก เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) และสารจับโลหะหนัก (Chelating agents) เป็นต้น

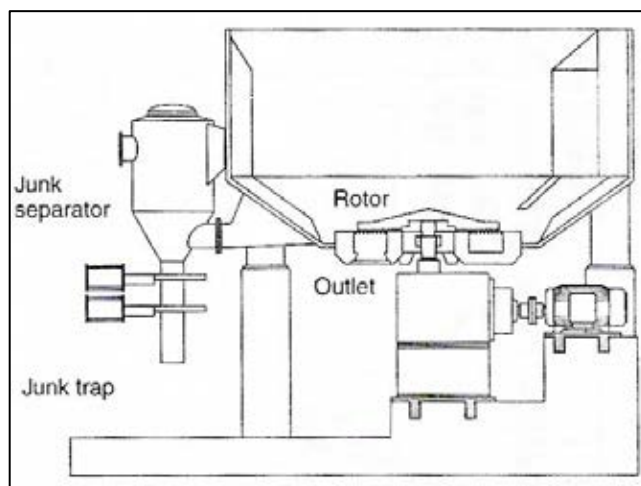
2.1.2 การล้างเยื่อ (Pre-washing)

เป็นขั้นตอนในการกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากเยื่อภายหลังการตีกระจายเยื่อแล้ว เพื่อปรับความเข้มข้นของเยื่อให้สูงขึ้นและเวียนน้ำที่กำจัดออกกลับมาใช้ใหม่

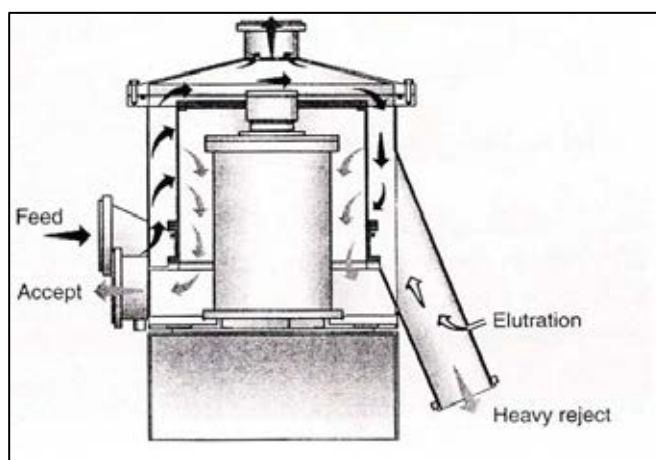
2.1.3 การกรองเยื่อ (Screening)

เป็นขั้นตอนการคัดแยกสิ่งปลอมปนที่มีขนาดใหญ่ เช่น คลิปหนีบกระดาษ ลวดเย็บกระดาษ และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ออกจากน้ำเยื่อด้วยเครื่องกรองเยื่อ ดังแสดงในภาพที่ 2-2

เนื่องจากสิ่งปลอมปนเหล่านี้หากหลุดลอดเข้าไปในระบบ อาจทำให้เครื่องจักรในขั้นตอนอื่นๆ เสียหายได้



ภาพที่ 2-1 เครื่องตีกระจายเยื่อ [1]



ภาพที่ 2-2 เครื่องกรองเยื่อ [1]

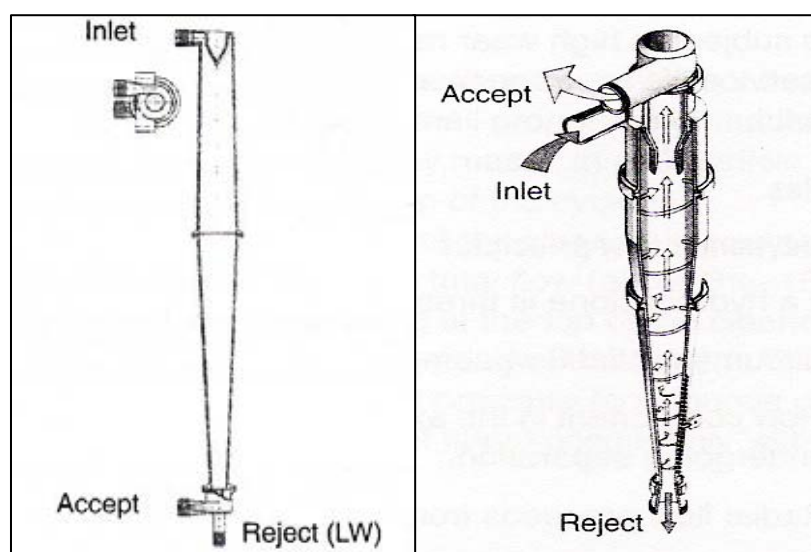
การกรองจะมีทั้งการกรองแบบหยาบ ซึ่งจะเหมาะกับน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นปานกลาง และการกรองแบบละเอียด ซึ่งเหมาะกับน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นต่ำ ในขั้นตอนการกรองนี้อาจมีเส้นใยบางส่วนหลุดลอดออกไปพร้อมกับสิ่งปลอมปน จึงมักมีการนำส่วนที่ถูกกัก (Reject) มากรองซ้ำอีกหลายๆ ครั้ง เพื่อเป็นการลดการสูญเสียเส้นใย

2.1.4 การทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal cleaning)

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดเยื่อโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งปลอมปนที่เครื่องกรองเยื่อไม่สามารถกำจัดออกได้ เช่น ททราย เม็ดโฟม หรือเศษพลาสติกเล็กๆ หลักการที่ใช้จะอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของวัตถุเปรียบเทียบกับความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะน้ำ ซึ่งมีความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับเส้นใย สามารถแบ่งการทำความสะอาดเยื่อในลักษณะนี้ได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1.4.1 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning

เป็นการกำจัดสิ่งปลอมปนที่มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ เช่น พลาสติก หรือโฟม ด้วยเครื่อง Centrifugal cleaner ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning และ Forward cleaning [1]

หากแต่เป็นแบบ Centrifugal reverse cleaner ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ เส้นใยที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะถูกเหวี่ยงไปชนกับผนังและหลุดออกไปทางด้านล่างของเครื่อง ส่วนสิ่งปลอมปนที่เบากว่าจะถูกกำจัดออกไปทางด้านบนของเครื่อง

2.1.4.2 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning

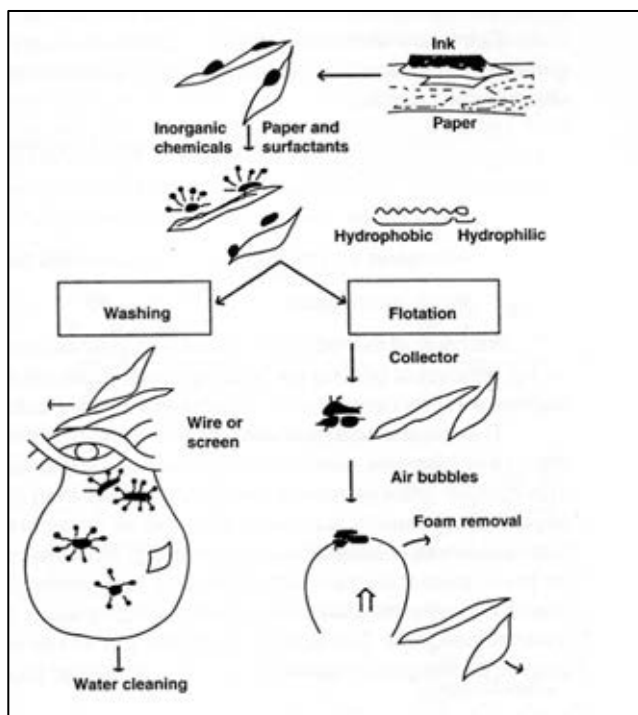
เป็นการกำจัดสิ่งปลอมปนที่มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ เช่น ททราย แก้ว หรือชิ้นส่วนโลหะ ด้วยเครื่อง Centrifugal cleaner เช่นกัน หากแต่เป็นแบบ Centrifugal forward cleaner ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ เส้นใยที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าจะถูกแยกออกไปทางด้านบนของเครื่อง ส่วนสิ่งปลอมปนจะเหวี่ยงไปชนกับผนัง และหลุดออกไปทางด้านล่างของเครื่อง

2.1.5 การกำจัดหมึกพิมพ์ออก (Deinking)

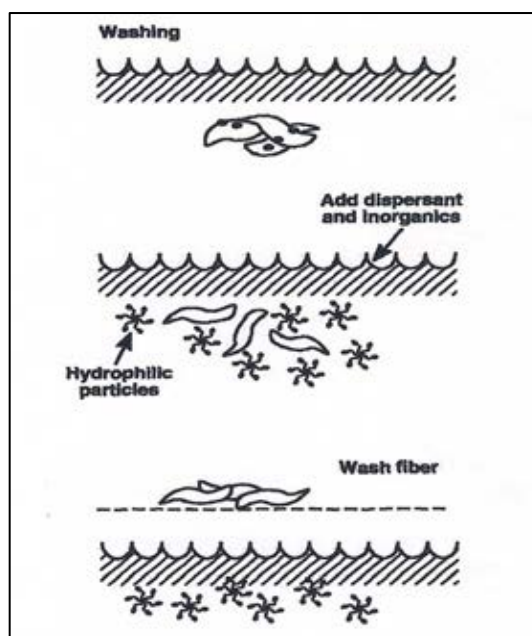
เป็นขั้นตอนการแยกหมึกพิมพ์และสิ่งปลอมปนอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตหรือต่อสมบัติกระดาษ ออกจากเส้นใย การกำจัดหมึกพิมพ์นั้นควรเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับชนิดของหมึก เพราะหากใช้วิธีการกำจัดหมึกที่ไม่เหมาะสมกับชนิดของหมึก อาจส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีค่าความขาวสว่าง (Brightness) ต่ำและเกิดจุดสกปรก (Dirt speck) การกำจัดหมึกโดยทั่วไปมี 2 วิธี คือการล้างและการลอยฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-4 โดยอาจเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรืออาจใช้ 2 วิธีร่วมกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหมึกและสิ่งปลอมปนเป็นหลัก

2.1.5.1 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง (Washing or washing deinking)

เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกที่เหมาะสมกับหมึกพิมพ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร และมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น หมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทฐานน้ำ และหมึกเฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ โดยหลังจากแยกอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยในขั้นตอนการตีเยื่อแล้ว นำเยื่อที่ได้ไปล้างเพื่อให้อนุภาคของหมึกหลุดลอดผ่านตะแกรงออกไปกับน้ำที่ทำหน้าที่เป็นตัวพา ดังแสดงในภาพที่ 2-5 โดยขนาดของตะแกรงต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากเส้นใยอาจหลุดลอดออกไปกับหมึกด้วย ทั้งนี้จะมีการใส่สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ประเภทสารช่วยกระจาย (Dispersant) เพื่อช่วยกระจายหมึกพิมพ์ให้ยังแขวนลอยอยู่ในน้ำ และป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์ย้อนกลับไปติดที่เส้นใย ทำให้สามารถกำจัดหมึกพิมพ์ออกไปได้



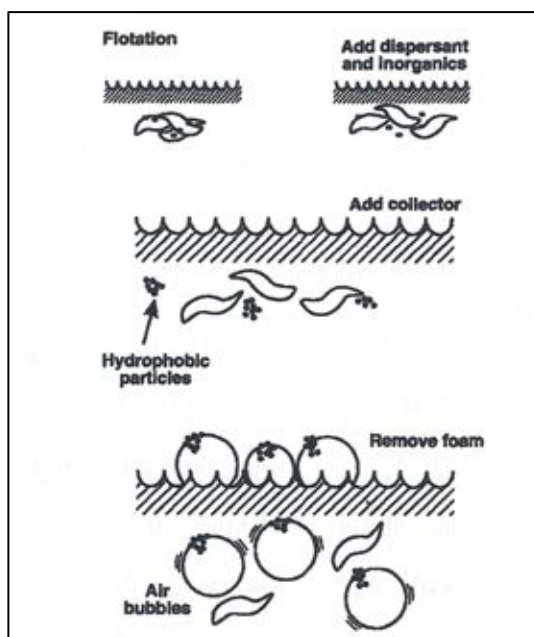
ภาพที่ 2-4 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้างและการลอยฟองอากาศ [1]



ภาพที่ 2-5 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง [2]

2.1.5.2 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation or flotation deinking)

เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกที่เหมาะสมกับหมึกพิมพ์ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครเมตร และมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น หมึกพิมพ์โทนเนอร์ และหมึกที่แห้งตัวด้วยยูวี โดยหลังจากแยกอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยในขั้นตอนการตีเยื่อแล้ว นำเยื่อไปแยกอนุภาคของหมึกให้ออกมาจากเส้นใยโดยอาศัยเครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell) ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ทั้งนี้จะมีการใส่สารลดแรงตึงผิวประเภทสารรวบรวม (Collector) เพื่อให้อนุภาคของหมึกมีสมบัติไม่ชอบน้ำและมารวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่พอที่จะถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ โดยการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำของเครื่องลอยฟองอากาศ ข้อดีของการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ คือ วิธีการลอยฟองอากาศใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าและให้ผลผลิตของเยื่อกระดาษสูงกว่าวิธีการล้าง



ภาพที่ 2-6 การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ [2]

2.1.6 การกระจายหมึกพิมพ์ (Dispersion)

เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกที่ไม่ใช่การกำจัดหมึกอย่างแท้จริง แต่เป็นการทำให้อนุภาคของหมึกหรือสิ่งปลอมปนอื่นๆ กระจายตัวเป็นอนุภาคที่เล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ดังนั้นค่าความขาวสว่างโดยรวมจึงมีค่าลดลง แต่ปริมาณหมึกและสิ่งปลอมปนที่มีอยู่ยังคงเท่าเดิม ขั้นตอนนี้เหมาะกับหมึกพิมพ์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เช่น หมึกพิมพ์โทนเนอร์ และหมึกที่แห้งตัวด้วยยูวี เป็นต้น

2.1.7 การฟอกเยื่อ (Bleaching)

เป็นขั้นตอนการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้วให้สูงขึ้น โดยผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อและสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

2.1.8 การเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water recirculation)

เป็นขั้นตอนการนำน้ำที่ผ่านการใช้งานในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการกำจัดหมึก มาปรับสมบัติต่างๆ เช่น ค่าความเป็นกรด-เบส ให้มีค่าที่เหมาะสมเพื่อที่จะเวียนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการกำจัดหมึกอีกครั้ง

2.2 เคมีของการลอยฟองอากาศ (Deinking chemistry)

การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ

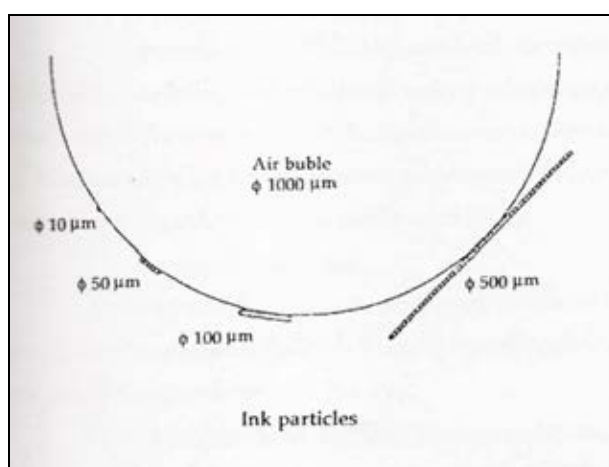
- การแยกอนุภาคของหมึกออกจากเส้นใย ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ
- การรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทสารรวบรวม ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อและขั้นตอนการลอยฟองอากาศ
- การที่กลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์เกาะติดไปกับฟองอากาศ ก่อนจะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดต่อไป ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการลอยฟองอากาศ

ดังนั้นการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อเกิดสิ่งต่างๆ ดังนี้

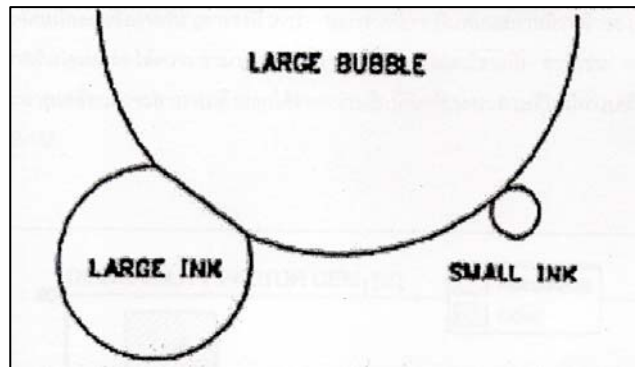
- อนุภาคของหมึกพิมพ์ชนกับฟองอากาศ

- การชนกันของอนุภาคหมึกและฟองอากาศต้องทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่ระหว่างผิวหน้าของอนุภาคหมึกและฟองอากาศหมดไป
- อนุภาคของหมึกและฟองอากาศต้องไม่ผลักรัน
- อนุภาคของหมึกต้องมีความไม่ชอบน้ำ เพื่อให้ยึดติดกับฟองอากาศได้
- ฟองอากาศต้องมีความแข็งแรงพอที่จะชนะแรงกระทำต่อมัน เพื่อที่จะพาอนุภาคหมึกที่เกาะติดอยู่ลอยสู่ผิวหน้าเครื่องลอยฟองอากาศได้ ซึ่งแรงกระทำที่กระทำต่อฟองอากาศ เช่น แรงดึงดูดของโลก (Gravity force) แรงต้านทานเนื่องจากความหนืด (Viscous drag) เป็นต้น เป็นแรงที่พยายามแยกอนุภาคของหมึกและฟองอากาศออกจากกัน [3]

การยึดติดกันระหว่างอนุภาคหมึกและฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณขนาด และรูปร่างของทั้งอนุภาคหมึกและฟองอากาศ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะต้องมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในภาพที่ 2-7 กล่าวคือ ถ้ามีจำนวนอนุภาคหมึกและฟองอากาศมาก จะทำให้โอกาสการชนกันมีมาก รวมทั้งฟองอากาศที่มีขนาดเล็กก็จะสามารถยึดติดกับอนุภาคหมึกที่มีขนาดเล็กได้ดี ในขณะที่ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะสามารถยึดติดได้กับอนุภาคหมึกทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 2-8 แต่ระบบที่ใช้ฟองอากาศขนาดใหญ่จะให้พื้นที่ผิวในการชนกับอนุภาคหมึกน้อยกว่าระบบที่ใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้ระบบการลอยฟองอากาศที่ใช้ฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการชนกันระหว่างอนุภาคหมึกขนาดเล็กกับฟองอากาศ [4]



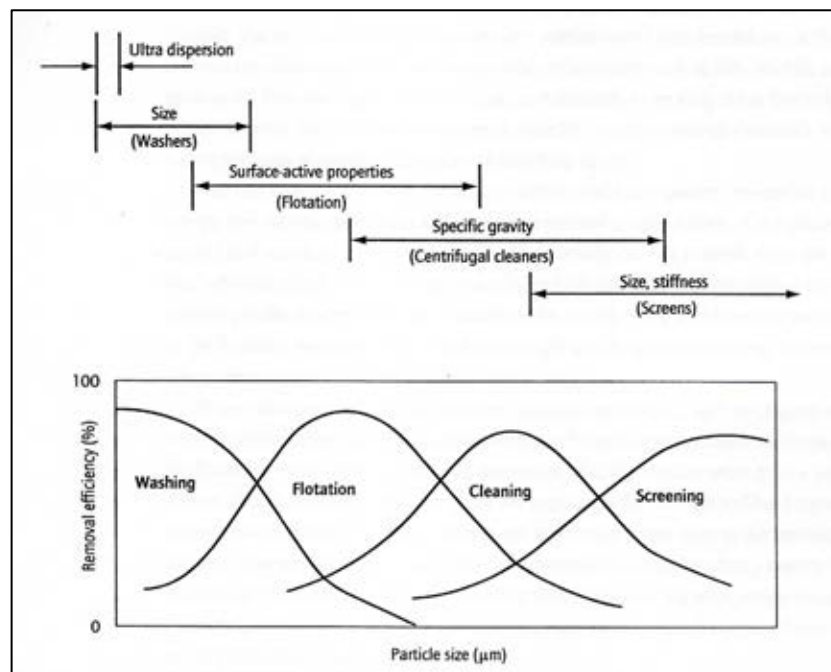
ภาพที่ 2-7 การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของหมึกขนาดต่างๆ กับฟองอากาศ [4]



ภาพที่ 2-8 การชนกันของฟองอากาศขนาดใหญ่กับอนุภาคหมึก [5]

2.2.1 ความสำคัญของขนาดอนุภาคหมึก

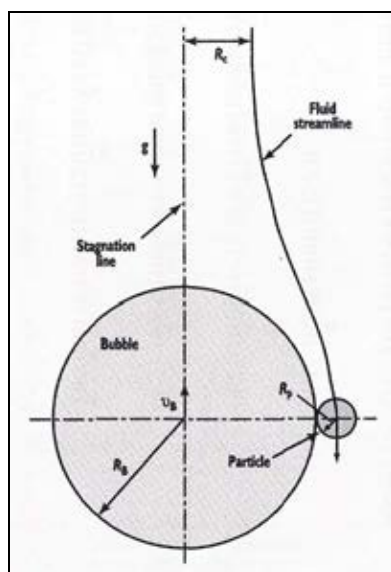
ขนาดของอนุภาคหมึกที่เหมาะสมต่อวิธีการกำจัดหมึกพิมพ์แบบการลอยฟองอากาศ จะอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหมึกพิมพ์และวิธีที่ใช้ในการกำจัด [6]

โดยถ้าหากอนุภาคของหมึกมีขนาดใหญ่เกินไป เมื่อเทียบกับขนาดฟองอากาศ เมื่อเกิดสภาพปั่นป่วน (Turbulence) ที่สูงภายในเครื่องลอยฟองอากาศ จะทำให้อนุภาคหมึกหลุด

ออกจากฟองอากาศก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไป แต่ ถ้าขนาดของอนุภาคหมีกเล็กเกินไป โอกาสที่จะเกิดการชนกันระหว่างอนุภาคหมีกและฟองอากาศ ก็จะลดลง เนื่องจากอนุภาคหมีกจะไหลไปตามแนวเส้นกระแส (Streamline) ที่อยู่รอบฟองอากาศ มากกว่าที่จะชนกับฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 การไหลของอนุภาคหมีกตามแนวเส้นกระแส [7]

2.2.2 ความสำคัญของขนาดฟองอากาศ

ขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสมเป็นเรื่องสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมีกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.3 มิลลิเมตร จะมีแรงพยุงตัว (Buoyancy force) มากพอที่จะดันตัวเองผ่านเครือข่ายของเส้นใย (Fiber network) ได้ดี ในขณะที่ฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร จะมีแรงพยุงตัวน้อยจึงมีแนวโน้มที่จะถูกกักอยู่ในเครือข่ายของเส้นใย โอกาสที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศจึงน้อย แต่ถ้าหากสามารถลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ก็จะไปเกาะติดกับเส้นใยหรือพาเส้นใยสั้น (Fines) ลอยติดไปด้วย ส่งผลให้เส้นใยถูกกำจัดออกไปที่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศพร้อมกับฟองอากาศด้วย ปริมาณผลผลิตที่ได้จึงลดลง ซึ่งโดยทั่วไปตามทฤษฎีแล้วขนาดของฟองอากาศต่ออนุภาคของหมีกพิมพ์ที่เหมาะสมคือ 5:1 [8]

