

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 องค์ประกอบของกระดาษ (Paper composition)

กระดาษเป็นแผ่นวัสดุซึ่งได้จากการนำวัสดุหลาย ๆ ชนิดมาผสมให้เข้ากันแล้วนำไปทำเป็นแผ่น วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเหล่านี้ ได้แก่ เส้นใยสั้น (hard wood) เส้นใยยาว (soft wood) แป้ง ชันสน (rosin) ดินขาว (clay) และ สีย (dyes) เป็นต้น เราสามารถแยกวัสดุที่ใช้เหล่านี้ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ได้แก่ ส่วนที่เป็นเส้นใย (fibrous materials) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (non-fibrous materials) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่ใช้เติมผสมลงไปในส่วนเส้นใยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน [1]

2.1.1.1 ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous materials)

ในกระดาษโดยทั่วไปจะมีเส้นใยผสมอยู่ประมาณร้อยละ 70-75 ของน้ำหนักกระดาษ ปริมาณส่วนที่เป็นเส้นใยจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดกระดาษที่ต้องการผลิต ส่วนที่เป็นเส้นใยนี้จะได้จากพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ไม้เนื้ออ่อน (soft wood) ไม้เนื้อแข็ง (hard wood) และพืชจำพวกที่ไม่ใช่ไม้ (non-wood) เป็นต้น เส้นใยหรือเรียกกันทั่วไปว่าเยื่อ (pulp) ที่ใช้สำหรับทำกระดาษส่วนมากจะเป็นเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ดังนั้นในส่วนที่เป็นเส้นใยจึงประกอบด้วยเซลล์พืชชนิดต่าง ๆ ผสมกันอยู่ เป็นโครงสร้างของเส้นใย (fiber structure) โดยเมื่อนำเส้นใยจากไม้มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีรูปร่างยาวเรียวหัวท้ายสอบ เมื่อตัดขวางจะเห็นลักษณะโครงสร้างดังนี้

- มิติเดิล ลามลลา (middle lamella) คือ บริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นใย เป็นส่วนที่มีลิกนิน อยู่มาก ซึ่งลิกนินนี้จะทำหน้าที่คล้ายกาวเชื่อมเส้นใยหลาย ๆ เส้นเข้าด้วยกัน
- ผนังเส้นใย (fiber wall) สามารถแบ่งออกเป็นชั้นได้ดังนี้

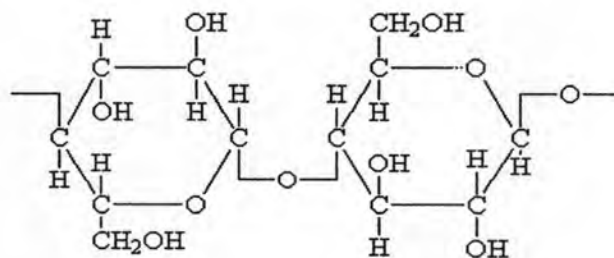
ก. ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (primary wall) เป็นผนังชั้นบาง ๆ ภายในชั้นนี้มีการเรียงตัวของเส้นใยขนาดเล็กย่อย (fibril) ด้วยรูปแบบที่ไม่แน่นอน

ข. ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary wall) เป็นชั้นที่หนาที่สุดของผนังเส้นใย ประกอบด้วยการเรียงตัวของเส้นใยซึ่งมีขนาดย่อยอีก 3 ชั้น คือ S_1 , S_2 และ S_3 โดยชั้นที่หนาที่สุดของผนังเซลล์ทุติยภูมิ คือ ชั้น S_2 ซึ่งนอกจากทั้งสามชั้นจะแตกต่างกันในเรื่องความหนาแล้วยังต่างกันในด้านารเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย (microfibrill alignment) อีกด้วย โดยชั้น S_1 และ S_3 มีการเรียงตัวของเส้นใยจะเป็นรูป S หรือ Z ส่วนชั้น S_2 มีการเรียงตัวในทิศทางเดียวแบบบันไดเวียนหรือก้นหอย (helic) ทำมุม 10-20 องศา กับแกนยาวของเส้นใย

- ลูเมน (lumen) คือบริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใย

โดยองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย (fiber Chemistry) จะประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ประมาณร้อยละ 45, เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประมาณร้อยละ 25-35, ลิกนิน (lignin) ประมาณร้อยละ 21-25 และสารสกัด (extractive) ประมาณร้อยละ 2-8 ดังนี้