2.2.3 ความสำคัญของการผสม

การผสมถือเป็นส่วนสำคัญ เนื่องจากส่งผลต่ออัตราการชนกันระหว่างอนุภาคของหมึก และฟองอากาศ ความเร็วและความแรงของการผสมจึงต้องมีความเหมาะสม โดยหากความเร็วหรือความแรงของการผสมมากเกินไป อาจทำให้ฟองอากาศแตก และจะทำให้อนุภาคของหมึกกับฟองอากาศแยกออกจากกัน รวมทั้งจะทำให้อนุภาคของหมึกที่เกาะกลุ่มกันอยู่เกิดการกระจายตัวหรือแตกออกจากกัน

2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ (Deinking chemicals)

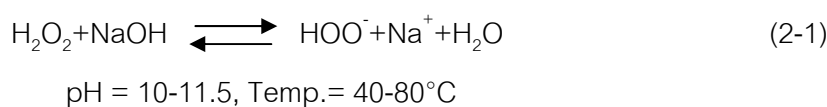
การเลือกใช้สารเคมีสำหรับกระบวนการกำจัดหมึกนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมต่อกระดาษ ระบบการพิมพ์ ชนิดของหมึกพิมพ์ ขั้นตอน หรือวิธีการที่ใช้กำจัดหมึกพิมพ์ รวมทั้งคุณภาพของเยื่อที่ต้องการภายหลังการดึงหมึกออก แต่ส่วนสำคัญที่สุดที่ควรคำนึงถึงคือ สารยึด (Binder) ซึ่งทำหน้าที่ยึดสารสีหรือสารย้อมในหมึกให้เกาะติดกับกระดาษ โดยสารเคมีที่ใส่ไปจะเป็นตัวที่ทำปฏิกิริยากับสารยึดดังกล่าว เพื่อให้อนุภาคหมึกหลุดออกจากผิวหน้าของกระดาษ [9] ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษ ได้แก่

2.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ คอสดิกโซดา (Caustic soda) มักใส่ในขั้นตอนการตีกระดาษเยื่อหรือการฟอกเยื่อ เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-เบสของน้ำเยื่อให้อยู่ในช่วงความเป็นด่าง (pH 9.5-11.0) รวมทั้งเพื่อไปละลายสารยึดหรือเรซินของหมึก และทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัวและรับน้ำมากขึ้น มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เส้นใยจะเกิดการเสียดสีกันทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกจากเส้นใยได้ง่ายยิ่งขึ้น รวมทั้งยังทำให้อนุภาคของหมึกเกิดการกระจายตัว ไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ทำให้กำจัดออกได้ยากด้วยวิธีการล้าง นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต้องอาศัยสภาวะความเป็นด่างในการทำปฏิกิริยาได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลแอนไฮออน (OOH^-) ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาหรือเป็นตัวฟอกเยื่อที่แท้จริง (Active bleaching agent) อย่างไรก็ตามการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปในเยื่อเชิงกลจะทำให้เยื่อเกิดสีเหลืองและคล้ำ หรือเรียกว่าการเกิดปฏิกิริยา Alkali darkening ทำให้ความขาวสว่างของเยื่อที่ได้ลดลง ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมกับเยื่อเชิงกลควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และเยื่อเคมีควรอยู่ในช่วงร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารฟอกเยื่อซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างสูงขึ้น รวมทั้งยังช่วยทำลายสารยึดจำพวกอัลคิดีเรซิน (Alkyd resin binder) ซึ่งมักใช้กับหมึกออฟเซต การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น จะเริ่มจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับไฮเดียมไฮรอกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2-1 ได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลแอนไอออน (OOH⁻) ซึ่งเป็นสารฟอกเยื่อที่แท้จริง

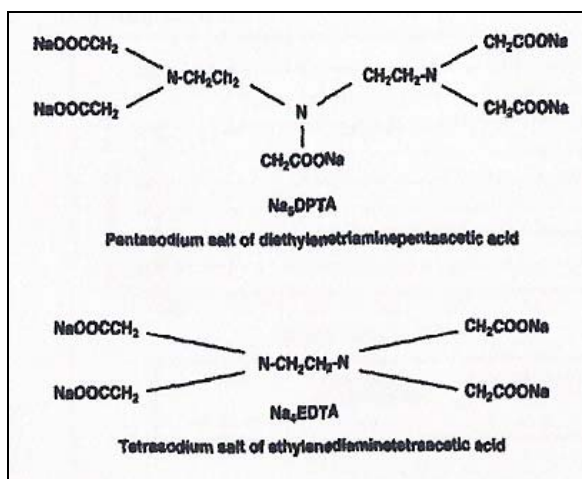


ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่มีไอออนของโลหะหนัก เช่น แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น รวมทั้งการมีเอนไซม์จำพวกตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalase) ในระบบ หรือในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด-เบสหรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป การป้องกันการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำได้โดยการเติมสารประเภทสารคงสภาพ (Stabilizing agents) เช่น สารจับโลหะหนัก (Chelating agents or chelants) และไฮเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) เป็นต้น ทั้งนี้สารคงสภาพไม่ได้ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่สลายตัว แต่จะไปคงสภาพระบบที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.3 สารจับโลหะหนัก (Chelating agents or chelants)

สารจับโลหะหนักมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อเพื่อจับไอออนของโลหะ โดยจะทำปฏิกิริยาและสร้างสารประกอบที่ละลายได้ (Soluble complexes) กับโลหะหนัก ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้ไอออนของโลหะไปกระตุ้นปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ชนิดของสารจับโลหะหนักที่นิยมใช้ในกระบวนการกำจัดหมึก ได้แก่ DTPA (Diethylenetriaminepenta acetic acid) และ EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2-11

เนื่องจาก DTPA มี 5 แขน จึงทำให้สามารถจับโลหะหนักได้ดีกว่า EDTA โดยการความสามารถในการจับโลหะหนักของ DTPA สามารถเรียงลำดับจากง่ายไปยากได้ดังนี้ $\text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mn}^{3+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ ปริมาณการใช้สารจับโลหะหนักที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.15-4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างของ DTPA และ EDTA [10]

2.3.4 โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการฟอกเยื่อ เพื่อจับโลหะโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์กับโลหะ รวมทั้งยังช่วยให้หมึกเกิดการกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งจะช่วยสำหรับการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้าง และยังช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของหมึกกลับมาติดที่เส้นใย นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตยังทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความปั่นป่วน และเป็น pH buffer จึงใช้งานได้ดีกับเยื่อเชิงกล เพราะจะทำให้ลดปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลให้เยื่อเชิงกลเกิดสีคล้ำได้ ปริมาณโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 1-3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.5 สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerating chemicals)

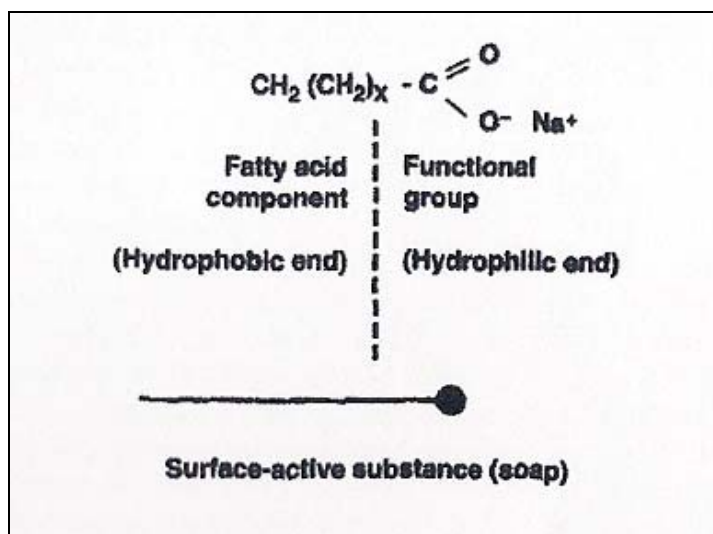
สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่มมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกรองเยื่อ หรือการทำความสะอาดเยื่อ เพื่อให้หมึกที่มีขนาดใหญ่ เช่น หมึกโทนเนอร์ รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการตีกระจายเยื่อเป็นเวลานานอาจทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายได้ ส่วนการตีกระจายเยื่อที่ไม่เพียงพอ ก็จะทำให้อนุภาคของหมึกใหญ่เกินไปที่จะกำจัดออกด้วยวิธีการล้างหรือ

การลอยฟองอากาศ แต่ก็จะเลิกไปสำหรับการกำจัดออกด้วยวิธีการกรองหรือการทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นการใส่สารนี้จึงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มให้หมึกรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น จนสามารถถูกกำจัดด้วยออกด้วยวิธีการกรองหรือการทำความสะอาดเยื่อแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้

2.3.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)

สารลดแรงตึงผิวมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ การกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้างหรือการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยสารลดแรงตึงผิวเป็นคำรวมที่ใช้เรียกสารครอบคลุมตั้งแต่ สารกระจาย (Dispersants) สารรวบรวม (Collectors) สารเปียกผิว (Wetting agents) และสารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวม (Displectors) ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ดังแสดงในภาพที่ 2-12 โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะประกอบด้วยคาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) ซึ่งโครงสร้างอาจเป็นได้ทั้งแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branch) และแบบอิ่มตัว (Saturated) หรือแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated) สำหรับส่วนที่ไม่ชอบน้ำสามารถแบ่งได้เป็น แบบไม่มีขั้ว (Non-ionic surfactants) และแบบมีขั้ว (Ionic surfactants) ซึ่งจะมีทั้งแบบประจุบวก (Cationic) ประจุลบ (Anionic) และแบบที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ด้วยกัน (Amphoteric) ในกระบวนการกำจัดหมึกออกโดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้สารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้ว เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี มีความเป็นอิสระจากค่าความเป็นกรด-เบส และความกระด้างของน้ำ (Water hardness)

สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้มีการเปียกผิวเพิ่มขึ้น และจะช่วยให้อนุภาคของหมึกมีการกระจายตัวดีขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกดีขึ้น แต่ถ้าหากใส่สารลดแรงตึงผิวมากเกินไป จะส่งผลให้เกิดฟองอากาศมาก ทำให้อัตราส่วนระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคหมึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศลดลงรวมทั้งผลผลิตที่ได้ (Yield) ก็ลดลงด้วย ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2-2.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งปริมาณที่ใช้จะขึ้นกับชนิดของสารลดแรงตึงผิวและวิธีการกำจัดหมึกออกเป็นสำคัญ



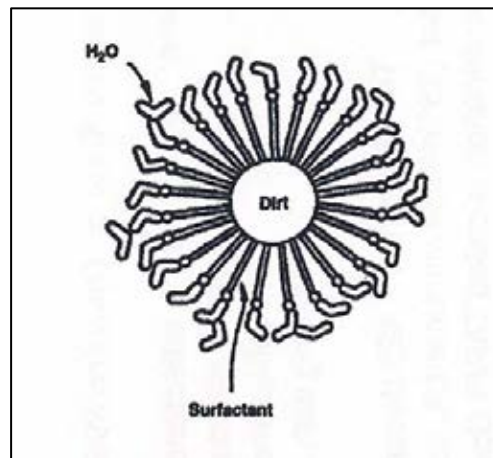
ภาพที่ 2-12 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [2]

2.3.7 สารกระจาย (Dispersants)

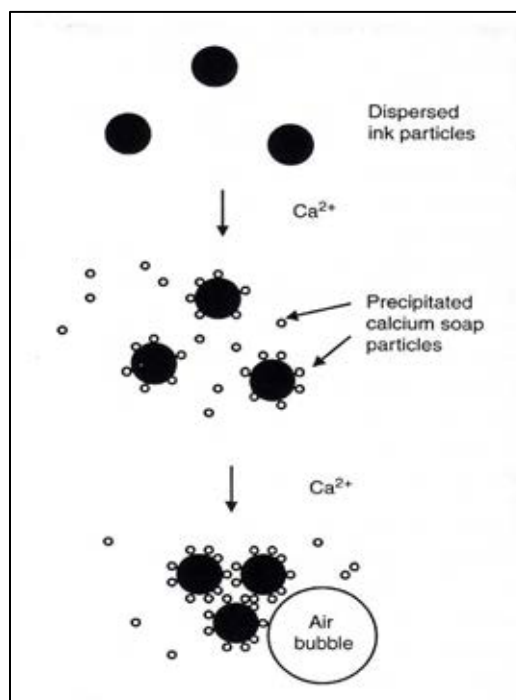
สารกระจายมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อหรือการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการล้าง เพื่อให้อนุภาคหมึกกระจายตัว และมีสมบัติชอบน้ำ โดยสารกระจายจะไปจับกับอนุภาคของหมึกในลักษณะของ Micelle ดังแสดงในภาพที่ 2-13 ทำให้ง่ายต่อการกำจัดออกด้วยวิธีการล้าง ปริมาณสารกระจายที่ใช้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2-2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.3.8 สารรวบรวม (Collectors)

สารรวบรวมมักใส่ในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ หรือการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ เพื่อให้อนุภาคหมึกเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น และมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จากนั้นกลุ่มก้อนของหมึกก็จะไปสัมผัสกับฟองอากาศ และถูกกำจัดออกไปบริเวณผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2-14 นอกจากนี้สารรวบรวมยังช่วยปรับปรุงแรงตึงผิวของฟองอากาศ ทำให้มีความแข็งแรงมากพอที่จะสามารถพาอนุภาคของหมึกลอยสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดออกไปได้



ภาพที่ 2-13 ลักษณะของ Micelle [10]



ภาพที่ 2-14 ลักษณะการทำงานของสารรวบรวม [1]

2.3.9 สารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวม (Displectors)

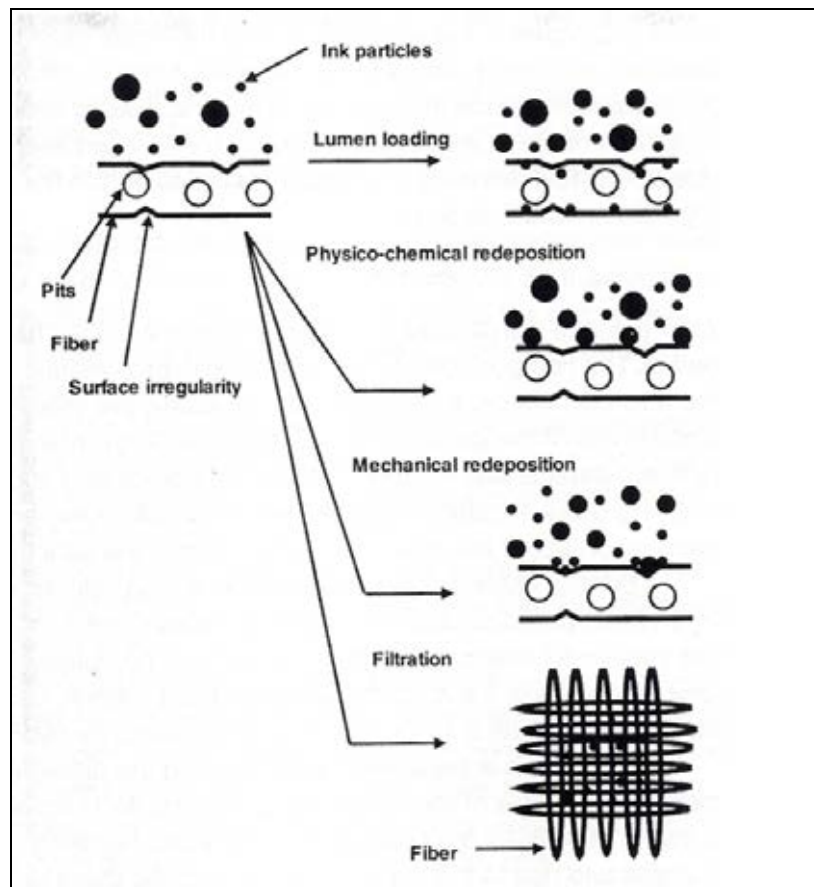
สารกึ่งกระจายกึ่งรวบรวมสามารถใช้ได้ทั้งกับการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้างและวิธีการลอยฟองอากาศ นั่นคือ เป็นสารที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกออกแบบ

ผสม ซึ่งคำว่า Displectors มาจากการรวมคำระหว่าง Dispersants และ Collectors โดยสารชนิดนี้จะทำให้อนุภาคของหมึกมีแรงยึดเกาะกับฟองอากาศได้ดีในการกำจัดหมึกออกแบบการลอยฟองอากาศ ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้อนุภาคของหมึกมีความชอบน้ำมากพอที่จะไม่ย้อนกลับไปติดที่เส้นใย นอกจากนี้สารนี้ยังทนต่อน้ำกระด้างและช่วยไม่ให้เครื่องมือที่ใช้เกิดตะกรัน (Scaling)

2.4 การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก (Ink redeposition)

อนุภาคของหมึกที่หลุดออกจากเส้นใยและกระจายตัวอยู่มีโอกาสที่จะย้อนกลับมาติดที่เส้นใยอีกครั้งได้ หากการกระจายตัวนั้นไม่เสถียรพอ โดยการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ การย้อนกลับไปติดที่ช่องว่างตรงกลางของเส้นใย (Lumen loading) การย้อนกลับไปติดที่ผิวหน้าของเส้นใยแบบเชิงเคมี (Chemical redeposition) การย้อนกลับไปติดที่ผิวหน้าของเส้นใยแบบเชิงกล (Mechanical redeposition) และการที่อนุภาคหมึกเข้าไปติดในเครือข่ายของเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 2-15

การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ จะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อลดลง จากงานวิจัยของ Ben และคณะ [11] ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อที่มีผลต่อการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเร็วในการตีกระจายเยื่อ เวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ เวลาในการเก็บเยื่อ และพลังงานจำเพาะ (Specific energy) ที่ใช้ในการตีเยื่อ โดยกระดาษที่ใช้ในการทดลองนี้คือกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลและผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟี หลังจากนำกระดาษมาตีกระจายแล้ว แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไปผ่านการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการล้างแบบ Hyperwashing โดยจะล้างด้วยน้ำหลายๆ รอบจนกระทั่งน้ำที่ได้ภายหลังจากการล้าง (Filtrate) มีลักษณะใส ซึ่งการล้างแบบนี้จะทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอนุภาคของหมึกที่ยังคงเหลือติดอยู่กับเส้นใยอย่างแท้จริง คือ ถ้าหากมีปริมาณหมึกที่ยังเหลืออยู่ภายหลังจากการล้างมีค่าสูง หมายถึงมีการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกสูง ซึ่งผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณหมึกและระยะเวลาในการตีกระจายเยื่อสูงขึ้น ทำให้มีปริมาณหมึกที่ยังเหลืออยู่มากขึ้น รวมทั้งการใช้ความเข้มข้นของเยื่อและความเร็วในการตีกระจายเยื่อที่สูง จะส่งผลให้การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกเกิดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการตีกระจาย ความเข้มข้นของเยื่อ และความเร็วในการตีกระจายเยื่อสูง จะทำให้อนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กลงมาก จึงมีโอกาที่จะการย้อนกลับไปติดที่เส้นใยได้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกจะย้อนกลับไปติดที่ช่องว่างตรงกลางของเส้นใยมากกว่าที่ผิวหน้าของเส้นใย



ภาพที่ 2-15 ลักษณะการย้อนกลับไปที่เส้นใยของหมึก [1]

2.5 ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก (Deinkability)

ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก เป็นการบอกถึงระดับในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกด้วยกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ โดยวัดจากสมบัติเชิงแสง เช่น ค่าความขาวสว่าง ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถหรือประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกจากตัวหมึกพิมพ์ ได้แก่ กระบวนการที่ใช้ในการพิมพ์ วัสดุที่นำมาพิมพ์ อายุการเก็บสิ่งพิมพ์ สภาวะในการพิมพ์ทั้งเชิงเคมีและเชิงกล อย่างไรก็ตาม ตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก คือ สภาพผิวหน้าของกระดาษและสมบัติของหมึกพิมพ์ โดยกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมักจะดึงหมึกออกได้ง่ายกว่ากระดาษที่ผ่านการเคลือบผิว ในขณะที่หมึกพิมพ์แต่ละชนิดจะใช้กระบวนการพิมพ์ที่ต่างกัน รวมทั้งใช้ระบบการแห้งตัวที่ต่างกัน จึงส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการพิมพ์ กลไกการแห้งตัว และความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก [12]

ระบบการพิมพ์	กลไกการแห้งตัว	ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก
-ออฟเซตสำหรับการพิมพ์หนังสือพิมพ์ -เลตเตอร์เพรส -ออฟเซตแบบป้อนแผ่น -ออฟเซตแบบแห้งตัวด้วยความร้อน	การดูดซึม (และออกซิเดชัน) การดูดซึม (และออกซิเดชัน) การดูดซึม และออกซิเดชัน การดูดซึม การระเหย และออกซิเดชัน	กำจัดหมึกออกได้ดี ถ้าไม่มีการเก็บ หากมีการเก็บ หมึกจะหลุดออกไม่ดี เกิดเป็นรอยเปื้อนหมึก และเป็นจุดหมึก
โรโตกราเวียร์	การระเหย	กำจัดหมึกออกได้ดี แต่มีโอกาสที่เยื่อจะเกิดสี ซึ่งเกิดจากสีย้อม
เฟล็กโซกราฟี	การระเหย	ถ้าเป็นหมึกฐานน้ำจะกำจัดหมึกออกได้ไม่ดีในสภาวะที่เป็นต่าง
เครื่องพิมพ์เลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสาร (UV และ IR)	การฉายรังสี	หมึกโทเนอร์หลุดออกยาก และเกิดเป็นจุดหมึกมาก

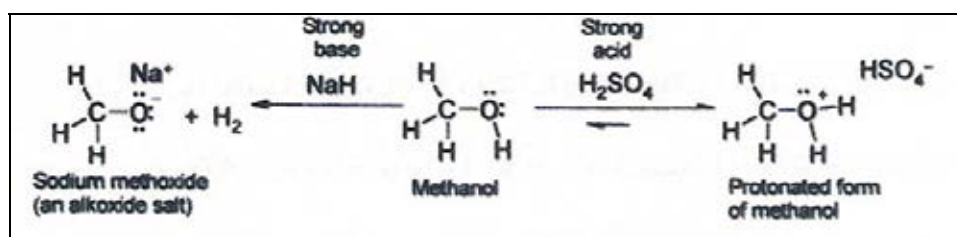
2.6 แอลกอฮอล์ และเฮปทานอล (Alcohol and heptanol)