ก. เซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ของน้ำตาลกลูโคส (glucose) หลายโมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะ β -(1,4) glycosidic linkage ต่อเป็นโซ่ยาว ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส

การเกาะกันของโมเลกุลน้ำตาลจะเหนียวแน่นและทนต่อสารเคมี ทำให้สลายตัวได้ยาก เซลลูโลสจึงจัดเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นองค์ประกอบหลักและมีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตเยื่อกระดาษ เนื่องจากเป็นตัวสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย (fiber-to-fiber bond) เซลลูโลสประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ บริเวณที่โครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline regions) และ บริเวณที่โครงสร้างเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (amorphous regions)

- บริเวณที่โครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบ

โมเลกุลของเซลลูโลสบริเวณนี้จะมีการจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) อย่างเป็นระเบียบ ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรง สามารถต้านทานต่อสารเคมีที่เป็นตัวทำละลาย (solvents) ได้ดี สารเคมีจึงซึมเข้ามาบริเวณนี้ได้ยาก

- บริเวณที่โครงสร้างเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

บริเวณนี้สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายจะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้างเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เซลลูโลสจึงไม่แข็งแรง สารเคมีที่เป็นตัวทำละลายจึงสามารถซึมผ่านได้ง่าย ทำให้เซลลูโลสบริเวณนี้ถูกทำลาย ซึ่งต่างจากบริเวณที่โครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบโดยสิ้นเชิง

ข. เฮมิเซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ของน้ำตาลหลาย ๆ หน่วยมาเชื่อมต่อกัน มีทั้งน้ำตาลเฮกโซส (hexoses) ที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลแมนโนส (mannose) และน้ำตาลกาแลคโทส (galactose) และยังมี น้ำตาลเพนโตส (pentose) ซึ่งมีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ น้ำตาลไซโลส (xylose) กับ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) ซึ่งต่างจากเซลลูโลสตรงที่มีน้ำตาลกลูโคสเพียงชนิดเดียวที่มาเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสจะอมน้ำและพองตัวได้ดี ถูกทำปฏิกิริยาได้ง่ายเมื่อโดนสารเคมีจึงละลายได้ง่าย และถูกไฮโดรไลส์ (hydrolyse) ได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้างมีเฉพาะบริเวณที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับแสงได้

ค. ลิกนิน เป็นสารประเภทโพลีเมอร์เช่นเดียวกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินประกอบด้วยสารประกอบแอมโรมาติกจำพวกฟีนิลโพรเพน (phenyl propane) ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน พบมากที่บริเวณมิดเดิล ลามัลลา และกระจายอยู่ภายในตัวเส้นใย โดยลิกนินมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในการผลิตกระดาษจึงต้องคำนึงถึงปริมาณลิกนินที่มีอยู่ในเยื่อ เนื่องจากลิกนินเป็นสารที่ทำให้กระดาษมีสีน้ำตาลลิกนินจึงถูกแยกออกจากผนังเส้นใย และถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการผลิตเยื่อแบบเคมี ในขณะที่ขั้นตอนการผลิตเยื่อแบบเชิงกล ลิกนินจะไม่ถูกกำจัดออกไปแต่จะถูกทำให้อ่อนตัวลงเพื่อให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้มากขึ้น การจัดเรียงตัวของเส้นใยดีขึ้นและหนาแน่นขึ้น และในขั้นตอนการผลิตเยื่อแบบเชิงกลสามารถเอาลิกนินออกได้โดยการฟอกเยื่อ (pulp bleaching) แต่ขั้นตอนนี้ลิกนินยังคงเหลืออยู่จึงมีผลต่อความเหลืองของกระดาษ (yellowness) เนื่องจากลิกนินมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีสีซึ่งเรียกว่าโครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแสง รวมถึงความชื้นทำให้เปลี่ยนสีกลายเป็นสีเหลืองขึ้นมา

ง. สารสกัด เป็นสารประกอบที่มีอยู่ปริมาณน้อย ในเนื้อไม้ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม ได้แก่ พวกสารประกอบอะลิฟาติก (aliphatic compounds) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไขมัน (fats) และ ขี้ผึ้ง (waxes), พวกสารประกอบเทอร์ปีน (terpene compounds) กับสารประกอบเทอร์पीนอยด์ (terpenoid compound) และพวกสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) เป็นต้น

2.1.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (non fibrous materials)

ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยหรือที่เรียกว่าสารเติมแต่ง (additives) เป็นสารเคมีที่เติมไปเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งานสารเติมแต่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่สารเติมแต่งหลักและสารเติมแต่งเสริม ดังรายละเอียดต่อไปนี้ [2]

(1) สารเติมแต่งหลัก (functional additives)

ทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติเฉพาะอย่างของกระดาษ แบ่งเป็น 6 ชนิด ดังนี้

ก. สารด้านการซึมน้ำ (sizing agents) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ใส่เพื่อสมบัติด้านการด้านการซึมน้ำของกระดาษ ทำให้กระดาษต้านทานการเปียกน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากกระดาษทำจากเซลลูโลสซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง กระดาษที่ไม่ได้ใส่สารด้านการซึมน้ำจะเปียกน้ำและดูดซับน้ำได้ง่าย เช่นกระดาษชำระและกระดาษซับ เป็นต้น การเติมสารชนิดนี้เข้าไปจะช่วยลดพื้นที่ผิวของการดึงดูดระหว่างเส้นใยและโมเลกุลน้ำ ทำให้ลดอัตราการซึมน้ำเข้าสู่เนื้อกระดาษ เมื่อกระดาษโดนน้ำจะไม่เปียกหรือไม่ซับน้ำได้ทันที ส่วนสารด้านการซึมน้ำที่ใช้ในกระบวนการทำกระดาษได้แก่

- สารส้มและชันสน (alum / rosin size)
- ขี้ผึ้ง (wax)
- ยางมะตอย (asphalt)
- AKD (alkyl ketene dimer)
- ASA (alkenyl succinic anhydride)

ข. ตัวเติม (fillers) สารเติมแต่งชนิดนี้จะเป็นผงแร่สีขาวใส่ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านทัศนศาสตร์และปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ของกระดาษ นอกจากนี้ยังใส่ลงไปเพื่อลด

ต้นทุนในการผลิตกระดาษอีกด้วย สารตัวเติมส่วนมากจะมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใย ผงแร่ที่จะใช้เป็นตัวเติมลงในกระดาษ จะต้องมีขนาดเล็กละเอียด ตัวเติมที่ดีควรมีขนาด 1 – 10 ไมครอน ผงแร่ที่มีขนาดเล็กนี้เมื่อเติมลงไปจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวภายในกระดาษ โดยเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างผงแร่กับอากาศและผงแร่กับเส้นใย ทำให้เพิ่มค่าการกระเจิงแสง (light scattering) ของกระดาษ ทำให้กระดาษมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นและเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยมาก เมื่อใส่ลงไปจะทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น ผงแร่ที่ใช้เป็นตัวเติมในกระดาษ ได้แก่ ดินขาว (kaolin, clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ (titaniumdioxide) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นต้น ผงแร่ที่เติมลงไปจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษให้ดีขึ้น ดังนี้

- ทำให้ผิวกระดาษเรียบขึ้น
- เพิ่มความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ
- ทำให้กระดาษมีการดูดซับหมึกได้ดีขึ้น
- ลดต้นทุนการผลิตกระดาษ

อย่างไรก็ตามการเติมผงแร่ลงไปก็มีส่วนลดสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษลงด้วย ผงแร่แต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปร่าง (particle shape) ขนาด (particale size) และดัชนีการหักเหของแสงต่างกัน

ค. สารเพิ่มความเหนียว (dry strength agents) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษ โดยเฉพาะความแข็งแรงตึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ นอกจากนี้ยังช่วยลดการหลุดออกของเส้นใยที่ผิวกระดาษและเพิ่มพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นกระดาษแข็งซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมาก เพราะถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นต่ำจะทำให้เกิดการแยกชั้นของกระดาษแข็งในระหว่างการพิมพ์ได้ สารเพิ่มความเหนียวที่ใช้ได้แก่ แป้ง (starch) แป้งประจุบวก (cationic) กัม (gum) และโพลีอะคริลาไมด์ (polyacrylamides)