2.6.1 แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เชื่อมต่อกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะเชื่อมอยู่กับคาร์บอนอะตอมอื่นหรืออะตอมของไฮโดรเจน แอลกอฮอล์มีสูตรทางเคมีคือ $C_nH_{2n+1}OH$ โดยหมู่ไฮดรอกซิลทำให้โมเลกุลของแอลกอฮอล์มีขั้ว ซึ่งหมู่ดังกล่าวสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับแอลกอฮอล์โมเลกุลอื่นหรือสารประกอบอื่นๆ ได้ แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายอินทรีย์เนื่องจากสมบัติที่มีพันธะไฮโดรเจนที่สูงของตัวทำละลายประเภทแอลกอฮอล์ จึงสามารถละลายสารประเภทพอลิเมอร์และเรซินได้ดี แอลกอฮอล์ที่มีลักษณะเป็นโซ่เปิด และมีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำ (มีคาร์บอน 1-10 อะตอม) จะมีลักษณะเป็นของเหลวและใสที่อุณหภูมิห้อง และมีสมบัติการละลายน้ำแตกต่างกันไปโดยขึ้นกับจำนวนอะตอมของคาร์บอน โดยในสายของแอลกอฮอล์จะมีสมบัติการละลาย 2 อย่างที่ขัดแย้งกัน คือ หมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้วจะมี

ความชอบน้ำ แต่สายของคาร์บอนจะมีความไม่ชอบน้ำ แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 4 อะตอม จึงค่อนข้างละลายน้ำได้ดี เนื่องจากความมีขั้วของหมู่ไฮดรอกซิลสามารถชนะสายคาร์บอนที่สั้นได้ ในขณะที่แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 4 อะตอม มีแนวโน้มที่จะละลายน้ำได้ยาก และเมื่อมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมากกว่า 12 อะตอม แอลกอฮอล์จะมีลักษณะเป็นของแข็งและไม่สามารถละลายน้ำได้ [13, 14]

แอลกอฮอล์มีสมบัติที่คล้ายน้ำ คือ สามารถแสดงสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและด่าง โดยแอลกอฮอล์สามารถทำหน้าที่เป็นกรดอ่อนทำปฏิกิริยากับด่างแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือเป็นด่างอ่อนทำปฏิกิริยากับกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 การแสดงสมบัติความเป็นกรดและด่างของแอลกอฮอล์ [13]

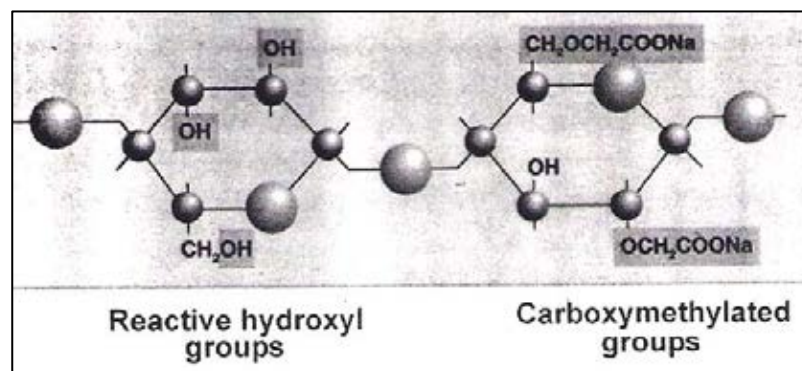
แอลกอฮอล์เป็นสารที่ใช้โดยทั่วไปในการคัดแยกแร่ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ (Mineral flotation) โดยทำหน้าที่เป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดฟอง (Frothers) สำหรับการกระบวนกรำกำจัดหิมิกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ แอลกอฮอล์จะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้ว รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นสารช่วยทำให้เกิดฟอง สารรวบรวม (Collectors) และเป็นตัวทำละลายหิมิกเฟล็กโซกราไฟฐาน้ำ [15]

2.6.2 เฮปทานอล

เฮปทานอล หรือ เฮปทิลแอลกอฮอล์ (Heptyl alcohol) เป็นแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 7 อะตอม มีสูตรทางเคมี คือ $CH_3(CH_2)_6OH$ มีน้ำหนักโมเลกุล 116.20 เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ละลายน้ำได้น้อย สามารถละลายได้ 0.2 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ไม่เข้ากันกับอีเทอร์ (Ether) หรือเอทานอล (Ethanol) มี 4 ไอโซเมอร์ (Isomer) โดยต่างกันที่ตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล เฮปทานอลใช้มากในทางการแพทย์ หรือในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น น้ำหอม [15, 16]

2.7 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ CMC เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีหมู่คาร์บอกซีเมทิล (-CH₂-COOH) มาแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 การแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล [17]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถสังเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยาเร่งด้วยอัลคิล (Alkyl-catalyzed) ของเซลลูโลสด้วยกรดมอนอคลอโรอะซิติก (Monochloroacetic acid, MCA) ในสารละลายต่าง (Aqueous alkali) โดยเริ่มจากปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้เป็นอัลคาไลเซลลูโลส (Alkali cellulose) จากนั้นจึงไปทำปฏิกิริยาต่อกับ MCA ในรูปของ free acid หรือ ในรูปเกลือโซเดียม NaMCA ดังแสดงในสมการที่ 2-2



คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารให้ประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) โดยทั่วไปเส้นใยจะดูดซับได้ยาก เนื่องจากมีประจุลบเช่นเดียวกัน จึงจะเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าขึ้น แต่มีการศึกษาอิทธิพลการดูดซับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสของเส้นใยที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเส้นใยจะสามารถดูดซับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [18] นอกจากนี้การดูดซับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสของเส้นใยยังขึ้นกับชนิดของเส้นใยหรือเยื่อด้วย

เมื่อมีการดูดซับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เส้นใย จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ โดยการศึกษาของ Watanabe และคณะ [18] ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ส่งผลต่อการกักเก็บสารเคมีชนิดอื่นของเส้นใย พบว่า การใส่คาร์บอกซีเมทิล

เซลลูโลสลงในเยื่อก่อนการใส่สารเคมีชนิดอื่นๆ เช่น สารกันซึมชนิดโรซิน (Rosin sizing agents) สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษแห้ง (Dry strength additives) และสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษเปียก (Wet strength additives) ส่งผลให้กระดาษสามารถกักเก็บสารเคมีดังกล่าวได้ดีขึ้น นอกจากนี้การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสยังทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีต่างๆ ได้ เนื่องจากการกักเก็บสารเคมีที่ดีขึ้นของเส้นใย โดยคณะนักวิจัยวิเคราะห์ว่าทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้ประจุลบในระบบเพิ่มมากขึ้น และเกิดการกระจายตัวของประจุลบดีขึ้น ทำให้สามารถกักเก็บสารเคมีต่างๆ ซึ่งมีประจุบวกได้ดี และทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารเคมีต่างๆ สูงขึ้น

สำหรับการประยุกต์ใช้งานนั้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการใช้ในรูปของสารปรับปรุงความเหนียวในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ในสีฐานน้ำ ผงซักฟอก และในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยในการใช้งานเป็นผงซักฟอกนั้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะทำให้เส้นใยของผ้าเกิดประจุลบ ช่วยให้อนุภาคของดินหรือสิ่งสกปรกหลุดออกมาจากผ้า และกระจายตัวอยู่ในน้ำ [19]

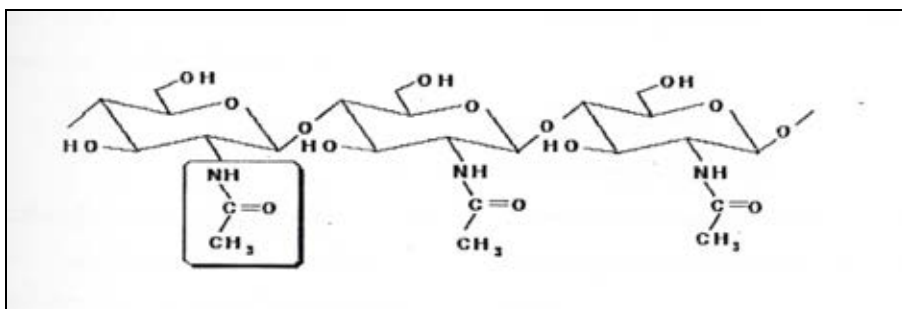
2.8 ไคติน และไคโทซาน (Chitin and chitosan)

2.8.1 ไคติน

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบมากที่สุดเป็นอันดับที่สองรองจากเซลลูโลส (Cellulose) โดยพอลิเมอร์ทั้งสองทำหน้าที่เป็นโครงสร้างในการป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งไคตินจะพบมากในโครงสร้างเปลือกภายนอกของสัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู ปลาหมึก และหอย เป็นต้น รวมทั้งยังพบในเปลือกแข็งของสัตว์จำพวกแมลง และในผนังเซลล์ของพืช เห็ด รา และสาหร่ายบางชนิด [20]

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นตรงและคล้ายเซลลูโลส ดังแสดงในภาพที่ 2-18 แต่จะมีความแตกต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 โดยของไคตินจะเป็นหมู่ Acetylated amino (NH-CO-CH_3) แต่ของเซลลูโลสจะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose และมีสูตรทั่วไปเป็น $(\text{C}_8\text{H}_{13}\text{NO}_5)_n$ ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 [21] จากสูตรโครงสร้างของไคตินพบว่า เป็นสารโมเลกุลยาวไม่มีประจุ (Non-electrolytic polymer) ทำให้ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายทั่วไป การใช้งานไคตินจึงไม่เป็นที่แพร่หลาย

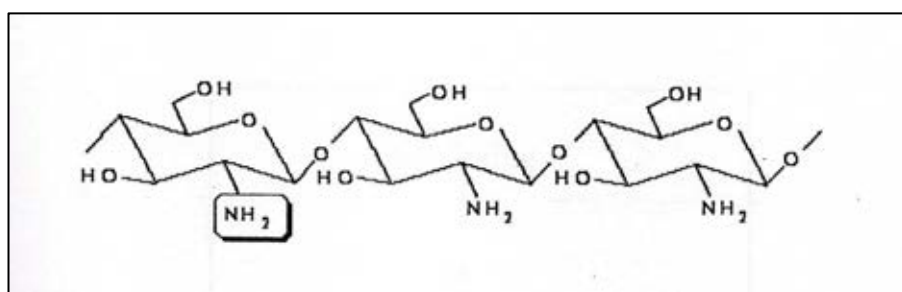
แต่ไคตินสามารถนำมาดัดแปรด้วยวิธีการทางเคมีเปลี่ยนไคตินเป็นไคโทซาน เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2-18 โครงสร้างของไคติน [22]

2.8.2 ไคโทซาน

ไคโทซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน มีชื่อทางเคมีว่า poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] มีสูตรเคมี คือ $(C_6H_{11}NO_4)_n$ ไคโทซานผลิตได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่แอซิติล (-CO-CH₃) ของไคติน หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยา deacetylation โดยแซ่ไคตินในสารละลายต่างเข้มข้นซึ่งทำให้โครงสร้างของไคตินเปลี่ยนไป โดยที่หมู่ Acetamido (-NHCOCH₃) จะเปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโน (-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 โครงสร้างของไคโทซาน ดังแสดงในภาพที่ 2-19 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไคโทซาน ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของด่าง สภาพวะในการผลิตไคติน บรรยากาศและอัตราส่วนของไคตินต่อสารละลายต่างเข้มข้น [23]



ภาพที่ 2-19 โครงสร้างของไคโทซาน [22]

ไคโทซานเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เกือบทั้งหมด รวมถึงน้ำที่มีค่า pH เป็นกลางหรือด่าง แต่สามารถละลายได้ในกรดอ่อน เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลายกรดอะซิติก และกรดเกลือ จึงทำให้มีการใช้งานมากกว่าไคติน เมื่อพิจารณาจาก สูตรโครงสร้างของไคโทซานพบว่า ไคโทซานสามารถมีประจุบวกบนหมู่อะมิโน และอาจเรียกได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (Cationic polymer) นอกจากนี้ไคโทซานยังเป็นสาร Polyelectrolyte ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ รวมถึงไอออนโลหะ จึงถูกใช้ทำหน้าที่เป็นสารก่อกองจับก้อน (Coagulants) โดยหลักการการทำงานของไคโทซานจะทำงานเป็นทั้งตัวตกตะกอนและตัวสร้างตะกอน เมื่อทำหน้าที่เป็นตัวตกตะกอนไคโทซานจะจับสารแขวนลอยในน้ำให้ตกตะกอนลงมา ในขณะที่เมื่อทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอนไคโทซานจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยในน้ำ รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนลงมา สำหรับการประยุกต์ใช้งานไคโทซาน นั้นมีทั้งทางด้านอาหาร การเกษตร สิ่งทอ การแพทย์ และเภสัชกรรม เครื่องสำอาง อุตสาหกรรม กระดาษ หรือแม้กระทั่งในการบำบัดน้ำเสีย

2.9 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการดึงหมึกออก

2.9.1 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness)

เป็นค่าการทดสอบสมบัติในการให้น้ำไหลผ่านได้ของเยื่อ ค่าสภาพระบายได้ที่ใช้กัน อย่างแพร่หลายที่สุดคือ Canadian standard freeness (มาตรฐาน TAPPI T-227) [24] โดยเยื่อที่มีขนาดเส้นจะให้ค่าสภาพระบายได้ที่ต่ำกว่าเยื่อที่มีขนาดยาวในปริมาณที่เท่ากัน ผลของค่าสภาพระบายได้จะรายงานเป็นค่ามิลลิลิตร (ml)

2.9.2 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield)

เป็นค่าปริมาณผลผลิตที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกแล้ว โดยคำนวณได้จากปริมาณน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ และปริมาณน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาจากกระบวนการลอยฟองอากาศ โดยใช้สมการที่ 2-3

$$\% \text{Yield} = \frac{\text{Feed} - \text{Reject}}{\text{Feed}} \times 100 \quad (2-3)$$

โดย Feed = น้ำหนักของน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ

Reject = น้ำหนักของน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดออกมาจากกระบวนการลอยฟองอากาศ

2.9.3 การทำแผ่นทดสอบ (Handsheet making)

ในการทดลองจะมีการนำน้ำเยื่อที่ได้ทั้งก่อนและหลังการกำจัดหมึกออกไปทำเป็นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 sp-02 [25] จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางกายภาพต่อไป

2.9.4 ความขาวสว่าง (Brightness)

ความขาวสว่างในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน (457 นาโนเมตร) เปรียบเทียบกับแผ่นกระจายแสงที่ทำให้การสะท้อนแสงอย่างสมบูรณ์ (Perfect reflecting diffuser) [26] ความขาวสว่างเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับการกระเจิงแสง (Light scattering) ของกระดาษเท่านั้น ดังนั้นค่าความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์เฉพาะในการระบุสมบัติการฟอกเยื่อหรือสมบัติในการกำจัดหมึกออกเท่านั้น การวัดค่าความขาวสว่างยังขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีความหลากหลาย ขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะเชิงเรขาคณิตของระบบแสง (Optical geometry) เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดความขาวสว่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ Technidyde, Elrepho, G.E. และ Photovolt เป็นต้น

ส่วนสาเหตุที่เลือกใช้ช่วงแสงสีน้ำเงินในการวัดค่าความขาวสว่างนั้น เนื่องจากตามนุษย์และทางจิตวิทยานั้นชอบสีน้ำเงินมากกว่าสีอื่น เมื่อสิ่งของเริ่มเก่ามักมีสีเหลืองปนในสีเดิม ดังนั้นสีน้ำเงินซึ่งเป็นคู่สีตรงข้ามของสีเหลืองที่แสดงถึงความใหม่จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่ไม่ได้ฟอกขาว (Unbleached paper) จะมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล และการฟอกเยื่อกระดาษก็คือการเพิ่มสีน้ำเงินให้กับกระดาษนั่นเอง

2.9.5 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective Residual Ink Content, ERIC)

เป็นการวัดค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ตามมาตรฐาน TAPPI T-567 pm-97 [27] โดยการใช้ทฤษฎี Kubelka-Munk ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ได้มาจากการวัดค่าการสะท้อนแสงในช่วงอินฟราเรด (IR) ที่ความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนการดูดกลืนแสงของหมึกจะมากกว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเส้นใยและองค์ประกอบอื่นๆ

ในการวัดค่าการสะท้อนแสงของแผ่นทดสอบ จะวัดค่า R_{∞} และ R_0 โดยกำหนดให้

R_{∞} คือ ค่าการสะท้อนแสงของแผ่นกระดาษทดสอบที่รองด้านหลังด้วยกระดาษชนิดเดียวกันหลายๆ แผ่น

R_0 คือ ค่าการสะท้อนแสงของแผ่นกระดาษทดสอบที่รองด้านหลังด้วยวัสดุสีดำ

เมื่อได้ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษทดสอบมาแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (s) โดยใช้สมการที่ 2-4

$$s = \left[\frac{1000}{w \left(\frac{1}{R_{\infty}} + \frac{1}{R_0} \right)} \right] \ln \left[\frac{(1 - R_{\infty} R_0)}{(1 - R_0)} \right] \quad (2-4)$$

โดย w คือ น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (กรัม/ตารางเมตร)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) โดยใช้สมการที่ 2-5

$$k = s \left[\frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \right] \quad (2-5)$$

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ERIC) โดยใช้สมการที่ 2-6

$$ERIC = \left(\frac{k_{sheet}}{k_{ink}} \right) 10^6 \quad (2-6)$$

โดย k_{sheet} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเยื่อหรือกระดาษที่มีหมึกรวมอยู่ด้วย

k_{ink} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของหมึก

2.9.6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

เป็นค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ มีหน่วยเป็น Nm/g โดยใช้สมการที่ 2-7

$$\text{Tensile index} = \frac{\text{Tensile strength}}{\text{Basis weight}} \quad (2-7)$$

2.9.7 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index)

เป็นการวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ มีหน่วยเป็น mN m²/g โดยใช้สมการที่ 2-8

$$\text{Tear index} = \frac{\text{Tear strength}}{\text{Basis weight}} \quad (2-8)$$

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Behin และ Vahed [15] ศึกษาผลของจำนวนคาร์บอนอะตอมในสายอัลคิล (Alkyl chain) ของแอลกอฮอล์ต่อการดิ่งหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ พบว่าเมื่อใช้แอลกอฮอล์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดหมึก โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นสารฟอกยี่ห้อ พบว่าแอลกอฮอล์จะให้ค่าความขาวสว่างที่สูงกว่าโดยที่ไม่ส่งผลเสียหรือไปทำลายเส้นใย นอกจากนี้สายอัลคิลที่ยาวขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง เพิ่มกำลังของฟองอากาศ (Frother power) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 6 หรือ 7 อะตอม

ธนาวุธ ลิ้มพานิชย์ [28] ศึกษาผลของการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูเลสในการดิ่งหมึกพิมพ์เฟล็กโซฐานน้ำออกจากกระดาษ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความขาวสว่างและความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้น รวมทั้งค่าปริมาณที่เหลืออยู่ของหมึกลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ประจุลบแก่ระบบ ทำให้เส้นใยที่มีประจุลบเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดเป็นแผ่นกระดาษที่ดีขึ้น ความแข็งแรงจึงเพิ่มขึ้น รวมทั้งเมื่อเส้นใยกระจายตัวกันได้ดี ส่งผลให้อนุภาคหมึกที่หลุดออกมาไม่ย้อนกลับไปติดเส้นใย จึงสามารถถูกกำจัดออกได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มากเกินไปกลับส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากการเพิ่มประจุลบให้แก่ระบบมากเกินไป จนทำให้ความสามารถในการสร้างพันธะของเส้นใยลดลง

ปนัดดา กลิ่นบัว [29] ศึกษาผลของการใช้ไคโทซานและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ พบว่าไคโทซานทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเพราะไคโทซานทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมอนุภาคของหมึก ช่วยจับให้หมึกมารวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่มากขึ้น ซึ่งกลุ่มก้อนของหมึกจะไปเกาะติดกับฟองอากาศ และถูกกำจัดออกไปบริเวณผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ ในขณะที่เมื่อใช้เซลลูเลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเซลลูเลสไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยขนาดสั้น ทำให้มีเส้นใยขนาดสั้นในระบบลดลง พื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงจึงลดลง จึงส่งผลไปถึงค่าความขาวสว่างของเยื่อ และอาจเนื่องจากเซลลูเลสมีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาล เมื่อใช้ในปริมาณมากไปจึงอาจไปลดความขาวสว่างของเยื่อทั้งระบบได้

ธนพล ว่องวานิช [30] ศึกษาผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมักโทเนนอร์ ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยมีตัวแปร 2 ตัว คือ ชนิดของไคโทซานซึ่งจำแนกโดยใช้น้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของไคโทซานที่ใช้ จากการทดลองพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานไม่มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติกระดาษที่ได้ สำหรับผลของปริมาณของ ไคโทซานนั้นพบว่าเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ค่าความขาวสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณที่เหลืออยู่ของหมักลดลง เนื่องจากไคโทซานทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมอนุภาคหมัก ทำให้สามารถกำจัดหมักออกไปได้มากขึ้น แต่เมื่อใช้ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ได้ผลที่กลับกัน เนื่องจากปริมาณของไคโทซานที่มากเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดหมักลดลง โดยอาจทำให้อนุภาคของหมักรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่เกินไปจนไม่สามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ดีนัก และไม่สามารถทนต่อแรงต่างๆ ที่พยายามแยกอนุภาคหมักกับฟองอากาศออกจากกันระหว่างลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ นอกจากนี้อาจเนื่องจากไคโทซานมีประจุบวกและเส้นใยมีประจุลบ เมื่อใช้ไคโทซานมากเกินไปไคโทซานอาจมีแนวโน้มที่จะไปจับกับเส้นใยมากขึ้นและจับกับอนุภาคหมักน้อยลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 กระดาษปรีฟ น้ำหนักมาตรฐาน 45 กรัมต่อตารางเมตร บริษัท ดับบลิวพีเอส (ประเทศไทย) จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.2 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ สีดำ ยี่ห้อ Rocket บริษัท เฉลิมชัยชาญ จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.3 เฮปทานอล บริษัท Aldrich Chemistry ประเทศสิงคโปร์
- 3.1.4 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส Degree of substitution 0.81 บริษัท Fluka Analytical ประเทศสิงคโปร์
- 3.1.5 ไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 500 kDa, Degree of deacetylation 0.90 บริษัท ซีเฟรช ไคโตซาน (แล็บ) จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.6 สารลดแรงตึงผิว (non-ionic surfactant) บริษัท Eka Chemicals จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.7 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) บริษัท Merck KGaA จำกัด ประเทศเยอรมนี
- 3.1.8 กรดแอสติก บริษัท Merck KGaA จำกัด ประเทศเยอรมนี
- 3.1.9 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper) ยี่ห้อ Formax รุ่น 450 บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.10 เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell) ยี่ห้อ Voith รุ่น Delta 25 บริษัท Voith ประเทศเยอรมนี
- 3.1.11 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) รุ่น Digipress บริษัท นานาสยาม อินเทอร์เน็ต จำกัด ประเทศไทย

- 3.1.12 เครื่องวัดค่าสภาพกระดาษได้ (Freeness tester) ยี่ห้อ Regmed รุ่น CF/A บริษัท Regmed ประเทศบราซิล
- 3.1.13 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Optical tester) ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color-touch PC บริษัท Technidyne Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.14 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester) ยี่ห้อ Strograph รุ่น E-S บริษัท Toyo Seiki Seisaku-Sho จำกัด ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.15 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester) ยี่ห้อ Pro Tear Electronic Elmendorf Tear Tester บริษัท Thwing-Albert instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.16 เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) ยี่ห้อ Toyo Seiki Seisaku-Sho ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.17 เครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์ (Spectrodensitometer) ยี่ห้อ x-rite รุ่น 500 series บริษัท X-Rite, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.18 เครื่องวัดประจุอนุภาค (Particle charge detector) ยี่ห้อ Mutek รุ่น PCD-03 บริษัท BTG ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.1.19 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber quality analyzer, FQA) ยี่ห้อ Optest equipment Inc. ประเทศแคนาดา
- 3.1.20 เครื่องชั่ง (Balance) ยี่ห้อ GX-20K บริษัท AND Co.Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.21 เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (Balance) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PM 2500 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.1.22 ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมนี

3.1.23 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter) ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 98128 บริษัท Hanna Instrument ประเทศไทย

3.2 วิธีการทดลอง

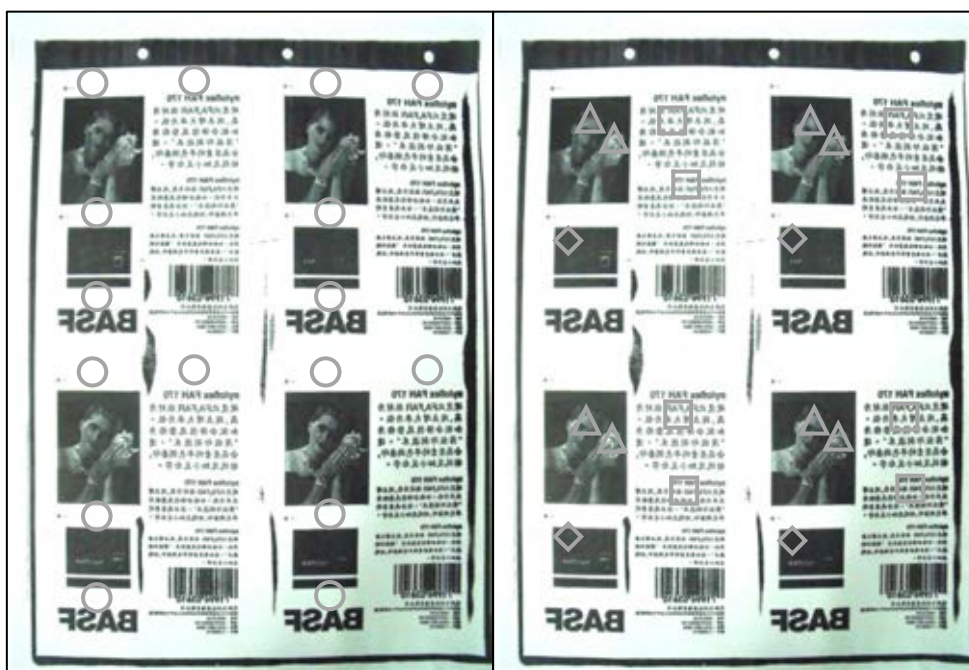
วิธีการทดลองจะแบ่งเป็น 2 สภาวะ คือ การทดลองควบคุม และการทดลองที่ใช้สารเคมีคือเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซาน ดังนี้

3.2.1 สภาวะที่ 1: การทดลองควบคุม

3.2.1.1 นำกระดาษปฐพีมาพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ โดยมีการควบคุมปริมาณหมึกให้เท่ากันทุกแผ่นด้วยการพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดดังแสดงในภาพที่ 3-1 จากนั้นเก็บกระดาษไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน คำนวณหาปริมาณหมึกที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ และวัดความหนาแน่นของหมึกที่บริเวณต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-2 ด้วยเครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-1 รูปแบบตัวอย่างการพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3-2 บริเวณที่วัดความหนาแน่นของหมึกด้วยเครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์ (โดย ○ คือ บริเวณที่ไม่มีการพิมพ์ ◇ คือ บริเวณ Solid △ คือ บริเวณ Half-tone □ คือ บริเวณตัวอักษร)



ภาพที่ 3-3 เครื่องสเปกโตรเดนซิโตมิเตอร์ (Spectrodensitometer)

3.2.1.2 นำกระดาษที่ผ่านการเก็บมาตัดให้ได้ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร แล้วแช่น้ำไว้ประมาณ 1 คืน เพื่อให้ง่ายต่อการตีกระจายให้เป็นเยื่อ จากนั้นนำกระดาษมาตีกระจายในเครื่องตีกระจายเยื่อ ใช้ความเข้มข้นของเยื่อ (Pulp consistency) ร้อยละ 5 เพื่อให้อนุภาคของหมึกหลุดออกจากเส้นใย โดยใช้อัตราความเร็วรอบในการตีกระจายเยื่อ 2 ระดับ และแต่ละระดับ

ใช้ระยะเวลาต่างกัน โดยเริ่มตีกระจายเยื่อจากความเร็วรอบต่ำไปความเร็วรอบสูง ซึ่งระหว่าง การตีกระจายเยื่อจะมีการหยุดเครื่องเพื่อกววเยื่อ เพื่อให้การตีกระจายเยื่อทั่วถึง และเพื่อให้กระดาษ ไม่จับตัวเป็นก้อน ดังแสดงในตารางที่ 3-1 โดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งในขั้นตอน การตีกระจายเยื่อนี้จะมีการใส่สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้นร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และมีการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงกรด (pH 5±0.2) โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ความเข้มข้นร้อยละ 10

ตารางที่ 3-1 อัตราความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการตีกระจายเยื่อ

อัตราความเร็วรอบ ในการตีกระจายเยื่อ (รอบ/นาที)	ระยะเวลา ในการตีกระจาย (นาที)
100	10
พักคนเยื่อ	
100	10
พักคนเยื่อ	
300	40

3.2.1.3 นำเยื่อที่ตีกระจายจากข้อ 3.2.1.2 มาเจือจางให้มีความเข้มข้นของเยื่อ ประมาณร้อยละ 0.8 และแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเก็บไว้เป็นเยื่อส่วนที่ไม่ผ่านการ กำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ นำเยื่อส่วนนี้มาวัดประจุด้วยเครื่องวัดประจุนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 3-4 สำหรับส่วนที่ 2 นำไปกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ ที่อัตราการ ไหลของอากาศเท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นนำเยื่อทั้ง 2 ส่วนไปวัดหาค่า สภาพระบายได้ ตามมาตรฐาน TAPPI T227 om-99 [24] วัดลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology) และขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 sp-02 [25] ที่น้ำหนัก มาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร

3.2.1.4 นำแผ่นทดสอบทั้ง 2 ส่วนมาทดสอบสมบัติเชิงแสง เช่น ปริมาณหมึกที่ เหลืออยู่ ความขาวสว่าง และความทึบแสง เป็นต้น และทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ดัชนี ความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีก เป็นต้น

3.2.1.5 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อนำผลมาเฉลี่ย และวิเคราะห์ทางสถิติ



ภาพที่ 3-4 เครื่องวัดประจุอนุภาค (Particle charge detector)

3.2.2 สภาวะที่ 2: การทดลองที่ใช้สารเคมี คือ เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซาน

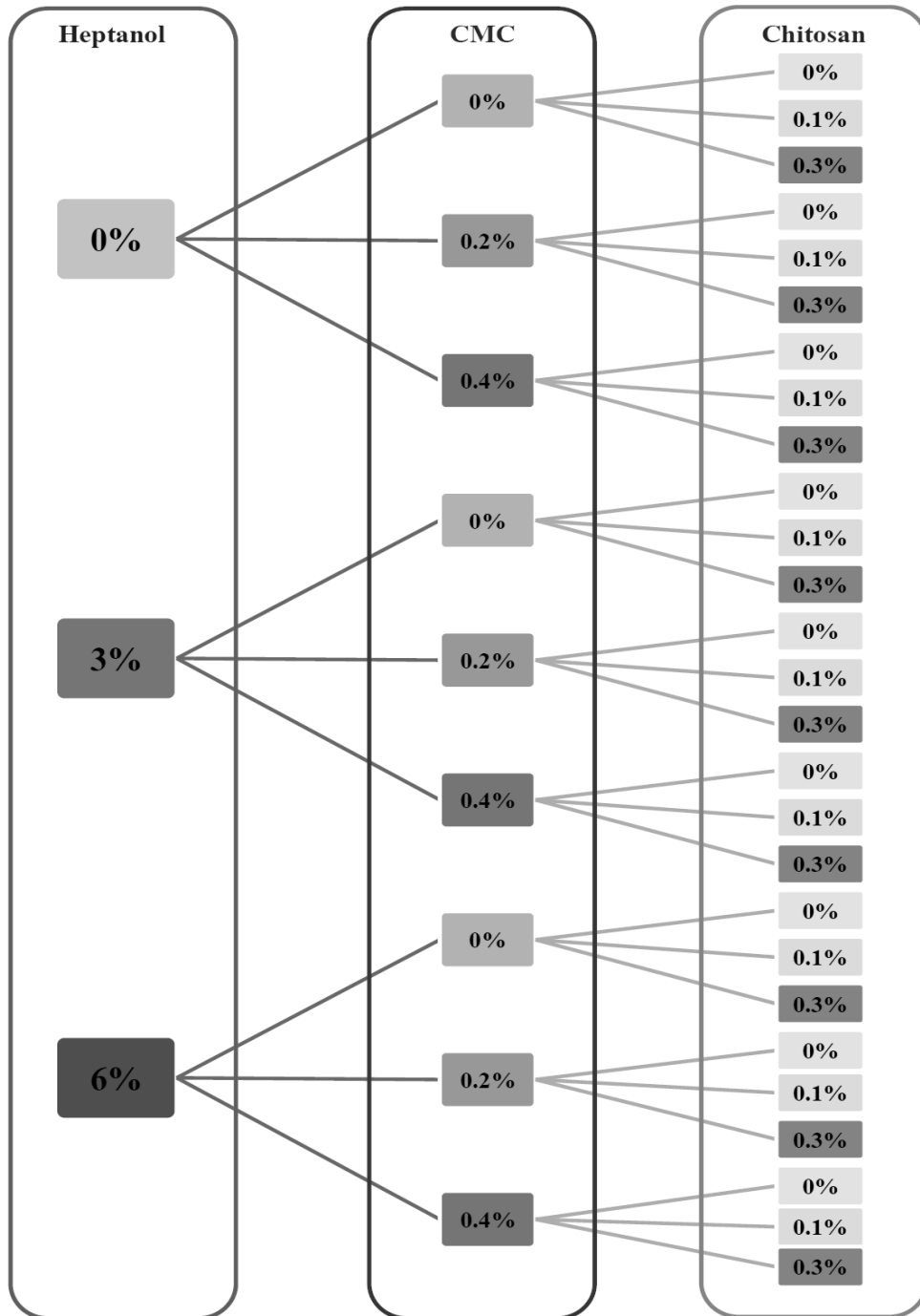
ทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองควบคุมทุกประการ ยกเว้นในการตีกระจายเยื่อ มีการเติมสารเคมี คือ เฮปทานอล 3 ระดับ ได้แก่ 0%, 3%, 6% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 3 ระดับ ได้แก่ 0%, 0.2%, 0.4% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และโคโทซาน 3 ระดับ ได้แก่ 0%, 0.1%, 0.3% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยใช้การออกแบบการทางทดลองแบบแฟกทอเรียล 3 ตัวแปรๆ ละ 3 ระดับ ได้การทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง (ยกเว้นการทดลองที่ไม่มีการใส่สารเคมี ทั้ง 3 ตัว ซึ่งถือเป็นการทดลองควบคุม ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น) ดังแสดงในภาพที่ 3-5

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงแสง พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 หาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อทั้งก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ โดยใช้เครื่องวัดค่าสภาพระบายได้ ตามมาตรฐาน TAPPI T227 om-99 [24]

3.3.2 นำแผ่นทดสอบไปวัดปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ตามมาตรฐาน TAPPI T567 pm-97 [27] ค่าความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T525 om-06 [31] ค่าความทึบแสง ตามมาตรฐาน TAPPI T519 om-02 [32] โดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง ดังแสดงในภาพที่ 3-6

3.3.3 นำแผ่นทดสอบไปหาน้ำหนักมาตรฐาน โดยน้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนมากมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรืออาจเรียกว่าแกรม วัดโดยนำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนัก และนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารด้วยพื้นที่ของแผ่นทดสอบ



ภาพที่ 3-5 แผนผังการใส่สารเคมีในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ



ภาพที่ 3-6 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Optical tester)

3.3.4 นำแผ่นทดสอบไปวัดค่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล เช่น ความเรียบของกระดาษ ตามมาตรฐาน TAPPI T479 cm-99 [33] ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน TAPPI T494 om-01 [34] ดัชนีความต้านทานแรงฉีก ตามมาตรฐาน TAPPI T414 om-98 [35] โดยใช้เครื่องวัดค่าความเรียบ

3.3.5 นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์สรุปผล โดยใช้หลักการการออกแบบแฟกทอเรียลสามระดับ สามตัวแปร ซึ่งจะเป็นแบบ 3^3 Factorial design

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลที่นำมาเสนอนั้นจะนำเสนอถึงอิทธิพลของการใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ เช่น ค่าสภาพระบายได้ ความเป็นประจุของน้ำเยื่อ ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ค่าความขาวสว่าง ค่าความทึบแสง ค่าความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีก โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับ 3^3 Factorial design ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 เพื่อหาความสำคัญของตัวแปรต่อสมบัติต่างๆ โดยดูจากค่านัยสำคัญที่ได้ ซึ่งหามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 นั่นคือ ตัวแปรดังกล่าวมีผลกระทบต่อสมบัติที่วิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.1 สมบัติของกระดาษก่อนพิมพ์และหลังพิมพ์

สมบัติของกระดาษตัวอย่างก่อนและหลังการพิมพ์ด้วยหมึกฟเล็คโซกราฟี แสดงดังตารางที่ 4-1 เป็นการวัดสมบัติของกระดาษเบื้องต้น ซึ่งใช้เป็นค่าของสภาวะควบคุม เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมบัติของกระดาษที่ได้จากสภาวะที่มีการใช้สารเคมี โดยค่าปริมาณหมึกที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ และความหนาแน่นของหมึกพิมพ์ที่บริเวณต่างๆ เป็นค่าที่วัดจากกระดาษตัวอย่างเริ่มต้นที่ยังไม่มีการนำไปตีกระจาย สำหรับปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ค่าสภาพระบายได้ ประจุนภาคของน้ำเยื่อ ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีก จะวัดจากเยื่อ และกระดาษที่ได้ภายหลังจากการนำกระดาษตัวอย่างมาตีกระจายจนได้เป็นน้ำเยื่อ แล้วนำไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษใหม่

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษก่อนและหลังการพิมพ์ ภายหลังจากตีกระจายพบว่ากระดาษที่ผ่านการพิมพ์ เนื่องจากมีอนุภาคของหมึกอยู่จึงส่งผลให้มีค่าความขาวสว่างต่ำกว่า ในขณะที่ค่าความทึบแสงมีค่าสูงขึ้น โดยเกิดจากสีของหมึกที่เป็นสีดำ และการดูดกลืนแสงของอนุภาคหมึก สำหรับสมบัติทางด้านกายภาพของแผ่นทดสอบ พบว่ากระดาษที่ผ่านการพิมพ์จะมีค่าความเรียบ และค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ต่ำกว่า อาจเนื่องจากอนุภาคของหมึกไปขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย ทำให้การแนบตัว และการสร้างพันธะเกิดได้ไม่ดี ในส่วนของดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่มีค่าสูงขึ้น อาจเกิดจากอนุภาคหมึกไปขัดขวางการฉีก ทำให้ต้องใช้แรงฉีกที่สูงขึ้น ดัชนีความต้านทานแรงฉีกโดยรวมของทั้งระบบจึงมีค่าที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4-1 สมบัติของกระดาษตัวอย่างก่อนและหลังการพิมพ์ด้วยหมึกเฟล็กโซกราฟี

สมบัติของเยื่อและกระดาษ	ค่าก่อนพิมพ์	ค่าหลังพิมพ์
ปริมาณหมึกที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ (%)	0	1.300±0.29
ความหนาแน่นของหมึกบริเวณพื้นตาย	0.27±0.01	1.46±0.06
ความหนาแน่นของหมึกบริเวณฮาล์ฟโทน	0	0.93±0.15
ความหนาแน่นของหมึกบริเวณตัวอักษร	0	0.67±0.06
ค่าสภาพระบายได้ (ml)	287.50±6.35	291.00±13.31
ประจุนุภาคของน้ำเยื่อ (mV)	-632±25.87	-503±28.19
ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่	253.18±10.44	2398±19.32
ความขาวสว่าง (%)	56.57±0.28	34.66±0.33
ความทึบแสง (%)	97.86±0.23	99.86±0.14
ความเรียบ (s)	15.16±1.20	13.51±0.99
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)	30.02±1.62	28.81±1.38
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (mNm ² /g)	6.35±0.26	6.56±0.59

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองดึงหมึกออก

4.2.1 ปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield)

จากผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-2 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ และการวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 12) พบว่า การใช้เฮปทานอลในปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ต่ำลง (ยกเว้นการทดลองที่ 13 เปรียบเทียบกับ 22 การทดลองที่ 16 เปรียบเทียบกับ 25 และการทดลองที่ 17 เปรียบเทียบกับ 26) ทั้งนี้เนื่องจากเฮปทานอลเป็นสารที่ช่วยให้เกิดฟอง เมื่อมีฟองมากขึ้นอาจส่งผลให้เส้นใยมีโอกาสเกาะติดไปกับฟองอากาศและหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ จึงทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้มีค่าต่ำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 13) พบว่าการใช้เฮปทานอลส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้มากที่สุด โดยส่งผลมากกว่าการใช้สารชนิดอื่นๆ รวมไปถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ตารางที่ 4-2 ค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตที่ได้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ

ลำดับที่ การทดลอง	ปริมาณสารเคมีที่ใส่ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ปริมาณผลผลิตที่ได้ (%)
	Heptanol	CMC	Chitosan	
1	0	0	0	93.20±1.07
2	0	0	0.1	93.41±0.49
3	0	0	0.3	93.41±0.42
4	0	0.2	0	93.71±0.26
5	0	0.2	0.1	93.57±0.49
6	0	0.2	0.3	94.19±0.24
7	0	0.4	0	94.89±0.28
8	0	0.4	0.1	94.65±0.14
9	0	0.4	0.3	94.57±0.87
10	3	0	0	86.56±0.67
11	3	0	0.1	86.92±0.20
12	3	0	0.3	88.45±0.21
13	3	0.2	0	87.13±0.52
14	3	0.2	0.1	87.05±0.03
15	3	0.2	0.3	87.67±0.68
16	3	0.4	0	87.84±0.05
17	3	0.4	0.1	85.79±0.04
18	3	0.4	0.3	84.47±0.79
19	6	0	0	83.93±0.05
20	6	0	0.1	84.01±0.16
21	6	0	0.3	84.15±0.26
22	6	0.2	0	87.28±0.41
23	6	0.2	0.1	86.38±1.59
24	6	0.2	0.3	85.92±1.76
25	6	0.4	0	88.59±0.55
26	6	0.4	0.1	88.47±4.65
27	6	0.4	0.3	83.63±2.65

ในขณะที่ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น พบว่ามีแนวโน้มทำให้ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้น (ยกเว้นการทดลองที่ 12 เปรียบเทียบกับ 15 การทดลองที่ 14 เปรียบเทียบกับ 17 การทดลองที่ 15 เปรียบเทียบกับ 18 และการทดลองที่ 24 เปรียบเทียบกับ 27) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติเป็นตัวอุ้มน้ำ (Water binder) [36] จึงทำให้

ปริมาณน้ำที่ออกมาที่ฟองอากาศน้อยลง นั่นคือ มีน้ำหนัก Rejects น้อยลง เมื่อนำค่าไปคำนวณ จึงส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้น ส่วนผลของโคโทซานต่อปริมาณผลผลิตที่ได้กลับไม่ชัดเจนนัก แต่มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากโคโทซานที่เป็นสารรวมรวม จะทำให้อนุภาคหมีเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ แต่เมื่อใส่มากเกินไปอาจทำให้อนุภาคหมีรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่เกินไปจนไม่สามารถเกาะติดไปกับฟองอากาศได้ ประสิทธิภาพจึงด้อยกว่าการใช้เฮปทานอล และยังพบว่าการใช้โคโทซานส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้น้อยที่สุด

เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารแต่ละชนิดจากการวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 13) พบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้มากที่สุด รองลงมาคือปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโคโทซาน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารทั้งสามชนิด และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและโคโทซาน ตามลำดับ

จากตารางที่ 4-13 พบว่า มีเฉพาะเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 ในกรณีปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโคโทซานนั้น แม้จะมีค่าต่ำกว่า 0.05 หากแต่ตัวแปรเดียวในกรณีของโคโทซานนั้นไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ที่มีโคโทซานอยู่ย่อมไม่มีต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน

4.2.2 สภาพระบายได้ (Freeness)

ตารางที่ 4-3 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อสภาพระบายได้ของเยื่อ ก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศมีผลต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่อไม่ชัดเจนนัก ในขณะที่การลอยฟองอากาศควรส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดน้อยลง (ซึ่งผลการทดลองที่ได้ก็ให้ค่าแนวโน้มเป็นเช่นนั้น ดังแสดงในส่วนแสดงผลของการดึงหมีกิมพ์ต่อร้อยละของเส้นใยขนาดเล็ก ตารางที่ 4-8) ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กบางส่วนอาจหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศด้วย เมื่อมีเส้นใยขนาดเล็กน้อยลง ควรส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวในการดูดน้ำมาก แต่ในการทดลองนี้ยังเหตุผลดังกล่าวไม่ชัดเจน ในส่วนอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ นั้น การ

ใส่ปริมาณเฮปทานอลมากขึ้น พบว่าส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นการทดลองที่ 12 เปรียบเทียบกับ 21 การทดลองที่ 16 เปรียบเทียบกับ 25 และการทดลองที่ 10 เปรียบเทียบกับ 27 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการใช้เฮปทานอลในปริมาณที่มากขึ้น มีแนวโน้มส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลระหว่างการไม่ใช้เฮปทานอลและใช้เฮปทานอลร้อยละ 6 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ในตารางที่ 4-5 และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 14) ในส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส การใส่ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น พบว่าทำให้ค่าสภาพระบายได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของตัวคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเองที่ชอบอุ้มน้ำไว้กับตัว ปล่อยน้ำอิสระออกมาน้อย ค่าสภาพระบายได้จึงมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นในการทดลองที่ 22 เปรียบเทียบกับ 25 โดยจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่ส่งผลต่อค่าสภาพระบายได้มากที่สุด ส่วนการใช้ไคโทซานในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไคโทซานมีประจุบวก ทำให้เส้นใยซึ่งมีประจุลบมาเกาะกลุ่มกันได้มากขึ้น พื้นที่ผิวในการอุ้มน้ำของเส้นใยจึงลดลง ค่าสภาพระบายได้จึงเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้เมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการล่อยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่าทั้งเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซาน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งแบบสองและสามตัวแปร มีผลต่อค่าสภาพระบายได้ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และเมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารแต่ละชนิด (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 15) ต่อค่าสภาพระบายได้พบว่า ปฏิสัมพันธ์แบบ 3 ตัวแปร จะส่งผลต่อสภาพระบายได้ของเยื่อมากที่สุด รองลงมาคือปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไคโทซาน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและไคโทซาน ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ค่าสภาพระบายน้ําได้ของเยื่อก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ค่าสภาพระบายน้ําได้ก่อน การลอยฟองอากาศ	ค่าสภาพระบายน้ําได้หลัง การลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan	(%)	(%)
1	0	0	0	291.00±13.31	292.50±8.34
2	0	0	0.1	284.00±22.00	305.50±12.47
3	0	0	0.3	312.75±2.87	338.50±6.13
4	0	0.2	0	224.25±3.94	254.25±8.05
5	0	0.2	0.1	274.00±16.26	282.00±16.97
6	0	0.2	0.3	268.00±0.00	293.75±9.03
7	0	0.4	0	195.00±2.30	214.75±7.80
8	0	0.4	0.1	212.50±8.34	229.50±7.14
9	0	0.4	0.3	242.00±6.63	261.00±7.07
10	3	0	0	276.50±7.54	283.25±9.17
11	3	0	0.1	296.00±8.86	304.25±17.38
12	3	0	0.3	297.00±9.23	294.25±11.72
13	3	0.2	0	241.50±20.56	233.25±4.57
14	3	0.2	0.1	252.50±11.26	254.25±1.89
15	3	0.2	0.3	286.50±5.97	286.50±12.15
16	3	0.4	0	190.00±2.30	187.75±5.18
17	3	0.4	0.1	208.00±10.67	213.50±11.26
18	3	0.4	0.3	253.75±6.18	249.25±10.40
19	6	0	0	264.25±10.04	256.00±5.59
20	6	0	0.1	258.25±4.50	254.25±9.67
21	6	0	0.3	290.00±8.44	294.75±6.13
22	6	0.2	0	210.25±15.13	190.75±9.06
23	6	0.2	0.1	250.75±3.77	248.00±9.86
24	6	0.2	0.3	287.00±4.89	271.50±11.81
25	6	0.4	0	205.75±4.78	200.50±2.64
26	6	0.4	0.1	215.75±7.76	207.25±6.18
27	6	0.4	0.3	267.25±6.65	260.50±5.19

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber morphology)

4.2.2.1 ความยาวของเส้นใย (LWW)

ตารางที่ 4-4 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อความยาวของเส้นใยก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าค่าความยาวของเส้นใยหลังการลอยฟองอากาศมีแนวโน้มสูงกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการลอยฟองอากาศทำให้เส้นใยขนาดเล็กบางส่วนหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ความยาวของเส้นใยในระบบที่เหลือที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้พบว่า เฮปทานอลมีผลต่อความยาวของเส้นใยไม่ชัดเจน กล่าวคือ เมื่อใช้ในปริมาณน้อยมีแนวโน้มส่งผลให้ความยาวของเส้นใยลดลง (เปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้กับการใช้เฮปทานอลร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเฮปทานอลกลับส่งผลให้ค่าความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (เมื่อใช้ปริมาณเฮปทานอลร้อยละ 6 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) เมื่อพิจารณาผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโคโชนาต่อความยาวของเส้นใยก็ให้แนวโน้มที่ไม่ชัดเจนเช่นกัน แต่เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 16) พบว่าการใช้เฮปทานอลและโคโชนาส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีค่าลดลง ในขณะที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากเมื่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่ให้ประจุลบเส้นใยเกิดการกระจายตัวได้ดี โอกาสที่เส้นใยขนาดเล็กบางส่วนหลุดติดออกไปพร้อมกับฟองอากาศจึงมีมากขึ้น จึงเหลือแต่เส้นใยที่ยาวในระบบ เมื่อเทียบอิทธิพลของสารแต่ละชนิดต่อค่าความยาวของเส้นใย (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 17) จะพบว่าการใช้โคโชนาส่งผลต่อความยาวของเส้นใย มากกว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเฮปทานอล ตามลำดับ ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งแบบ 2 และ 3 ตัวแปรส่งอิทธิพลต่อค่าความยาวของเส้นใยไม่แตกต่างจากการใช้สารเคมีเพียงชนิดเดียวมากนัก โดยพบว่าปฏิสัมพันธ์แบบ 3 ตัวแปรส่งผลต่อความยาวของเส้นใยมากที่สุด

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล พบว่าโคโชนาอย่างเดียวที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ความยาวเส้นใยก่อน การลอยฟองอากาศ	ความยาวเส้นใยหลัง การลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan	(mm)	(mm)
1	0	0	0	1.742±0.123	1.760±0.026
2	0	0	0.1	1.605±0.083	1.601±0.031
3	0	0	0.3	1.612±0.067	1.682±0.043
4	0	0.2	0	1.688±0.042	1.683±0.063
5	0	0.2	0.1	1.575±0.094	1.591±0.074
6	0	0.2	0.3	1.589±0.053	1.661±0.054
7	0	0.4	0	1.688±0.066	1.592±0.035
8	0	0.4	0.1	1.706±0.094	1.677±0.081
9	0	0.4	0.3	1.709±0.117	1.631±0.048
10	3	0	0	1.612±0.147	1.588±0.088
11	3	0	0.1	1.609±0.067	1.581±0.054
12	3	0	0.3	1.646±0.032	1.598±0.066
13	3	0.2	0	1.676±0.037	1.678±0.041
14	3	0.2	0.1	1.635±0.074	1.693±0.033
15	3	0.2	0.3	1.624±0.064	1.639±0.060
16	3	0.4	0	1.621±0.038	1.720±0.077
17	3	0.4	0.1	1.567±0.054	1.576±0.106
18	3	0.4	0.3	1.609±0.073	1.648±0.052
19	6	0	0	1.656±0.085	1.640±0.103
20	6	0	0.1	1.604±0.086	1.605±0.028
21	6	0	0.3	1.651±0.093	1.670±0.036
22	6	0.2	0	1.612±0.060	1.674±0.056
23	6	0.2	0.1	1.601±0.047	1.631±0.140
24	6	0.2	0.3	1.509±0.089	1.650±0.082
25	6	0.4	0	1.593±0.047	1.668±0.115
26	6	0.4	0.1	1.623±0.086	1.649±0.099
27	6	0.4	0.3	1.584±0.080	1.649±0.096

4.2.2.2 ร้อยละของเส้นใยขนาดเล็ก (Fines percent)

ตารางที่ 4-5 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

ตารางที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ก่อนการลอยฟองอากาศ	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก หลังการลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan	(%)	(%)
1	0	0	0	36.90±0.67	34.88±0.99
2	0	0	0.1	38.44±0.85	38.61±1.12
3	0	0	0.3	38.64±0.65	36.75±0.50
4	0	0.2	0	37.56±0.84	37.29±0.60
5	0	0.2	0.1	39.22±1.01	37.56±1.03
6	0	0.2	0.3	38.25±1.33	37.49±0.94
7	0	0.4	0	39.20±1.21	39.09±1.33
8	0	0.4	0.1	39.54±0.85	37.99±0.77
9	0	0.4	0.3	37.02±0.39	38.52±1.11
10	3	0	0	37.52±1.2	36.30±1.18
11	3	0	0.1	38.53±0.88	37.30±0.17
12	3	0	0.3	37.61±0.74	36.98±0.57
13	3	0.2	0	39.47±0.88	36.83±0.90
14	3	0.2	0.1	38.85±1.10	37.58±0.92
15	3	0.2	0.3	37.76±0.86	37.42±0.42
16	3	0.4	0	38.39±1.21	36.81±0.64
17	3	0.4	0.1	37.43±0.42	37.87±0.68
18	3	0.4	0.3	38.02±1.40	38.84±0.43
19	6	0	0	39.46±1.79	38.65±0.90
20	6	0	0.1	38.10±0.81	38.20±0.53
21	6	0	0.3	38.73±0.86	37.75±0.37
22	6	0.2	0	38.56±0.43	37.92±0.40
23	6	0.2	0.1	38.90±1.25	39.10±1.36
24	6	0.2	0.3	40.63±0.21	38.35±1.68
25	6	0.4	0	39.29±0.99	39.15±1.86
26	6	0.4	0.1	39.37±1.36	38.61±0.72
27	6	0.4	0.3	39.52±0.80	38.83±1.00

จากการทดลองพบว่าค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังการลอยฟองอากาศมีแนวโน้มต่ำกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการลอยฟองอากาศทำให้เส้นใยขนาดเล็กบางส่วนหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ

เมื่อพิจารณาถึงผลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้พบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากที่สุด โดยเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีทิศทางที่เพิ่มขึ้น (ยกเว้นในการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับ 5 การทดลองที่ 13 เปรียบเทียบกับ 16 การทดลองที่ 19 เปรียบเทียบกับ 22 และการทดลองที่ 23 เปรียบเทียบกับ 26) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้เส้นใยมีการกระจายตัวสูง การเกาะกันเป็นกลุ่มของเส้นใยลดน้อยลง จึงอาจส่งผลให้เมื่อทำการวัดค่าจึงพบว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลของเฮปทานอลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเมื่อมองโดยรวมจะให้ผลที่ไม่ได้เด่น เว้นแต่ในกรณีที่ใช้เฮปทานอลร้อยละ 6 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเท่านั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้เฮปทานอลจึงจะเห็นแนวโน้มของผลการทดลอง ส่วนผลของไคโทซานต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กนั้นก็ยังมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนเช่นกัน เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 18) พบว่าสารทั้งสามชนิดส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล ของผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศ พบว่าเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซานมีผลต่อร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไคโทซานก็มีผลต่อร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-13

4.2.3 ความเป็นประจุของน้ำเยื่อ (Particle charge)

ตารางที่ 4-6 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อความเป็นประจุของน้ำเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าสารเคมีทั้งสามชนิดแทบไม่มีผลต่อความเป็นประจุของน้ำเยื่อ เนื่องจากค่าที่วัดได้มีค่าขึ้นลงค่อนข้างสูง รวมถึงเครื่องมือที่ใช้วัดนั้น ตัวสัมผัสกับน้ำเยื่อซึ่งเป็นตัววัดต่อการวัดค่าประจุมีบริเวณบกพร่องบางส่วน ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าที่วัดได้นั้นไม่แม่นยำ ถูกต้องได้

ตารางที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยความเป็นประจุของของน้ำเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศ

ชุดการทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใส่ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ความเป็นประจุของน้ำเยื่อ (mV)
	Heptanol	CMC	Chitosan	
1	0	0	0	-516±11.79
2	0	0	0.1	-476±11.02
3	0	0	0.3	-492±20.88
4	0	0.2	0	-474±5.67
5	0	0.2	0.1	-482±6.00
6	0	0.2	0.3	-492±4.00
7	0	0.4	0	-521±1.00
8	0	0.4	0.1	-511±4.16
9	0	0.4	0.3	-493±12.29
10	3	0	0	-485±1.53
11	3	0	0.1	-472±4.00
12	3	0	0.3	-461±7.00
13	3	0.2	0	-476±7.37
14	3	0.2	0.1	-492±6.00
15	3	0.2	0.3	-485±15.50
16	3	0.4	0	-478±4.51
17	3	0.4	0.1	-483±18.25
18	3	0.4	0.3	-475±18.58
19	6	0	0	-481±11.37
20	6	0	0.1	-478±14.57
21	6	0	0.3	-477±14.15
22	6	0.2	0	-462±10.50
23	6	0.2	0.1	-481±12.00
24	6	0.2	0.3	-486±17.21
25	6	0.4	0	-474±7.23
26	6	0.4	0.1	-477±9.02
27	6	0.4	0.3	-483±3.51

อย่างไรก็ตามการใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณที่มากขึ้นน่าจะส่งผลให้ความเป็นประจุลบของน้ำเยื่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารให้ประจุลบ โดยใน

การวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 20) แสดงให้เห็นถึงทิศทางที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลต่อค่าประจุที่วัดได้ โดยจะให้ค่าที่ลดลง หรือหมายถึงมีความเป็นลบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ในขณะที่การใส่ไคโทซานในปริมาณที่มากขึ้นนั้น น่าจะส่งผลให้ความเป็นประจุลบของน้ำเยื่อลดลง เนื่องจากไคโทซานเป็นสารให้ประจุบวก การวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 20) ก็ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎี คือแสดงให้เห็นถึงทิศทางที่ไคโทซานส่งผลต่อค่าประจุที่วัดได้ โดยจะให้ค่าที่เพิ่มขึ้น หรือหมายถึงมีความเป็นลบลดลง

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล พบว่า มีเพียงเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและไคโทซาน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไคโทซานเท่านั้นที่มีผลต่อความเป็นประจุของของน้ำเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4-13 อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและไคโทซาน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไคโทซาน แม้จะมีค่าต่ำกว่า 0.05 หากแต่ตัวแปรเดี่ยวในกรณีของไคโทซานนั้น ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตที่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ที่มีไคโทซานอยู่ย่อมไม่มีต่อปริมาณผลผลิตที่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน

4.2.4 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective Residual Ink Content, ERIC)

ตารางที่ 4-7 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าอิทธิพลของการลอยฟองอากาศส่งผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบ โดยภายหลังการลอยฟองอากาศ ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าต่ำกว่าก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากสภาวะควบคุม หรือแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมสารเคมีชนิดต่างๆ และในทุกๆ ปริมาณที่เติม ทั้งนี้เนื่องจากการลอยฟองอากาศทำให้อนุภาคของหมึกที่หลุดออกจากเส้นใยไปเกาะติดไปกับฟองอากาศภายในเครื่องลอยฟองอากาศ และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ พบว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่งผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ภายหลังการลอยฟองอากาศของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ที่นำไปใช้จริงในทิศทางที่ลดลง (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 22) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่ช่วยป้องกันการย้อนกลับมาติด

ของอนุภาค (anti-redeposition agent) ที่ใช้ทั่วไปในผงซักฟอก [37] ดังนั้นจึงช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของหมึกย้อนกลับมาติดที่เส้นใย รวมทั้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุลบจึงอาจช่วยเพิ่มประจุลบให้กับระบบ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคหมึกและเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น ช่วยให้อนุภาคหมึกไม่ถูกขัดขวางด้วยเครือข่ายของเส้นใยระหว่างการลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ

ตารางที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ก่อนการลอยฟองอากาศ	ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ หลังการลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan		
1	0	0	0	2398.54±19.32	1371.36±20.31
2	0	0	0.1	2443.12±12.73	1513.36±20.32
3	0	0	0.3	2538.30±28.36	1608.87±21.45
4	0	0.2	0	1726.46±59.83	999.02±15.37
5	0	0.2	0.1	1910.12±89.29	1133.76±25.75
6	0	0.2	0.3	2436.08±15.61	1551.59±37.54
7	0	0.4	0	1546.85±11.48	946.13±13.75
8	0	0.4	0.1	1653.53±23.14	986.70±24.85
9	0	0.4	0.3	2104.13±45.02	1274.78±34.44
10	3	0	0	2267.32±20.23	1117.62±16.15
11	3	0	0.1	2343.20±25.79	1340.00±29.66
12	3	0	0.3	2506.18±26.53	1539.89±54.67
13	3	0.2	0	1797.30±14.23	971.66±21.33
14	3	0.2	0.1	1966.99±65.08	1069.72±21.76
15	3	0.2	0.3	2227.31±34.18	1305.68±20.70
16	3	0.4	0	1767.90±45.36	952.12±27.33
17	3	0.4	0.1	1911.49±42.75	1035.42±27.31
18	3	0.4	0.3	2146.18±30.04	1143.85±23.11
19	6	0	0	1908.77±34.49	1188.81±19.73
20	6	0	0.1	2175.01±36.37	1448.14±32.88
21	6	0	0.3	2368.49±59.62	1695.74±22.56
22	6	0.2	0	1783.98±36.58	1250.12±29.00
23	6	0.2	0.1	1857.56±23.34	1312.54±17.55
24	6	0.2	0.3	2056.54±32.34	1478.31±20.02
25	6	0.4	0	1763.04±38.80	1209.90±21.41
26	6	0.4	0.1	1879.10±38.31	1407.38±61.25
27	6	0.4	0.3	1830.04±21.83	1230.14±49.11

ในขณะที่เฮปทานอลให้ประสิทธิภาพที่รองลงมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยเฮปทานอลเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดฟอง รวมทั้งเฮปทานอลอาจไปทำปฏิกิริยากับสารยึดของหมึกทำให้หมึกหลุดออกจากผิวหน้าของเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการเกิดฟองอากาศที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการชนกันเองของฟองอากาศ ฟองอากาศบางส่วนอาจแตกและไม่สามารถพาอนุภาคหมึกขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ ประสิทธิภาพจึงอาจต่ำกว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

สำหรับไคโทซานพบว่าให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไคโทซานมีประจุบวก จึงอาจจะไปจับกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบแทนการไปจับกับอนุภาคหมึก และยังทำให้ความเป็นประจุบวกในระบบเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของเส้นใยไม่ดี อนุภาคหมึกอาจไม่สามารถผ่านเครือข่ายของเส้นใยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ รวมทั้งไคโทซานทำหน้าที่เป็นสารรวบรวม การใช้ไคโทซานที่มากจึงอาจทำให้อนุภาคหมึกเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่เกินไปจนไม่สามารถเกาะติดไปกับฟองอากาศ

เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่า ปฏิสัมพันธ์ทั้งแบบ 2 และ 3 ตัวแปรมีอิทธิพลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่น้อยกว่าการใช้สารเคมีแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดอาจไปทำปฏิกิริยาระหว่างกัน เช่นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีประจุลบ อาจไปจับกับไคโทซานซึ่งมีประจุบวก ทำให้ประสิทธิภาพ หรือการไปจับกับอนุภาคหมึกลดลง จึงส่งผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลง

แต่อย่างไรก็ตามผลของการลอยฟองอากาศ และการใช้สารเคมีทั้งสามชนิด ต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของกระดาษทดสอบที่วัดได้ ก็ยังไม่เทียบเท่ากับกระดาษที่ไม่ผ่านการพิมพ์ในสภาวะควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4-1 เนื่องจากหมึกไม่อาจถูกกำจัดออกไปทั้งหมด

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล พบว่าเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไคโทซาน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งแบบ 2 และ 3 ตัวแปรมีผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็น ดังแสดงในตารางที่ 4-13 มีค่าต่ำกว่า 0.05 และปฏิสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มากที่สุดคือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแบบ 3 ตัวแปร (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 23)

4.2.5 ความขาวสว่าง (Brightness)

ตารางที่ 4-8 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อความขาวสว่าง ของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่า การลอยฟองอากาศส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบ โดยภายหลังการลอยฟองอากาศความขาวสว่างมีค่าสูงกว่าก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็นแผ่นทดสอบจากสภาวะควบคุมหรือแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมสารเคมีชนิดต่างๆ และในทุกๆ ปริมาณที่เติม ทั้งนี้เนื่องจากการลอยฟองอากาศทำให้อนุภาคของหมึกที่หลุดออกจากเส้นใยนั้น เกาะติดและถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบ โดยค่าทั้งสองจะแปรผกผันกัน เมื่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ลดลงจะส่งผลให้ความขาวสว่างมีค่าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ พบว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลต่อค่าความขาวสว่างภายหลังการลอยฟองอากาศของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างที่นำไปใช้จริงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 24) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของหมึกย้อนกลับมาติดที่เส้นใย รวมทั้งช่วยเพิ่มประจุลบให้กับระบบ จึงเกิดการกระจายตัวของอนุภาคหมึกและเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น ช่วยให้อนุภาคหมึกไม่ถูกขัดขวางด้วยเครือข่ายของเส้นใยในการถูกกำจัดออก รวมทั้งเป็นสารที่มีอิทธิพลต่อค่าความขาวสว่างมากที่สุด

ในขณะที่เฮปทานอลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกรองลงมาจากรีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยเฮปทานอลเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดฟอง และอาจไปทำปฏิกิริยากับสารยึดของหมึก ทำให้หมึกหลุดออกจากผิวหน้าของเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการมีฟองอากาศที่มากเกินไปอาจทำให้ฟองอากาศแตก เนื่องจากชนกันเอง และไม่สามารถพาอนุภาคหมึกขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้ ประสิทธิภาพจึงอาจต่ำกว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

สำหรับไคโทซานพบว่าส่งผลต่อค่าความขาวสว่างในทิศทางที่ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไคโทซานทำหน้าที่เป็นสารรวบรวม การใช้ไคโทซานที่มากเกินไป จึงอาจทำให้อนุภาคหมึกเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่เกินไปจนไม่สามารถเกาะติดไปกับฟองอากาศ รวมทั้งไคโทซานมีประจุบวก จึงอาจจะไปจับกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบแทนการไปจับกับอนุภาคหมึก และยังทำให้ประจุบวกในระบบเพิ่มขึ้น การเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยอาจเกิดขึ้น จนอาจทำให้อนุภาคของหมึกไม่สามารถผ่านเครือข่ายของเส้นใยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศได้

ตารางที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการ ทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ความขาวสว่างก่อนการ ลอยฟองอากาศ	ความขาวสว่างหลังการ ลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan	(%)	(%)
1	0	0	0	34.66±0.33	41.36±0.30
2	0	0	0.1	33.32±0.42	39.51±0.31
3	0	0	0.3	33.50±0.35	39.45±0.22
4	0	0.2	0	39.35±0.40	45.61±0.24
5	0	0.2	0.1	37.17±0.64	43.37±0.35
6	0	0.2	0.3	34.45±0.11	40.17±0.37
7	0	0.4	0	41.31±0.16	46.77±0.13
8	0	0.4	0.1	40.33±0.26	46.14±0.33
9	0	0.4	0.3	36.08±0.26	42.30±0.65
10	3	0	0	36.36±0.12	44.72±0.17
11	3	0	0.1	35.37±0.28	42.00±0.39
12	3	0	0.3	35.12±0.35	41.10±0.54
13	3	0.2	0	38.81±0.35	45.92±0.35
14	3	0.2	0.1	38.01±0.57	44.99±0.35
15	3	0.2	0.3	35.48±0.57	42.29±0.73
16	3	0.4	0	39.94±0.61	46.57±0.47
17	3	0.4	0.1	38.85±0.49	45.55±0.38
18	3	0.4	0.3	37.24±0.21	44.59±0.17
19	6	0	0	40.02±0.35	45.22±0.20
20	6	0	0.1	38.04±0.33	42.74±0.33
21	6	0	0.3	36.75±0.44	40.65±0.16
22	6	0.2	0	41.24±0.25	44.99±0.31
23	6	0.2	0.1	40.28±0.25	44.18±0.21
24	6	0.2	0.3	39.01±0.29	42.77±0.17
25	6	0.4	0	41.40±0.33	45.69±0.29
26	6	0.4	0.1	40.37±0.33	43.78±0.67
27	6	0.4	0.3	40.97±0.24	45.31±0.37

โดยเมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารเคมีพบว่า การใช้สารเคมีร่วมกันทั้งปฏิสัมพันธ์แบบ 2 และ 3 ตัวแปร มีอิทธิพลต่อค่าความขาวสว่างน้อยกว่าการใช้สารเคมีแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบ

หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการลอยฟองอากาศ และการใช้สารเคมีทั้งสามชนิด เปรียบเทียบกับค่าความขาวสว่างของกระดาษก่อนการพิมพ์ ในตารางที่ 4-1 ยังพบว่ายังไม่สามารถให้ค่าความขาวสว่างที่เทียบเท่ากับกระดาษก่อนการพิมพ์ได้ เนื่องจากยังมีปริมาณหมึกหลงเหลืออยู่ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลของปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ที่แสดงไว้ในส่วนก่อนหน้า

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแพททอเรียล ดังแสดงผลในตารางที่ 4-13 พบว่า เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไคโทซาน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งแบบ 2 และ 3 ตัวแปร มีผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05

4.2.6 ความทึบแสง (Opacity)

ตารางที่ 4-9 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่า การลอยฟองอากาศส่งผลต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบเล็กน้อย โดยค่าความทึบแสงหลังการลอยฟองอากาศมีแนวโน้มต่ำกว่าก่อนการลอยฟองอากาศในทุกกรณี ไม่ว่าจะเป็แผ่นทดสอบจากสภาวะควบคุมหรือแผ่นทดสอบจากการทดลองเติมสารเคมีชนิดต่างๆ และในทุกๆ ปริมาณที่เติม ทั้งนี้อาจเนื่องจากการลอยฟองอากาศทำให้อนุภาคของหมึกที่หลุดออกจากเส้นใยนั้น เกาะติดและถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคของหมึกจึงลดลง เมื่อการดูดกลืนแสงลดลง จะส่งผลให้การทะลุผ่านของแสงเพิ่มขึ้น นั่นคือค่าความทึบแสงมีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้การลอยฟองอากาศยังอาจทำให้เกิดการสูญเสียเส้นใยขนาดเล็กที่มีพื้นที่ในการกระเจิงแสงมาก ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กนี้อาจเกาะติดไปกับฟองอากาศ เมื่อมีการกระเจิงแสงน้อย แสงก็สามารถทะลุผ่านไปได้มาก ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบจึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้พบว่า การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลต่อค่าความทึบแสงภายหลังการลอยฟองอากาศของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นค่าความทึบแสงที่นำไปใช้จริง ในทิศทางที่ลดลง (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 26) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุลบ จึงอาจช่วยเพิ่มประจุลบให้กับระบบ ทำให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีและสม่ำเสมอ จึงช่วยให้เส้นใยแนบชิดกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ลดพื้นที่ในการกระเจิงแสง ค่าความทึบแสงจึงลดลง รวมทั้งจากปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ และความขาวสว่าง

แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกที่สูงขึ้น อนุภาคหมึกที่เหลืออยู่ และการดูดกลืนแสง จึงลดลง ทำให้ค่าความทึบแสงลดลงด้วย

ตารางที่ 4-9 ค่าเฉลี่ยความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการ ทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ความทึบแสงก่อนการ ลอยฟองอากาศ	ความทึบแสงหลังการ ลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan	ลอยฟองอากาศ	ลอยฟองอากาศ
				(%)	(%)
1	0	0	0	99.76±0.14	99.30±0.17
2	0	0	0.1	99.90±0.15	99.71±0.16
3	0	0	0.3	99.75±0.24	99.70±0.23
4	0	0.2	0	99.29±0.45	99.09±0.14
5	0	0.2	0.1	99.33±0.40	99.11±0.17
6	0	0.2	0.3	99.94±0.21	99.57±0.15
7	0	0.4	0	99.64±0.40	99.27±0.10
8	0	0.4	0.1	99.62±0.32	99.30±0.22
9	0	0.4	0.3	99.93±0.14	99.60±0.18
10	3	0	0	99.89±0.09	97.79±0.37
11	3	0	0.1	99.78±0.16	99.40±0.16
12	3	0	0.3	99.93±0.14	99.60±0.12
13	3	0.2	0	99.66±0.11	99.03±0.17
14	3	0.2	0.1	99.75±0.10	99.09±0.12
15	3	0.2	0.3	99.82±0.21	99.51±0.26
16	3	0.4	0	99.66±0.21	98.99±0.13
17	3	0.4	0.1	99.81±0.08	99.12±0.15
18	3	0.4	0.3	99.88±0.17	99.49±0.25
19	6	0	0	99.92±0.16	99.33±0.10
20	6	0	0.1	99.97±0.39	99.70±0.15
21	6	0	0.3	99.99±0.13	99.77±0.08
22	6	0.2	0	99.88±0.24	99.65±0.74
23	6	0.2	0.1	99.76±0.17	99.53±0.08
24	6	0.2	0.3	99.81±0.23	99.83±0.26
25	6	0.4	0	99.78±0.15	99.24±0.16
26	6	0.4	0.1	99.85±0.18	99.68±0.20
27	6	0.4	0.3	99.83±0.18	99.42±0.24

ในขณะที่เฮปทานอลมีผลต่อความทึบแสงรองลงมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเฮปทานอลเป็นสารที่ทำให้เกิดฟอง เมื่อเกิดฟองมากขึ้น เส้นใยขนาดเล็กมีโอกาสหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศมากขึ้น จึงทำให้พื้นที่ในการกระเจิงแสงลดลง ค่าความทึบแสงจึงลดลง รวมทั้งเฮปทานอลอาจไปทำปฏิกิริยากับสารยึดของหมึก ทำให้หมึกหลุดออกจากผิวหน้าของเส้นใย เส้นใยจึงสามารถแนบกันได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับในกรณีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หากแต่เฮปทานอลไม่ได้ช่วยให้เกิดประจุลบในระบบเหมือนอย่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จึงไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเส้นใย รวมทั้งการเกิดฟองที่มากเกินไปอาจทำให้ฟองชนกันและแตก อนุภาคหมึกจึงอาจยังเหลืออยู่ในระบบ ผลกระทบของการใช้เฮปทานอลต่อความทึบแสงจึงอาจต่ำกว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สำหรับโคโธซานพบว่าส่งผลต่อค่าความทึบแสงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโคโธซานมีประจุบวก จึงอาจจะไปจับกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบแทนการไปจับกับอนุภาคหมึก ทำให้เหลืออนุภาคหมึกในระบบที่สามารถดูดกลืนแสงได้ ค่าความทึบแสงจึงมีค่าสูงกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ

อย่างไรก็ตามหากสังเกตผลการทดลองที่ได้จากค่าความทึบแสงพบว่า ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก โดยเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณสารเคมีที่ใช้พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมากในทุกๆ สารเคมีที่ใช้ และเมื่อนำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนการพิมพ์ ในตารางที่ 4-1 ก็มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วค่าที่วัดได้อาจถือได้ว่าไม่มีความแตกต่างกัน

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล พบว่า เฮปทานอล โคโธซาน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 3 ตัวแปร มีผลต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4-13 ยกเว้นในกรณีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งมีค่าสูงกว่า 0.05 ทั้งนี้อาจเกิดจากช่วงที่กว้างของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่เมื่อพิจารณาจากค่าที่วัดได้ ในทางปฏิบัตินั้นอาจถือได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หนึ่งในกรณีของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 3 ตัวแปร หากมีตัวแปรคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสอยู่ด้วย จะจัดว่าไม่มีผลต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากตัวแปรคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเองซึ่งเป็นตัวแปรหลักไม่มีผลต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.7 ความเรียบ (Smoothness)

ตารางที่ 4-10 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าความเรียบหลังการลอยฟองอากาศมีค่าต่ำกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลอยฟองอากาศทำให้เส้นใยเล็กๆ บางส่วนหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศด้วย จึงอาจทำให้ไม่มีเส้นใยขนาดเล็กไปเติมเต็มช่องว่างตรงผิวหน้าของแผ่นทดสอบ ค่าความเรียบของแผ่นทดสอบจึงลดลง

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้พบว่าการใช้เฮปทานอลเพิ่มขึ้นส่งผลต่อแนวโน้มของค่าความเรียบของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นค่าความเรียบที่นำไปใช้จริงสูงขึ้น ในทิศทางที่เพิ่มขึ้น (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 28) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเฮปทานอลเป็นตัวทำลายสารยึดของหมึก ทำให้หมึกสามารถหลุดออกจากเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยจึงสามารถแนบชิดกันได้ดียิ่งขึ้น เมื่อวัดความเรียบจึงได้ค่าที่สูงขึ้น รวมทั้งเฮปทานอลยังเป็นสารที่มีอิทธิพลต่อค่าความเรียบมากที่สุด ในขณะที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลต่อแนวโน้มของค่าความเรียบในทิศทางที่ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุลบ ทำให้เส้นใยที่มีประจุลบเช่นเดียวกันเกิดการกระจายตัว เส้นใยขนาดเล็กที่จะไปเติมเต็มช่องว่างที่ผิวหน้ากระดาษจึงมีโอกาสหลุดติดออกไปพร้อมกันฟองอากาศมากขึ้น สำหรับไคโทซานอาจไปจับกับเส้นใยขนาดเล็ก ทำให้เส้นใยขนาดเล็กไม่หลุดติดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ จึงยังคงเหลือเส้นใยขนาดเล็กในระบบในการไปอุดช่องว่างที่ผิวหน้ากระดาษ แต่ก็อาจทำให้การไปจับกับอนุภาคหมึกลดลง ประสิทธิภาพจึงไม่สามารถเทียบเท่าการใช้เฮปทานอลได้

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศไปวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียล พบว่า เฮปทานอล ไคโทซาน (ยกเว้นกรณีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร (ยกเว้นกรณีของปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 3 ตัวแปร มีผลต่อค่าความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-10 ค่าเฉลี่ยความเรียบของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการ ทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ความเรียบก่อนการลอย	ความเรียบหลังการลอย
	Heptanol	CMC	Chitosan	ฟองอากาศ (s)	ฟองอากาศ (s)
1	0	0	0	13.51±0.99	13.30±2.93
2	0	0	0.1	15.11±1.53	13.15±1.18
3	0	0	0.3	14.72±1.52	12.29±1.44
4	0	0.2	0	14.36±1.22	13.33±1.46
5	0	0.2	0.1	13.19±1.61	12.26±1.97
6	0	0.2	0.3	13.91±1.42	14.35±1.24
7	0	0.4	0	14.18±0.83	12.47±1.09
8	0	0.4	0.1	14.17±1.13	11.10±1.09
9	0	0.4	0.3	15.22±1.55	16.32±1.67
10	3	0	0	14.86±1.59	14.16±1.01
11	3	0	0.1	14.04±1.52	12.38±1.04
12	3	0	0.3	15.70±3.49	15.02±1.24
13	3	0.2	0	15.26±1.79	15.06±2.79
14	3	0.2	0.1	11.82±1.44	11.84±1.90
15	3	0.2	0.3	13.80±2.38	13.33±1.29
16	3	0.4	0	17.40±3.39	15.31±2.86
17	3	0.4	0.1	12.76±2.31	11.40±1.32
18	3	0.4	0.3	12.36±1.76	11.61±1.21
19	6	0	0	12.64±2.92	13.63±2.86
20	6	0	0.1	15.51±0.79	12.86±1.05
21	6	0	0.3	16.09±1.86	15.47±1.53
22	6	0.2	0	14.19±3.28	15.12±2.13
23	6	0.2	0.1	15.69±1.29	16.29±2.10
24	6	0.2	0.3	13.79±1.94	13.20±1.69
25	6	0.4	0	14.50±2.04	12.32±1.40
26	6	0.4	0.1	16.18±2.14	15.74±1.61
27	6	0.4	0.3	15.03±1.69	14.90±1.63

4.2.8 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

ตารางที่ 4-11 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าการลอยฟองอากาศส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ โดยภายหลังการลอยฟองอากาศ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลอยฟองอากาศทำให้อนุภาคของหมึกที่หลุดออกจากเส้นใยนั้น เกาะติดและถูกกำจัดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ รวมถึงเส้นใยขนาดเล็กอาจติดออกไปกับฟองอากาศด้วย ทำให้ระบบเหลือเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยขนาดเล็ก ความแข็งแรงของเส้นใยจึงมีมากกว่า และเส้นใยสามารถสร้างพันธะกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารเคมีที่ใช้พบว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงภายหลังการลอยฟองอากาศของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่นำไปใช้จริง ในทิศทางที่เพิ่มขึ้น (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 30) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุลบ จึงอาจทำให้เส้นใยซึ่งมีประจุลบเช่นกัน มีการกระจายตัวที่ดี การฟอร์มเป็นแผ่นของเส้นใยมีความสม่ำเสมอ รวมทั้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่อาจสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลสของเส้นใยซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเช่นเดียวกัน จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่นทดสอบ ในขณะที่เฮปทานอลเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดฟอง จึงอาจทำให้เส้นใยขนาดเล็กที่มีความแข็งแรงต่ำหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ เหลือแต่เส้นใยยาวที่มีความแข็งแรงมากกว่าในระบบ รวมทั้งเฮปทานอลอาจไปทำปฏิกิริยากับสารถัดของหมึกทำให้หมึกหลุดออกจากผิวหน้าของเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น เส้นใยจึงสามารถสร้างพันธะกันได้ดียิ่งขึ้น แต่ฟองที่มากเกินไปอาจเกิดการชนกันและแตก ทำให้ยังหลงเหลืออนุภาคหมึกที่อาจไปขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใยได้

สำหรับโคโทซานพบว่าส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศทางที่ลดลงมากที่สุด (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 30) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโคโทซานมีประจุบวก จึงอาจจะไปจับกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบแทนการไปจับกับอนุภาคหมึก และยังทำให้ประจุบวกในระบบเพิ่มขึ้น เส้นใยอาจเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน การกระจายตัวของเส้นใยไม่ดี การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยทำไม่ได้ จึงอาจทำให้แผ่นทดสอบมีดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำ

ตารางที่ 4-11 ค่าเฉลี่ยดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ

ชุดการทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใส่ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนการลอยฟองอากาศ	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการลอยฟองอากาศ
	Heptanol	CMC	Chitosan	(Nm/g)	(Nm/g)
	1	0	0	0	28.81±1.38
2	0	0	0.1	26.08±1.55	27.12±0.65
3	0	0	0.3	27.74±1.14	29.61±0.86
4	0	0.2	0	30.67±2.30	33.01±0.94
5	0	0.2	0.1	30.61±1.84	32.79±1.48
6	0	0.2	0.3	27.42±0.98	28.76±1.04
7	0	0.4	0	29.58±0.93	30.24±0.86
8	0	0.4	0.1	30.32±1.02	29.67±1.20
9	0	0.4	0.3	30.02±1.26	30.57±2.05
10	3	0	0	29.88±1.85	30.86±2.64
11	3	0	0.1	24.67±1.16	27.41±1.21
12	3	0	0.3	28.95±0.85	31.19±1.49
13	3	0.2	0	32.57±1.17	33.95±1.35
14	3	0.2	0.1	31.07±1.52	32.95±1.46
15	3	0.2	0.3	27.54±1.45	28.23±1.00
16	3	0.4	0	31.15±1.05	32.63±1.50
17	3	0.4	0.1	29.66±1.02	30.75±1.39
18	3	0.4	0.3	28.75±0.90	30.25±1.18
19	6	0	0	27.85±1.39	30.28±1.76
20	6	0	0.1	28.00±1.24	30.87±1.08
21	6	0	0.3	27.49±1.68	29.99±0.93
22	6	0.2	0	28.79±1.57	30.42±0.80
23	6	0.2	0.1	28.43±1.33	29.88±0.93
24	6	0.2	0.3	25.47±1.05	28.24±1.65
25	6	0.4	0	30.23±1.69	29.95±1.49
26	6	0.4	0.1	30.28±2.15	31.13±1.68
27	6	0.4	0.3	28.22±0.90	31.01±2.55

โดยเมื่อเปรียบเทียบถึงอิทธิพลของสารทั้งสามชนิดโดยไม่คำนึงถึงทิศทางก็พบว่า ไคโทซานมีอิทธิพลสูงที่สุดต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวอาจไปรบกวนประสิทธิภาพของสารเคมีชนิดอื่นๆ เมื่อมีการใช้งานร่วมกันได้

เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียลของผลการทดลองที่ได้ หลังการลอยฟองอากาศไป พบว่าเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไคโทซาน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 3 ตัวแปร มีผลต่อดัชนีความแข็งแรงดึงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4-13

4.2.9 ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index)

ตารางที่ 4-12 แสดงผลของชนิดสารเคมีและปริมาณที่ใช้ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าการลอยฟองอากาศส่งผลต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบ โดยภายหลังการลอยฟองอากาศ ดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีค่าสูงกว่าก่อนการลอยฟองอากาศ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลอยฟองอากาศทำให้เส้นใยขนาดเล็กติดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้ในระบบเหลือแต่เส้นใยยาวที่มีความแข็งแรงมากกว่า จึงส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น เนื่องจากดัชนีความต้านทานแรงฉีกจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ เป็นสำคัญ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 32) ของอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ พบว่า การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกภายหลังการลอยฟองอากาศของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่นำไปใช้จริง ในทิศทางที่เพิ่มขึ้น และมีอิทธิพลต่อค่าดังกล่าวสูงกว่าการใช้เฮปทานอลและไคโทซาน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุลบ จึงอาจทำให้เส้นใยซึ่งมีประจุลบเช่นกันมีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนระหว่างการลอยฟองอากาศ เส้นใยขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่จึงมีโอกาสมากขึ้นในการเกาะติดไปกับฟองอากาศเหลือแต่เส้นใยยาวในระบบได้

ตารางที่ 4-12 ค่าเฉลี่ยดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อนและหลังการลอย
ฟองอากาศ

ชุดการ ทดลองที่	ปริมาณสารเคมีที่ใส่ (ร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้ง)			ดัชนีความต้านทานแรง ฉีกก่อนการลอย	ดัชนีความต้านทานแรง ฉีกหลังการลอย
	Heptanol	CMC	Chitosan	ฟองอากาศ	ฟองอากาศ
				(mN m ² /g)	(mN m ² /g)
1	0	0	0	6.56±0.59	6.71±0.41
2	0	0	0.1	6.51±0.32	6.69±0.13
3	0	0	0.3	6.82±0.38	7.26±0.32
4	0	0.2	0	6.41±0.40	6.81±0.31
5	0	0.2	0.1	6.60±0.24	6.85±0.38
6	0	0.2	0.3	6.61±0.17	6.72±0.29
7	0	0.4	0	7.02±0.28	7.29±0.25
8	0	0.4	0.1	6.94±0.29	7.15±0.32
9	0	0.4	0.3	6.91±0.33	7.03±0.33
10	3	0	0	6.53±0.18	6.26±0.28
11	3	0	0.1	6.21±0.21	6.64±0.21
12	3	0	0.3	6.82±0.31	6.79±1.20
13	3	0.2	0	6.74±0.19	6.99±0.31
14	3	0.2	0.1	6.51±0.20	6.72±0.32
15	3	0.2	0.3	6.71±0.25	7.07±0.18
16	3	0.4	0	7.17±0.37	7.23±0.37
17	3	0.4	0.1	6.69±0.14	7.06±0.23
18	3	0.4	0.3	6.78±0.23	6.98±0.25
19	6	0	0	6.60±0.26	6.92±0.27
20	6	0	0.1	6.81±0.22	7.20±0.26
21	6	0	0.3	6.48±0.25	6.79±0.34
22	6	0.2	0	7.04±0.34	6.86±0.29
23	6	0.2	0.1	6.79±0.37	6.88±0.21
24	6	0.2	0.3	6.67±0.32	7.08±0.24
25	6	0.4	0	6.86±0.16	6.93±0.27
26	6	0.4	0.1	6.77±0.29	7.06±0.46
27	6	0.4	0.3	6.56±0.18	6.88±0.20

ในขณะที่เฮปทานอลให้เป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดฟอง จึงอาจทำให้เส้นใยขนาดเล็กที่มีความแข็งแรงต่ำหลุดออกไปพร้อมกับฟองอากาศ เหลือแต่เส้นใยยาวที่มีความแข็งแรงมากกว่าในระบบ จึงอาจช่วยเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบได้

สำหรับโคโทซานอาจเป็นเพราะความที่มีประจุบวก จึงอาจจะไปจับกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบ และทำให้ประจุบวกในระบบเพิ่มขึ้น เส้นใยจึงอาจเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เส้นใยมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อวัดดัชนีความต้านทานแรงฉีกโดยรวมจึงต่ำกว่าการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการใช้เฮปทานอล และโคโทซานยังมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนนัก

อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารทั้งสามชนิดต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ 33) พบว่าปฏิสัมพันธ์ที่มีการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเฮปทานอล มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ที่มีการใช้โคโทซาน มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกลดลง โดยเฉพาะเมื่อใช้โคโทซานร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลดลง ซึ่งอาจเกิดจากโคโทซานซึ่งมีประจุบวก ไปจับกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีประจุลบ แทนที่การจับกับอนุภาคของหมึก

เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติตามหลักการแบบแฟกทอเรียลของผลการทดลองที่ได้หลังการลอยฟองอากาศดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโคโทซาน และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโคโทซาน ที่มีผลต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีค่าค่าความน่าจะเป็นมีค่าต่ำกว่า 0.05 นั้น ในความเป็นจริงอาจไม่จัดว่ามีผลต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญได้ เนื่องจากตัวแปรหลักที่อยู่ในปฏิสัมพันธ์นั้นไม่มีผลต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4-13 ค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติต่างๆ

	A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C
Yield	0.000	0.031	0.203	0.004	0.159	0.010	0.496
Freeness	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
LWW	0.580	0.522	0.040	0.053	0.947	0.785	0.032
Fine	0.000	0.000	0.014	0.344	0.125	0.037	0.004
Particle charge	0.416	0.510	0.677	0.167	0.349	0.403	0.986
ERIC	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Brightness	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Opacity	0.000	0.649	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Smoothness	0.000	0.297	0.000	0.092	0.000	0.046	0.000
Tensile Index	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Tear Index	0.160	0.000	0.443	0.000	0.297	0.004	0.004

หมายเหตุ A คือ เฮปทานอล

B คือ คาร์บอนกึ่งเมทิลเซลลูโลส

C คือ ไคโทซาน

A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและคาร์บอนกึ่งเมทิลเซลลูโลส

A*C คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฮปทานอลและไคโทซาน

B*C คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนกึ่งเมทิลเซลลูโลสและไคโทซาน

A*B*C คือ ปฏิสัมพันธ์ของสารทั้งสามชนิด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของเฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซานร่วมกัน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกฟลิกโซกราฟีฐานน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะที่ 1 (สภาวะควบคุม) เป็นการทดลองที่ไม่มีการใส่สารเคมีที่เป็นตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ เฮปทานอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไคโทซาน ซึ่งจะทดสอบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการพิมพ์ และกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ฟลิกโซกราฟีฐานน้ำ สภาวะที่ 2 เป็นการทดลองที่มีการใส่สารเคมีที่เป็นตัวแปรที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะทดสอบกับกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ ทั้ง 2 สภาวะจะทดลองโดยในขั้นตอนการตีกระจายเยื่อ มีการใส่สารลดแรงตึงผิว และจะใช้ค่าความเป็นกรด-เบสที่ $\text{pH } 5 \pm 0.2$ โดยเลือกใช้สภาวะที่เป็นกรดเนื่องจากหมึกพิมพ์ฟลิกโซกราฟีฐานน้ำจะกระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กเกินไปในสภาวะที่เป็นด่าง ทำให้อนุภาคหมึกอาจย้อนกลับไปที่เส้นใย ในการทดลองจึงเลือกใช้สภาวะที่เป็นกรด สำหรับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการตีกระจาย และการลอยฟองอากาศ ทั้ง 2 สภาวะกำหนดให้ใช้ค่าเดียวกัน ทั้งนี้ตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณเฮปทานอล ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และปริมาณไคโทซาน เพื่อศึกษาถึงผลของตัวแปรดังกล่าวต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกฟลิกโซกราฟีฐานน้ำออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ คือ ภายหลังจากการลอยฟองอากาศ สภาพระบายได้ของเยื่อและความยาวของเส้นใยในระบบสูงขึ้น ในขณะที่ร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กลดลง สำหรับแผ่นทดสอบนั้นการลอยฟองอากาศส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ความทึบแสง และความเรียบมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความขาวสว่าง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่าก่อนการลอยฟองอากาศ แต่เมื่อมีการเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนการพิมพ์พบว่าสมบัติของกระดาษภายหลังจากการลอยฟองอากาศทั้งในกรณีที่ไม่ใส่ และไม่ใส่สารเคมี ยังให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ และความขาวสว่างไม่เทียบเท่ากระดาษที่ยังไม่ผ่านการพิมพ์

5.1.2 อิทธิพลของชนิดของสารเคมีที่ใช้ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ พบว่าการใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด คือ ให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ต่ำที่สุด โดยให้ค่าความขาวสว่าง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีกสูงที่สุด โดยดีว่าการใช้เฉพาะเฮปทานอล และโคโทซาน ตามลำดับ โดยการใส่เฮปทานอลจะส่งผลชัดเจนต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ ในขณะที่สารอีกสองชนิดจะไม่ส่งผลที่ชัดเจน สำหรับโคโทซานจะให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่สูงที่สุด โดยให้ค่าความขาวสว่าง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความต้านทานแรงฉีกต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ

5.1.3 อิทธิพลของปริมาณของสารเคมีที่ใช้ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ โดยการใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโคโทซานพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ผลที่ได้จะมีแนวโน้มที่ชัดเจนมากกว่าการใช้เฮปทานอล คือ การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเมื่อใช้เพิ่มขึ้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ในขณะที่โคโทซานจะให้แนวโน้มที่ลดลง แต่สำหรับเฮปทานอลนั้นพบว่า เมื่อมีการใช้จะให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง จากปริมาณฟองที่มากเกินไป

5.2 อิทธิพลของการใช้สารเคมีต่างๆ ร่วมกันส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ โดยการใส่เฮปทานอลจะไม่ส่งผลต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมากนัก แต่มีแนวโน้มที่จะให้สมบัติที่ดีขึ้น สำหรับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเฮปทานอลเมื่อมีการใช้ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารเคมีนั้นๆ เพิ่มขึ้น ในขณะที่โคโทซานจะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดหมึกลดลง โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรทดลองด้วยการใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) เพื่อวิเคราะห์การเกาะกลุ่มกันของเส้นใย เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ส่งผลต่อการเกาะกลุ่ม และการกระจายตัวของเส้นใยแตกต่างกัน ซึ่งการเกาะกลุ่มของเส้นใยจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ และเพื่อวิเคราะห์การกลับมาติดของอนุภาคหมึกที่เส้นใย

5.3.2 ควรทดลองลอยฟองอากาศที่ระยะเวลา และอัตราการไหลของอากาศในระดับต่างๆ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของฟองอากาศต่อประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกออก

5.3.3 ควรทดลองโดยใช้สารเคมีในระดับต่างๆ เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาผลให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น เนื่องจากในบางสมบัติผลที่ได้ อาจยังไม่เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนมากนัก

รายการอ้างอิง

- [1] Gottsching, L., and Parkarinen, H. Papermaking Science and Technology 7: Recycled Fiber and Deinking. Atlanta: TAPPI PRESS, 2000.
- [2] Ferguson, L.D. Deinking Chemistry: Part 2. TAPPI Journal 75, 8 (1992): 49-58.
- [3] Larsson, A. Surface Chemistry in Flotation Deinking, Paper Technology and Industry. 28, 2 (1987): 388-390.
- [4] Carleton, R.J. The Effect of Electrohydraulic Discharge on Flotation Deinking Efficiency. Master's Thesis, School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, 2004.
- [5] McCormick, D. Chemistry of Flotation and Washing for Deinking Newsprint Part II: Particle Interactions and Systems. Atlanta: TAPPI PRESS, 1991.
- [6] Bajpai, P. Advances in Recycling and Deinking. Surrey: Pira International, 2006.
- [7] Heindel, T.J. Fundamentals of flotation deinking. TAPPI Journal 82, 3 (1999): 115-124.
- [8] Ferguson, L.D. Flotation Deinking Chemistry: 1994 Deinking Short Course. Atlanta: TAPPI PRESS, 1994.
- [9] Ferguson, L.D. The Role of pulper Chemistry in Deinking: 1991 Pulping Conference. Atlanta: TAPPI PRESS, 1991
- [10] Ferguson, L.D. Deinking Chemistry: Part 1. TAPPI Journal 75, 8 (1992): 75-83.
- [11] Ben, Y., Dagenasis, M., and Dorris, G.M. Irreversible Ink Redeposition During Repulping Part 1. Journal of Pulp and Paper Science 26, 3 (2000): 83-89.
- [12] Carre, B., Magnin, L., Galland, G., and Vernac, Y. Deinking difficulties related to ink formulation: printing process and pype of paper. TAPPI Journal 83, 6 (2000): 1-33.
- [13] Alcohol, [Online]. (n.d.) Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alcohol>, [2010, November 26]
- [14] Cheremisinoff, N.P. Industrial Solvents Handbook. 2nd edition. New York: Marcel Dekker, 2003.

- [15] Behin, J., and Vahed, Sh. Effect of Alkyl Chain in Alcohol Deinking of Recycled Fibers by Flotation Process. Colloids and Surface A: Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects 297 (2000): 131-141.
- [16] 1-Heptanol, [Online]. (n.d.) Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/1-Heptanol>, [2010, November 27]
- [17] Kloow, G. Papermaking Science and Technology 11: Recycled Fiber and Deinking. Atlanta: TAPPI PRESS, 2000.
- [18] Watanabe, M., Gondo, T., and Kitao, O. Advanced Wet-End System with Carboxymethyl-Cellulose. TAPPI Journal 3, 5 (2004): 15-19.
- [19] Carboxymethyl Cellulose, [Online]. (n.d.) Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Carboxymethyl_cellulose [2010, November 24]
- [20] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโทซาน. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.) 2543.
- [21] เกษม สีดอกบวบ. การกำจัดอิมพริวนโลหะหนักในน้ำเสียโดยไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [22] Muzzarelli, R.A.A. Chitin. Great Britain: Pergamon Press, 1977.
- [23] การผลิตไคตินและไคโทซาน, [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.) Available from: <http://www.material.chula.ac.th/CCB/document/productions.pdf> [2553, พฤศจิกายน 24]
- [24] T 227 om-99. Freeness of pulp (Canadian standard method). Georgia: TAPPI Press, 1999.
- [25] T 205 sp-02. Forming handsheets for physical tests of pulp. Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [26] T 452 om-98. Brightness of pulp, paper, and paperboard (directional reflectance at 457 nm). Georgia: TAPPI Press, 1998.
- [27] T 567 pm-97. Determination of effective residual ink concentration by infrared reflectance measurement. Georgia: TAPPI Press, 1997.
- [28] ธนาวุธ ลิ้มพานิชย์. การใช้คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับเซลลูโลสในการดั่งหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

- [29] ปนัดดา กลิ่นบัว. การใช้ไคโทซานและเซลลูเลสในการกำจัดหมึกจากกระดาษที่พิมพ์ด้วยโทนเนอร์ด้วยวิธีลอยฟองอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [30] ธนพล ว่องวานิช. ผลของไคโทซานต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทนเนอร์ด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [31] T 525 om-02. Diffuse brightness of pulp (d/0). Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [32] T 519 om-02. Diffuse opacity of paper (d/0 paper backing). Georgia: TAPPI Press, 2002.
- [33] T 479 cm-99. Smoothness of paper (Bekk method). Georgia: TAPPI Press, 1999.
- [34] T 494 om-01. Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). Georgia: TAPPI Press, 2001.
- [35] T 414 om-98. Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method). Georgia: TAPPI Press, 1998.
- [36] Liimatainen, H., Haavisto, S., Haapala, A., and Niinimaki, J. Influence of Adsorbed and Dissolved Carboxymethyl Cellulose of Fiber Suspension Dispersing, Dewaterability, and Fines Retention. Bioresources.com 4, 1 (2009): 321-340.
- [37] Anti-redeposition Agents, [Online]. (n.d.) Available from: http://www.scienceinthebox.com/en_UK/glossary/antiredepositionagents_en.html [2011, May 1]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

การคำนวณปริมาณหมึกที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ

ปริมาณหมึกที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ (Ink coverage) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักหมึกบนกระดาษต่อน้ำหนักกระดาษเปล่าที่ยังไม่ได้พิมพ์ โดยน้ำหนักของหมึกที่พิมพ์บนกระดาษมีค่าเท่ากับน้ำหนักกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้ว ลบออกด้วยน้ำหนักกระดาษที่ยังไม่ได้ผ่านการพิมพ์ ในปริมาณพื้นที่ที่เท่ากัน โดยคำนวณได้จาก

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

กระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาณหมึกที่ปกคลุมผิวหน้าของกระดาษ เท่ากับร้อยละ 1.30 โดยคำนวณจากน้ำหนักกระดาษที่ยังไม่ได้พิมพ์ 1 แผ่นหนักเฉลี่ย 4.424 กรัม และกระดาษที่ผ่านการพิมพ์แล้ว 1 แผ่นหนักเฉลี่ย 4.482 กรัม

การคำนวณหาปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น (Moisture content) ในกระดาษคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในแผ่นกระดาษ ต่อน้ำหนักทั้งหมดของกระดาษก่อนอบ โดยน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นในแผ่นกระดาษมีค่าเท่ากับน้ำหนักกระดาษก่อนอบ ลบออกด้วยน้ำหนักกระดาษหลังอบ โดยคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}}{\text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}} \times 100$$

การคำนวณหาน้ำหนักเยื่อแห้ง

ปริมาณความชื้นของกระดาษที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.0 และน้ำหนักของกระดาษที่นำมาใช้ในการทดลองต่อ 1 สภาวะ จำนวน 65 แผ่น มีน้ำหนักที่ยังไม่ได้หักความชื้นออกเท่ากับ 297.4 กรัม

$$\text{ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษ} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษทั้งหมด} \times \text{ร้อยละความชื้นของกระดาษ}}{100}$$

$$\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} = \text{น้ำหนักกระดาษทั้งหมด} - \text{ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษ}$$

จะได้ว่า ปริมาณน้ำที่อยู่ในกระดาษ คือ 26.523 กรัม

ดังนั้นน้ำหนักเยื่อแห้ง คือ 268.177 กรัม

การคำนวณความเข้มข้นของน้ำเยื่อ

ความเข้มข้นของเยื่อ (Pulp consistency) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักเยื่อแห้งต่อน้ำหนักน้ำเยื่อทั้งหมด หรือเท่ากับน้ำหนักเยื่อแห้ง บวกกับน้ำหนักน้ำ โดยคำนวณได้จาก

$$\text{ความเข้มข้นของเยื่อ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง}}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}} \times 100$$

การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้

$$\text{ปริมาณสารที่ใช้ (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} \times \text{ร้อยละของสารที่ใช้}}{100}$$

การคำนวณปริมาณสารลดแรงตึงผิว ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้สารลดแรงตึงผิว 0.2 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้สารลดแรงตึงผิว เท่ากับ 0.5364 กรัม

การคำนวณปริมาณเฮปทานอล

- ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้เฮปทานอล 3 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้เฮปทานอล เท่ากับ 8.045 กรัม

- ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้เฮปทานอล 6 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้เฮปทานอล เท่ากับ 16.091 กรัม

การคำนวณปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

- ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้เฮปทานอล 0.2 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เท่ากับ 0.536 กรัม

- ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้เฮปทานอล 0.4 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เท่ากับ 1.073 กรัม

การคำนวณปริมาณโคโทซาน

- ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้เฮปทานอล 0.1 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้โคโทซาน เท่ากับ 0.268 กรัม

- ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง

คำนวณจาก น้ำหนักเยื่อแห้ง 100 กรัม จะใช้เฮปทานอล 6 กรัม ถ้ามีเยื่อแห้ง 268.177 กรัม จะใช้โคโทซาน เท่ากับ 0.804 กรัม

หมายเหตุ การซังสารเคมี จะซังจากสารที่ได้มีการเจือจางไว้แล้ว เพื่อลดความผิดพลาดจากการซังสารในปริมาณน้อย

การคำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้

คำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\text{น้ำหนักเยื่อที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ} - \text{น้ำหนักหมักที่ถูกกำจัด}}{\text{น้ำหนักเยื่อที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ}} \times 100$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบของผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ปริมาณผลผลิตที่ได้ ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Yield (%)		
	1	2	ave.
control-Plain	95.079	94.925	95.002
control-Printed	92.444	93.962	93.203
0/0/0.1	93.763	93.056	93.410
0/0/0.3	93.112	93.710	93.411
0/0.2/0	93.899	93.530	93.715
0/0.2/0.1	93.927	93.230	93.579
0/0.2/0.3	94.022	94.366	94.194
0/0.4/0	95.089	94.691	94.890
0/0.4/0.1	94.548	94.751	94.650
0/0.4/0.3	93.952	95.190	94.571
3/0/0	86.090	87.048	86.569
3/0/0.1	86.783	87.071	86.927
3/0/0.3	88.609	88.303	88.456
3/0.2/0	86.761	87.510	87.136
3/0.2/0.1	87.073	87.026	87.050
3/0.2/0.3	88.165	87.190	87.678
3/0.4/0	87.813	87.885	87.849
3/0.4/0.1	85.831	85.766	85.799
3/0.4/0.3	83.909	85.040	84.475
6/0/0	83.890	83.971	83.931
6/0/0.1	84.131	83.900	84.016
6/0/0.3	83.965	84.339	84.152
6/0.2/0	87.580	86.994	87.287
6/0.2/0.1	85.256	87.515	86.386
6/0.2/0.3	84.680	87.169	85.925
6/0.4/0	88.984	88.196	88.590
6/0.4/0.1	91.768	85.184	88.476
6/0.4/0.3	85.511	81.750	83.631

ตารางที่ 2 ค่าสภาพระบายนํ้าของเยื่อก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Freeness (ml)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	293.0	282.0	287.5	308.5	282.0	295.3
control-Printed	297.0	285.0	291.0	286.5	298.5	292.5
0/0/0.1	297.0	271.0	284.0	297.0	314.0	305.5
0/0/0.3	310.5	315.0	312.8	334.5	342.5	338.5
0/0.2/0	225.5	223.0	224.3	258.0	250.5	254.3
0/0.2/0.1	267.5	280.5	274.0	294.0	270.0	282.0
0/0.2/0.3	268.0	268.0	268.0	297.5	290.0	293.8
0/0.4/0	197.0	193.0	195.0	219.5	210.0	214.8
0/0.4/0.1	205.5	219.5	212.5	225.5	233.5	229.5
0/0.4/0.3	243.0	241.0	242.0	256.0	266.0	261.0
3/0/0	271.0	282.0	276.5	281.5	285.0	283.3
3/0/0.1	299.0	293.0	296.0	289.5	319.0	304.3
3/0/0.3	297.0	297.0	297.0	287.0	301.5	294.3
3/0.2/0	230.0	253.0	241.5	236.0	230.5	233.3
3/0.2/0.1	260.5	244.5	252.5	255.5	253.0	254.3
3/0.2/0.3	288.0	285.0	286.5	277.0	296.0	286.5
3/0.4/0	188.0	192.0	190.0	184.0	191.5	187.8
3/0.4/0.1	215.0	201.0	208.0	223.0	204.0	213.5
3/0.4/0.3	253.0	254.5	253.8	243.0	255.5	249.3
6/0/0	257.5	271.0	264.3	254.5	257.5	256.0
6/0/0.1	260.5	256.0	258.3	246.5	262.0	254.3
6/0/0.3	283.0	297.0	290.0	294.0	295.5	294.8
6/0.2/0	221.5	199.0	210.3	190.5	191.0	190.8
6/0.2/0.1	253.5	248.0	250.8	242.0	254.0	248.0
6/0.2/0.3	288.0	286.0	287.0	278.0	265.0	271.5
6/0.4/0	209.5	202.0	205.8	199.5	201.5	200.5
6/0.4/0.1	214.5	217.0	215.8	202.5	212.0	207.3
6/0.4/0.3	262.0	272.5	267.3	257.5	263.5	260.5

ตารางที่ 3 ความยาวของเส้นใยก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	LWW (mm)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	1.635	1.701	1.668	1.809	1.644	1.727
control-Printed	1.639	1.846	1.742	1.744	1.775	1.760
0/0/0.1	1.656	1.553	1.605	1.576	1.626	1.601
0/0/0.3	1.586	1.638	1.612	1.710	1.654	1.682
0/0.2/0	1.673	1.702	1.688	1.729	1.637	1.683
0/0.2/0.1	1.619	1.531	1.575	1.649	1.534	1.591
0/0.2/0.3	1.605	1.573	1.589	1.634	1.689	1.661
0/0.4/0	1.735	1.640	1.688	1.568	1.617	1.592
0/0.4/0.1	1.674	1.739	1.706	1.646	1.708	1.677
0/0.4/0.3	1.767	1.652	1.709	1.599	1.663	1.631
3/0/0	1.697	1.526	1.612	281.5	285.0	283.3
3/0/0.1	1.599	1.620	1.609	289.5	319.0	304.3
3/0/0.3	1.632	1.660	1.646	287.0	301.5	294.3
3/0.2/0	1.674	1.679	1.676	236.0	230.5	233.3
3/0.2/0.1	1.579	1.691	1.635	255.5	253.0	254.3
3/0.2/0.3	1.671	1.577	1.624	277.0	296.0	286.5
3/0.4/0	1.633	1.610	1.621	184.0	191.5	187.8
3/0.4/0.1	1.600	1.534	1.567	223.0	204.0	213.5
3/0.4/0.3	1.552	1.666	1.609	243.0	255.5	249.3
6/0/0	1.657	1.656	1.656	1.592	1.688	1.640
6/0/0.1	1.646	1.563	1.604	1.597	1.614	1.605
6/0/0.3	1.693	1.610	1.651	1.646	1.694	1.670
6/0.2/0	1.573	1.651	1.612	1.701	1.647	1.674
6/0.2/0.1	1.583	1.620	1.601	1.556	1.706	1.631
6/0.2/0.3	1.452	1.566	1.509	1.606	1.695	1.650
6/0.4/0	1.556	1.630	1.593	1.595	1.742	1.668
6/0.4/0.1	1.635	1.611	1.623	1.577	1.720	1.649
6/0.4/0.3	1.581	1.587	1.584	1.618	1.681	1.649

ตารางที่ 4 ร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Fine (%)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	37.460	35.433	36.446	35.887	36.181	36.034
control-Printed	36.823	36.988	36.905	35.346	34.419	34.882
0/0/0.1	38.344	38.547	38.445	38.687	38.539	38.613
0/0/0.3	39.099	38.196	38.647	36.407	37.109	36.758
0/0.2/0	37.040	38.099	37.569	36.960	37.620	37.290
0/0.2/0.1	39.458	38.992	39.225	36.681	38.454	37.567
0/0.2/0.3	37.975	38.533	38.254	37.761	37.238	37.499
0/0.4/0	38.227	40.178	39.203	38.248	39.943	39.095
0/0.4/0.1	40.174	38.907	39.540	37.786	38.196	37.991
0/0.4/0.3	37.371	36.685	37.028	39.083	37.973	38.528
3/0/0	36.476	38.579	37.527	35.592	37.023	36.307
3/0/0.1	38.135	38.936	38.535	37.371	37.237	37.304
3/0/0.3	37.544	37.677	37.610	37.258	36.719	36.988
3/0.2/0	38.786	40.159	39.472	36.215	37.456	36.835
3/0.2/0.1	39.767	37.950	38.859	36.901	38.263	37.582
3/0.2/0.3	37.786	37.749	37.767	37.698	37.145	37.422
3/0.4/0	38.906	37.887	38.396	37.127	36.510	36.818
3/0.4/0.1	37.512	37.351	37.432	37.648	38.110	37.879
3/0.4/0.3	38.069	37.976	38.022	38.720	38.978	38.849
6/0/0	40.265	38.662	39.464	39.287	38.017	38.652
6/0/0.1	37.684	38.530	38.107	38.367	38.043	38.205
6/0/0.3	39.005	38.473	38.739	37.699	37.808	37.753
6/0.2/0	38.538	38.589	38.563	38.165	37.686	37.925
6/0.2/0.1	39.922	37.880	38.901	40.089	38.122	39.105
6/0.2/0.3	41.466	39.805	40.636	38.411	38.288	38.350
6/0.4/0	39.493	39.087	39.290	40.311	37.990	39.150
6/0.4/0.1	39.185	39.572	39.378	39.006	38.222	38.614
6/0.4/0.3	38.841	40.209	39.525	39.435	38.239	38.837

ตารางที่ 5 ความเป็นประจุของน้ำเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Particle charge (mV)			
	1	2	3	ave.
control-Plain	-658	-649	-620	-642
control-Printed	-519	-526	-503	-516
0/0/0.1	-481	-463	-483	-476
0/0/0.3	-506	-502	-468	-492
0/0.2/0	-479	-476	-468	-474
0/0.2/0.1	-482	-488	-476	-482
0/0.2/0.3	-488	-492	-496	-492
0/0.4/0	-520	-521	-522	-521
0/0.4/0.1	-514	-512	-506	-511
0/0.4/0.3	-484	-488	-507	-493
3/0/0	-483	-485	-486	-485
3/0/0.1	-476	-472	-468	-472
3/0/0.3	-461	-468	-454	-461
3/0.2/0	-482	-479	-468	-476
3/0.2/0.1	-498	-492	-486	-492
3/0.2/0.3	-503	-479	-474	-485
3/0.4/0	-483	-478	-474	-478
3/0.4/0.1	-492	-495	-462	-483
3/0.4/0.3	-460	-470	-496	-475
6/0/0	-494	-478	-472	-481
6/0/0.1	-480	-463	-492	-478
6/0/0.3	-469	-493	-468	-477
6/0.2/0	-462	-472	-451	-462
6/0.2/0.1	-469	-493	-481	-481
6/0.2/0.3	-505	-472	-480	-486
6/0.4/0	-479	-466	-478	-474
6/0.4/0.1	-486	-468	-478	-477
6/0.4/0.3	-480	-483	-487	-483

ตารางที่ 6 ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	ERIC					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	243.75	262.61	253.18	190.91	198.14	194.53
control-Printed	2394.09	2403.00	2398.54	1383.49	1359.23	1371.36
0/0/0.1	2444.54	2441.70	2443.12	1510.07	1516.65	1513.36
0/0/0.3	2519.52	2557.09	2538.30	1605.47	1612.28	1608.87
0/0.2/0	1780.59	1672.32	1726.46	1009.40	988.64	999.02
0/0.2/0.1	1992.59	1827.66	1910.12	1145.78	1121.73	1133.76
0/0.2/0.3	2432.68	2439.49	2436.08	1545.89	1557.28	1551.59
0/0.4/0	1554.22	1539.48	1546.85	934.39	957.87	946.13
0/0.4/0.1	1671.51	1635.54	1653.53	1002.83	970.56	986.70
0/0.4/0.3	2068.73	2139.53	2104.13	1300.90	1248.66	1274.78
3/0/0	2282.44	2252.19	2267.32	1115.40	1119.84	1117.62
3/0/0.1	2354.26	2332.14	2343.20	1361.74	1318.26	1340.00
3/0/0.3	2525.85	2486.51	2506.18	1588.73	1491.05	1539.89
3/0.2/0	1800.00	1794.59	1797.30	959.01	984.31	971.66
3/0.2/0.1	2027.10	1906.87	1966.99	1087.28	1052.16	1069.72
3/0.2/0.3	2220.00	2234.62	2227.31	1306.98	1304.38	1305.68
3/0.4/0	1806.42	1729.39	1767.90	972.76	931.48	952.12
3/0.4/0.1	1947.74	1875.24	1911.49	1058.69	1012.15	1035.42
3/0.4/0.3	2153.57	2138.80	2146.18	1129.74	1157.97	1143.85
6/0/0	1936.67	1880.87	1908.77	1187.71	1189.91	1188.81
6/0/0.1	2197.20	2152.81	2175.01	1423.85	1472.43	1448.14
6/0/0.3	2420.08	2316.90	2368.49	1679.69	1711.79	1695.74
6/0.2/0	1814.93	1753.02	1783.98	1262.49	1237.75	1250.12
6/0.2/0.1	1857.22	1857.89	1857.56	1306.62	1318.46	1312.54
6/0.2/0.3	2069.68	2043.39	2056.54	1471.80	1484.83	1478.31
6/0.4/0	1793.15	1732.94	1763.04	1210.10	1209.70	1209.90
6/0.4/0.1	1908.25	1849.95	1879.10	1463.96	1350.79	1407.38
6/0.4/0.3	1824.16	1835.93	1830.04	1273.17	1187.12	1230.14

ตารางที่ 7 ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Brightness (%)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	56.54	56.59	56.57	57.67	57.75	57.71
control-Printed	34.51	34.80	34.66	41.15	41.57	41.36
0/0/0.1	32.93	33.71	33.32	39.26	39.76	39.51
0/0/0.3	33.19	33.81	33.50	39.35	39.55	39.45
0/0.2/0	38.99	39.71	39.35	45.47	45.74	45.61
0/0.2/0.1	36.59	37.76	37.17	43.10	43.65	43.37
0/0.2/0.3	34.46	34.43	34.45	40.24	40.10	40.17
0/0.4/0	41.18	41.44	41.31	46.84	46.69	46.77
0/0.4/0.1	40.12	40.54	40.33	45.93	46.35	46.14
0/0.4/0.3	35.84	36.31	36.08	41.71	42.89	42.30
3/0/0	36.29	36.44	36.36	44.76	44.68	44.72
3/0/0.1	35.12	35.62	35.37	41.64	42.36	42.00
3/0/0.3	34.80	35.45	35.12	40.59	41.61	41.10
3/0.2/0	39.11	38.51	38.81	46.21	45.62	45.92
3/0.2/0.1	37.48	38.54	38.01	44.68	45.30	44.99
3/0.2/0.3	34.94	36.02	35.48	41.61	42.98	42.29
3/0.4/0	39.36	40.51	39.94	46.25	46.88	46.57
3/0.4/0.1	38.39	39.30	38.85	45.20	45.90	45.55
3/0.4/0.3	37.11	37.38	37.24	44.64	44.53	44.59
6/0/0	39.70	40.34	40.02	45.31	45.13	45.22
6/0/0.1	37.77	38.32	38.04	42.90	42.58	42.74
6/0/0.3	36.36	37.14	36.75	40.74	40.55	40.65
6/0.2/0	41.02	41.45	41.24	44.85	45.12	44.99
6/0.2/0.1	40.08	40.47	40.28	44.08	44.27	44.18
6/0.2/0.3	38.95	39.08	39.01	42.81	42.72	42.77
6/0.4/0	41.18	41.62	41.40	45.64	45.75	45.69
6/0.4/0.1	40.09	40.64	40.37	43.16	44.39	43.78
6/0.4/0.3	40.98	40.95	40.97	45.02	45.61	45.31

ตารางที่ 8 ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Opacity (%)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	97.66	98.06	97.86	96.76	96.66	96.71
control-Printed	99.85	99.67	99.76	99.20	99.40	99.30
0/0/0.1	99.88	99.92	99.90	99.74	99.68	99.71
0/0/0.3	99.66	99.83	99.75	99.66	99.73	99.70
0/0.2/0	99.71	98.88	99.29	99.19	98.98	99.09
0/0.2/0.1	99.70	98.96	99.33	98.98	99.24	99.11
0/0.2/0.3	99.88	99.99	99.94	99.54	99.59	99.57
0/0.4/0	99.85	99.42	99.64	99.27	99.26	99.27
0/0.4/0.1	99.49	99.75	99.62	99.36	99.24	99.30
0/0.4/0.3	99.97	99.88	99.93	99.60	99.61	99.60
3/0/0	99.86	99.91	99.89	97.55	98.03	97.79
3/0/0.1	99.76	99.80	99.78	99.29	99.50	99.40
3/0/0.3	99.88	99.98	99.93	99.66	99.53	99.60
3/0.2/0	99.64	99.69	99.66	99.03	99.03	99.03
3/0.2/0.1	99.79	99.71	99.75	99.15	99.02	99.09
3/0.2/0.3	99.73	99.91	99.82	99.32	99.70	99.51
3/0.4/0	99.61	99.72	99.66	99.08	98.89	98.99
3/0.4/0.1	99.78	99.85	99.81	99.22	99.02	99.12
3/0.4/0.3	99.84	99.92	99.88	99.30	99.68	99.49
6/0/0	99.92	99.92	99.92	99.40	99.27	99.33
6/0/0.1	100.11	99.83	99.97	99.69	99.71	99.70
6/0/0.3	99.96	100.02	99.99	99.77	99.78	99.77
6/0.2/0	99.73	100.03	99.88	99.80	99.51	99.65
6/0.2/0.1	99.79	99.73	99.76	99.50	99.55	99.53
6/0.2/0.3	99.93	99.69	99.81	100.03	99.63	99.83
6/0.4/0	99.84	99.72	99.78	99.25	99.23	99.24
6/0.4/0.1	99.81	99.90	99.85	99.56	99.79	99.68
6/0.4/0.3	99.69	99.96	99.83	99.59	99.24	99.42

ตารางที่ 9 ค่าความเรียบของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Smoothness (sec)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	15.78	14.53	15.16	12.37	10.70	11.54
control-Printed	13.98	13.03	13.51	15.55	11.05	13.30
0/0/0.1	15.62	14.59	15.11	13.92	12.38	13.15
0/0/0.3	13.90	15.53	14.72	11.13	13.44	12.29
0/0.2/0	14.38	14.33	14.36	14.19	12.47	13.33
0/0.2/0.1	14.19	12.19	13.19	13.27	11.24	12.26
0/0.2/0.3	13.99	13.82	13.91	13.59	15.10	14.35
0/0.4/0	14.16	14.20	14.18	12.05	12.90	12.47
0/0.4/0.1	13.71	14.63	14.17	11.19	11.02	11.10
0/0.4/0.3	16.31	14.12	15.22	17.84	14.81	16.32
3/0/0	15.86	13.86	14.86	14.08	14.24	14.16
3/0/0.1	14.34	13.73	14.04	13.05	11.71	12.38
3/0/0.3	15.83	15.58	15.70	15.09	14.94	15.02
3/0.2/0	16.84	13.67	15.26	17.36	12.75	15.06
3/0.2/0.1	12.69	10.95	11.82	12.49	11.19	11.84
3/0.2/0.3	15.44	12.16	13.80	13.34	13.32	13.33
3/0.4/0	19.22	15.58	17.40	14.82	15.81	15.31
3/0.4/0.1	14.09	11.43	12.76	12.11	10.69	11.40
3/0.4/0.3	13.11	11.61	12.36	11.44	11.77	11.61
6/0/0	15.35	9.92	12.64	14.25	13.00	13.63
6/0/0.1	15.48	15.53	15.51	12.91	12.81	12.86
6/0/0.3	17.47	14.71	16.09	16.45	14.48	15.47
6/0.2/0	16.39	11.99	14.19	14.88	15.35	15.12
6/0.2/0.1	16.01	15.36	15.69	17.68	14.89	16.29
6/0.2/0.3	14.99	12.58	13.79	12.23	14.17	13.20
6/0.4/0	15.64	13.35	14.50	12.06	12.58	12.32
6/0.4/0.1	17.39	14.96	16.18	16.45	15.02	15.74
6/0.4/0.3	14.91	15.16	15.03	14.85	14.94	14.90

ตารางที่ 10 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Tensile (Nm/g)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	28.79	31.24	30.02	30.62	29.07	29.84
control-Printed	28.25	29.37	28.81	30.03	30.33	30.18
0/0/0.1	26.01	26.15	26.08	27.42	26.82	27.12
0/0/0.3	27.78	27.70	27.74	29.76	29.46	29.61
0/0.2/0	32.60	28.74	30.67	33.19	32.82	33.01
0/0.2/0.1	31.99	29.23	30.61	33.99	31.60	32.79
0/0.2/0.3	27.67	27.17	27.42	28.70	28.82	28.76
0/0.4/0	29.52	29.63	29.58	29.90	30.57	30.24
0/0.4/0.1	30.81	29.83	30.32	29.05	30.29	29.67
0/0.4/0.3	30.03	30.00	30.02	30.63	30.52	30.57
3/0/0	29.31	30.45	29.88	30.03	31.68	30.86
3/0/0.1	24.95	24.39	24.67	28.06	26.77	27.41
3/0/0.3	29.45	28.45	28.95	30.96	31.42	31.19
3/0.2/0	33.02	32.12	32.57	34.73	33.16	33.95
3/0.2/0.1	32.04	30.11	31.07	32.04	33.85	32.95
3/0.2/0.3	28.55	26.53	27.54	28.74	27.73	28.23
3/0.4/0	31.34	30.96	31.15	32.50	32.76	32.63
3/0.4/0.1	29.55	29.77	29.66	30.77	30.72	30.75
3/0.4/0.3	29.44	28.06	28.75	30.91	29.59	30.25
6/0/0	28.90	26.80	27.85	29.86	30.69	30.28
6/0/0.1	28.68	27.33	28.00	30.78	30.96	30.87
6/0/0.3	27.86	27.12	27.49	30.36	29.61	29.99
6/0.2/0	29.64	27.93	28.79	30.38	30.46	30.42
6/0.2/0.1	29.37	27.49	28.43	30.38	29.39	29.88
6/0.2/0.3	25.92	25.01	25.47	27.45	29.04	28.24
6/0.4/0	31.05	29.40	30.23	30.16	29.73	29.95
6/0.4/0.1	31.98	28.58	30.28	31.78	30.48	31.13
6/0.4/0.3	28.45	27.99	28.22	31.76	30.25	31.01

ตารางที่ 11 ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบก่อน และหลังการลอยฟองอากาศ

Hep/CMC/Ch	Tear Index (mNm ² /g)					
	ก่อน flotation			หลัง flotation		
	1	2	ave.	1	2	ave.
control-Plain	6.27	6.43	6.35	6.52	6.29	6.40
control-Printed	6.79	6.33	6.56	6.65	6.76	6.71
0/0/0.1	6.70	6.31	6.51	6.76	6.62	6.69
0/0/0.3	7.08	6.57	6.82	7.32	7.20	7.26
0/0.2/0	6.60	6.22	6.41	6.90	6.73	6.81
0/0.2/0.1	6.64	6.56	6.60	6.58	7.13	6.85
0/0.2/0.3	6.56	6.65	6.61	6.69	6.76	6.72
0/0.4/0	7.00	7.04	7.02	7.30	7.27	7.29
0/0.4/0.1	7.06	6.82	6.94	7.20	7.11	7.15
0/0.4/0.3	6.88	6.94	6.91	6.82	7.24	7.03
3/0/0	6.62	6.45	6.53	6.19	6.33	6.26
3/0/0.1	6.12	6.31	6.21	6.67	6.60	6.64
3/0/0.3	6.73	6.91	6.82	7.22	6.37	6.79
3/0.2/0	6.69	6.78	6.74	7.13	6.84	6.99
3/0.2/0.1	6.57	6.45	6.51	6.69	6.75	6.72
3/0.2/0.3	6.63	6.79	6.71	7.08	7.06	7.07
3/0.4/0	7.11	7.24	7.17	7.45	7.00	7.23
3/0.4/0.1	6.64	6.75	6.69	7.02	7.10	7.06
3/0.4/0.3	6.72	6.85	6.78	6.94	7.03	6.98
6/0/0	6.54	6.67	6.60	6.97	6.87	6.92
6/0/0.1	6.83	6.78	6.81	7.18	7.22	7.20
6/0/0.3	6.46	6.51	6.48	6.93	6.66	6.79
6/0.2/0	6.88	7.21	7.04	6.91	6.81	6.86
6/0.2/0.1	6.88	6.70	6.79	6.94	6.83	6.88
6/0.2/0.3	6.63	6.71	6.67	7.22	6.95	7.08
6/0.4/0	6.99	6.74	6.86	6.83	7.03	6.93
6/0.4/0.1	6.92	6.62	6.77	6.71	7.42	7.06
6/0.4/0.3	6.46	6.67	6.56	6.79	6.98	6.88

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ต่อปริมาณผลผลิตที่ได้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	96.782	1.263		76.646
Heptanol	-4.068	.355	-.844	-11.467
CMC	.492	.355	.102	1.387
Chitosan	-.371	.355	-.077	-1.046

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อ ปริมาณผลผลิตที่ได้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	796.343	30.629	20.808	.000
Heptanol	704.399	352.199	239.267	.000
CMC	11.641	5.820	3.954	.031
Chitosan	4.986	2.493	1.694	.203
Heptanol * CMC	29.642	7.411	5.034	.004
Heptanol * Chitosan	10.574	2.643	1.796	.159
CMC * Chitosan	23.960	5.990	4.069	.010
Heptanol * CMC * Chitosan	11.142	1.393	.946	.496
Error	39.744	1.472		
Total	427484.620			
Corrected Total	836.086			

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าสภาพระบายน้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	307.889	6.195		49.698
Heptanol	-16.014	1.741	-.336	-9.200
CMC	-33.292	1.741	-.699	-19.125
Chitosan	24.278	1.741	.510	13.947

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าสภาพระบายน้ของเยื่อภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	156275.500	6010.596	68.422	.000
Heptanol	18599.389	9299.694	105.864	.000
CMC	79826.167	39913.083	454.355	.000
Chitosan	42760.222	21380.111	243.383	.000
Heptanol * CMC	4690.444	1172.611	13.349	.000
Heptanol * Chitosan	1623.056	405.764	4.619	.002
CMC * Chitosan	3918.778	979.694	11.152	.000
Heptanol * CMC * Chitosan	4857.444	607.181	6.912	.000
Error	7115.500	87.846		
Total	7343018.000			
Corrected Total	163391.000			

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อความยาวของเส้นใยภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	1.660	.033		50.878
Heptanol	-.002	.009	-.024	-.250
CMC	.005	.009	.051	.520
Chitosan	-.010	.009	-.103	-1.060

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อความยาวของเส้นใยภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.209	.008	1.515	.082
Heptanol	.006	.003	.548	.580
CMC	.007	.003	.655	.522
Chitosan	.036	.018	3.362	.040
Heptanol * CMC	.052	.013	2.441	.053
Heptanol * Chitosan	.004	.001	.182	.947
CMC * Chitosan	.009	.002	.432	.785
Heptanol * CMC * Chitosan	.096	.012	2.254	.032
Error	.429	.005		
Total	293.116			
Corrected Total	.638			

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กละเอียดภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	35.286	.474		74.442
Heptanol	.465	.133	.298	3.491
CMC	.572	.133	.366	4.295
Chitosan	.224	.133	.143	1.681

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบ Univariate ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อร้อยละของเส้นใยขนาดเล็กละเอียดภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	102.818	3.955	4.404	.000
Heptanol	27.787	13.893	15.473	.000
CMC	23.882	11.941	13.299	.000
Chitosan	8.089	4.044	4.504	.014
Heptanol * CMC	4.094	1.024	1.140	.344
Heptanol * Chitosan	6.692	1.673	1.863	.125
CMC * Chitosan	9.650	2.412	2.687	.037
Heptanol * CMC * Chitosan	22.624	2.828	3.149	.004
Error	72.732	.898		
Total	154549.319			
Corrected Total	175.550			

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อความเป็นประจุของของน้ำเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	-497.420	7.234		-68.761
Heptanol	8.722	2.033	.433	4.291
CMC	-3.259	2.033	-.162	-1.604
Chitosan	1.315	2.033	.065	.647

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อความเป็นประจุของของน้ำเยื่อก่อนการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	15382.840 ^a	591.648	4.862	.000
Heptanol	5202.247	2601.123	21.377	.000
CMC	872.395	436.198	3.585	.035
Chitosan	97.210	48.605	.399	.673
Heptanol * CMC	2731.753	682.938	5.613	.001
Heptanol * Chitosan	1693.827	423.457	3.480	.013
CMC * Chitosan	3637.679	909.420	7.474	.000
Heptanol * CMC * Chitosan	1147.728	143.466	1.179	.329
Error	6570.667	121.679		
Total	1.899E7			
Corrected Total	21953.506			

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ต่อปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	1148.958	31.916		35.999
Heptanol	46.417	8.968	.176	5.176
CMC	-146.521	8.968	-.555	-16.339
Chitosan	156.784	8.968	.594	17.483

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อ ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ ของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1.232E7	473764.289	549.975	.000
Heptanol	1692906.285	846453.142	982.616	.000
CMC	4003002.127	2001501.064	2323.467	.000
Chitosan	4446224.155	2223112.077	2580.727	.000
Heptanol * CMC	567801.582	141950.396	164.785	.000
Heptanol * Chitosan	274262.737	68565.684	79.595	.000
CMC * Chitosan	542947.090	135736.772	157.572	.000
Heptanol * CMC * Chitosan	790727.543	98840.943	114.741	.000
Error	209327.148	861.429		
Total	4.428E8			
Corrected Total	1.253E7			

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าความขาวสว่าง ของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	42.245	.287		147.172
Heptanol	.591	.081	.219	7.331
CMC	1.663	.081	.616	20.625
Chitosan	-1.567	.081	-.580	-19.435

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าความขาวสว่าง ของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1280.094	49.234	345.553	.000
Heptanol	107.162	53.581	376.061	.000
CMC	502.889	251.444	1764.769	.000
Chitosan	442.443	221.222	1552.650	.000
Heptanol * CMC	67.830	16.958	119.017	.000
Heptanol * Chitosan	26.880	6.720	47.164	.000
CMC * Chitosan	32.708	8.177	57.390	.000
Heptanol * CMC * Chitosan	100.181	12.523	87.890	.000
Error	34.623	.142		
Total	515022.222			
Corrected Total	1314.716			

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	98.682	.104		945.973
Heptanol	.085	.029	.153	2.889
CMC	-.010	.029	-.019	-.353
Chitosan	.267	.029	.481	9.096

ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41.716	1.604	28.832	.000
Heptanol	9.758	4.879	87.673	.000
CMC	.048	.024	.434	.649
Chitosan	13.012	6.506	116.910	.000
Heptanol * CMC	3.787	.947	17.013	.000
Heptanol * Chitosan	4.058	1.015	18.232	.000
CMC * Chitosan	5.886	1.472	26.445	.000
Heptanol * CMC * Chitosan	5.166	.646	11.605	.000
Error	13.523	.056		
Total	2665796.605			
Corrected Total	55.239			

ตารางที่ 28 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าความเรียบของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	12.341	.587		21.014
Heptanol	.608	.165	.220	3.684
CMC	-.059	.165	-.021	-.359
Chitosan	.099	.165	.036	.598

ตารางที่ 29 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อค่าความเรียบของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	617.722	23.759	7.648	.000
Heptanol	77.965	38.983	12.548	.000
CMC	7.571	3.785	1.218	.297
Chitosan	56.237	28.118	9.051	.000
Heptanol * CMC	25.155	6.289	2.024	.092
Heptanol * Chitosan	171.305	42.826	13.785	.000
CMC * Chitosan	30.545	7.636	2.458	.046
Heptanol * CMC * Chitosan	248.945	31.118	10.017	.000
Error	754.910	3.107		
Total	51576.293			
Corrected Total	1372.632			

ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	31.014	.534		58.027
Heptanol	-.010	.150	-.004	-.067
CMC	.482	.150	.185	3.211
Chitosan	-.758	.150	-.291	-5.048

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบภายหลังการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	706.624	27.178	13.065	.000
Heptanol	27.814	13.907	6.686	.001
CMC	71.169	35.584	17.107	.000
Chitosan	102.350	51.175	24.602	.000
Heptanol * CMC	105.083	26.271	12.629	.000
Heptanol * Chitosan	54.074	13.519	6.499	.000
CMC * Chitosan	255.416	63.854	30.697	.000
Heptanol * CMC * Chitosan	94.231	11.779	5.662	.000
Error	501.318	2.080		
Total	249221.594			
Corrected Total	1207.943			

ตารางที่ 32 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Linear regression ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก ของแผ่นทดสอบภายหลังจากการลอยฟองอากาศ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
	B	Std. Error	Beta	
1 (Constant)	6.575	.108		61.023
Heptanol	.006	.030	.012	.209
CMC	.131	.030	.257	4.340
Chitosan	.035	.030	.069	1.171

ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Univariate ของชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีก ของแผ่นทดสอบภายหลังจากการลอยฟองอากาศ

Source	Type III Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	13.367	.514	3.690	.000
Heptanol	.514	.257	1.844	.160
CMC	3.250	1.625	11.664	.000
Chitosan	.228	.114	.818	.443
Heptanol * CMC	3.276	.819	5.879	.000
Heptanol * Chitosan	.688	.172	1.235	.297
CMC * Chitosan	2.163	.541	3.882	.004
Heptanol * CMC * Chitosan	3.248	.406	2.914	.004
Error	33.852	.139		
Total	12980.007			
Corrected Total	47.218			

ภาคผนวก ง

ภาพอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 1 เครื่องวัดสภาพระบายได้ (Freeness tester)



ภาพที่ 2 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Pulper)



ภาพที่ 3 เครื่องลอยฟองอากาศ (Flotation cell)



ภาพที่ 4 เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester)



ภาพที่ 5 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester)



ภาพที่ 6 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Tear tester)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวเธียรณี ภัคพงษ์พันธุ์ชัย

เกิดเมื่อวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2530 ที่กรุงเทพมหานคร

ประวัติทางการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนเซนต์ฟรังซิสเซเวียร์
- ปี พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ปี พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิชาการ

Packpongphanchai, D., Ponstababodee, N., and Chairrekij, S. (2011). Use of Heptanol, Carboxymethyl Cellulose and Chitosan on Flotation Deinking of Flexographic Water-Based Ink. The 1st National/International Silpakorn Graduate Study Conference 2011. 10-11 May 2011. Bangkok, Thailand. pp. 1594-1598.