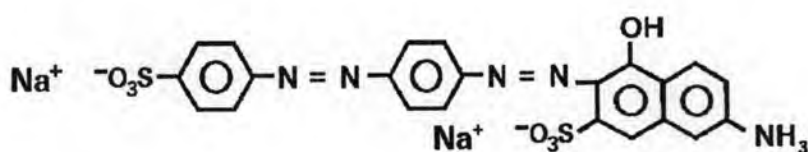
แป้งเป็นสารเพิ่มความขาวเหนียวที่รู้จักกันดีและมีการใช้มานานแล้วแต่ในปัจจุบันนิยมใช้แป้งประจุบวก และ polyacrylamide มากกว่าเนื่องจากสารเหล่านี้มีประจุบวก จึงสามารถจับกันได้ดีกับเส้นใยที่มีประจุลบ ทำให้เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยในกระดาษส่งผลให้กระดาษ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ง. สารเพิ่มความเหนียวเมื่อเปียก (wet strength agents) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีเติมลงไปเพื่อรักษาความเหนียวของกระดาษเมื่อให้คงไว้ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ของความเหนียวเดิม ปกติจะไม่ใส่สารชนิดนี้ในกระดาษพิมพ์ทั่วไป แต่อาจพบในกระดาษพิมพ์สำหรับงานพิมพ์พิเศษที่ต้องการความเหนียวเมื่อเปียกสูง เช่นกระดาษพิมพ์แผนที่ กระดาษพิมพ์ธนบัตร เป็นต้น สารเคมีที่ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวเมื่อเปียก ได้แก่ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (urea-formaldehyde), เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine-Formaldehyde), โพลีเอไมด์ (polyamide) และ โพลีเอมีน (polyamine)

จ. สีย้อม (dyes) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในการทำกระดาษโดยมีวัตถุประสงค์คือ ต้องการทำการกระดาษสี (colored paper) ในกรณีนี้สารสีย้อมจะถูกเติมลงไปในส่วนผสมของน้ำเยื่อจนได้สีตามที่ต้องการ หรือต้องการแต่งสีกระดาษขาวให้ได้เฉดสีที่ต้องการเพื่อให้ดูขาวขึ้น เรียกว่า สีแต่ง (tinting dyes) โดยใช้สีแต่งในปริมาณน้อย ๆ เติมลงในส่วนผสมเยื่อ สีที่ใช้แต่งนี้อาจเป็นสีอะไรก็ได้แต่ในกระดาษขาวจะใช้สีม่วงหรือสีน้ำเงิน สารสีย้อมที่ใช้แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ สีไดเรกต์ (direct dyes), สีแอซิด (acid dyes) และสีเบสิก (basic dyes) โดยแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนี้ [3]

- สีไดเรกต์

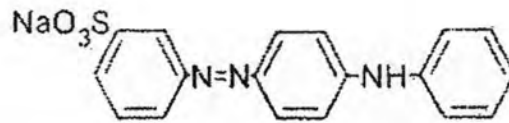
เป็นสีย้อมที่ยึดเกาะเส้นใยได้ดีมาก มีความทนต่อแสง แต่ละลายน้ำได้น้อย สามารถใช้ได้ในความเป็นกรด-เบสที่หลากหลาย โครงสร้างทางเคมีของสีไดเรกต์แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของสีไดเรกต์

- สีแอซิด

เป็นสีย้อมที่ยึดติดกับเส้นใยได้ดีโดยสามารถใช้ร่วมกับอะลูมิเนียม (alum) จึงต้องทำภายใต้ภาวะที่เป็นกรด โดยสีชนิดนี้มีความทนต่อแสงได้ดี การละลายน้ำดี แต่ไวต่อความร้อน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสีแอซิด แสดงดังภาพที่ 3



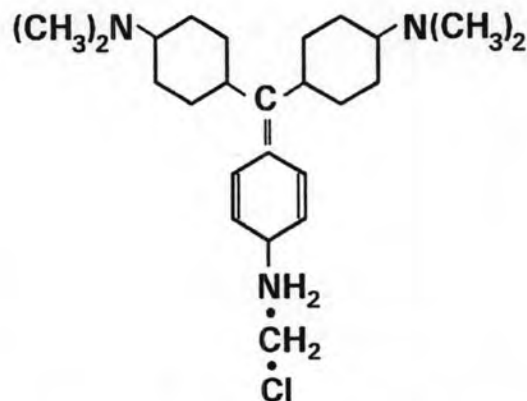
C.I. ACID YELLOW 36

C.I. 13065

ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของสีแอซิด

- สีเบสิด

เป็นสีย้อมที่สามารถยึดติดกับลิกนินได้ดี ดังนั้นจึงเหมาะกับเยื่อเชิงกล หรือ เยื่อเคมีที่ยังไม่ได้ฟอก สีชนิดนี้มีความทนต่อแสงต่ำ และ ละลายได้ดีในกรด โดยโครงสร้างทางเคมีของสีเบสิด แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของสีเบสิด

จ. สีย้อมเรืองแสง (fluorescent dyes)

เป็นสารเติมแต่งประเภทสีย้อมเรืองแสงหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารเพิ่มความขาวสว่าง (Optical Brightening Agent; OBA หรือ Fluorescent Whitening Agent; FWA) ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มการสะท้อนแสงให้กับวัสดุ เช่น กระดาษ สิ่งทอ ฯลฯ โดยสีชนิดนี้จะดูดกลืนพลังงานในช่วงรังสียูวี (ช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร) ที่ตามองไม่เห็น แล้วปล่อยแสงสีน้ำเงินออกมาที่ความยาวคลื่นช่วง 400-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ดังนั้นจึงเพิ่มความขาวสว่าง (brightness) และความขาว (whiteness) ให้กับกระดาษได้

ซึ่งในการวัดความขาวนั้นจะวัดการสะท้อนแสงทุกช่วงความยาวคลื่น ส่วนการวัดความขาวสว่าง จะวัดการสะท้อนแสงเฉพาะที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร เท่านั้น

สารเพิ่มความขาวสว่างมีหลักการทำงานเหมือนกับสารให้สีย้อมทั่วไป มีลักษณะเป็นผงแป้งหรือเป็นของเหลว ซึ่งลักษณะที่เป็นของเหลวจะมีความบริสุทธิ์มากกว่า

ในการใช้สารเพิ่มความขาวสว่างกับกระดาษ จะใส่ลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อ (wet end) เคลือบที่ผิวกระดาษในกระบวนการผลิต (size press) หรือ ใช้ในการเคลือบบนผิวของกระดาษ (coating) หากต้องการความขาวสว่างเป็นพิเศษจะใช้ทั้งในขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อและขั้นตอนของการเคลือบผิว

ปกติมักใช้สารเพิ่มความขาวสว่างกับเส้นใยที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.0 ขึ้นไป จึงจะเป็นภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากไม่มีประจุบวก (cation) มารบกวนกระจายตัวของเส้นใย

ประสิทธิภาพของสารเพิ่มความขาวสว่างอาจลดลงได้หากในกระดาษมีสารอื่นที่สามารถดูดกลืนรังสียูวี สารดังกล่าวได้แก่ ลิกนิน ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide) และดินขาว ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) จะสะท้อนรังสียูวีทำให้ประสิทธิภาพของสารเพิ่มความขาวสว่างสูงขึ้น สารเพิ่มความขาวสว่างที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของสทิลบีน (stilbene) มีโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 5 [4]

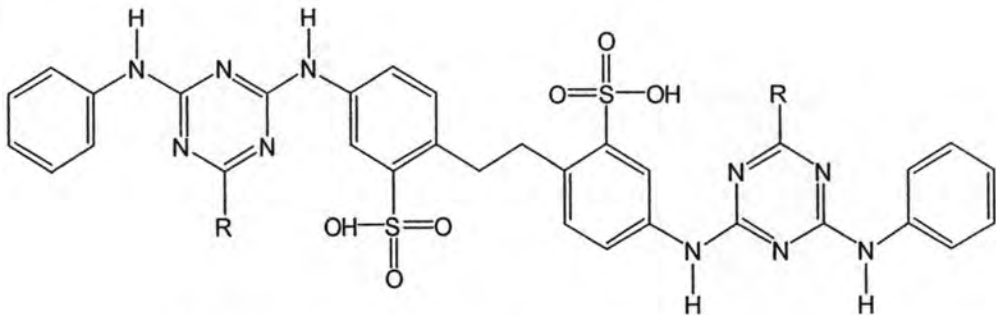


ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความขาวสว่าง

สารเพิ่มความขาวสว่างเป็นอนุพันธ์ของไดอะมิโน สทิลบีน ไซยานูริก คลอไรด์ (Diamino Stilbene Cyanuric Chloride) ซึ่งมีประจุเป็นลบ มีจำนวนหมู่ซัลโฟ (sulpho group) ในโมเลกุลที่ต่างกัน สารเพิ่มความขาวสว่างที่เป็นอนุพันธ์ของไดอะมิโน สทิลบีน ไซยานูริก คลอไรด์ จึงมีชนิดต่างกัน ดังนี้

- ไดซัลโฟ (Disulphonated diamino stilbene disulphonic acid) เป็นสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดที่มีซัลโฟ 2 หมู่ นิยมใช้กับกระดาษถ่ายเอกสาร หรือ

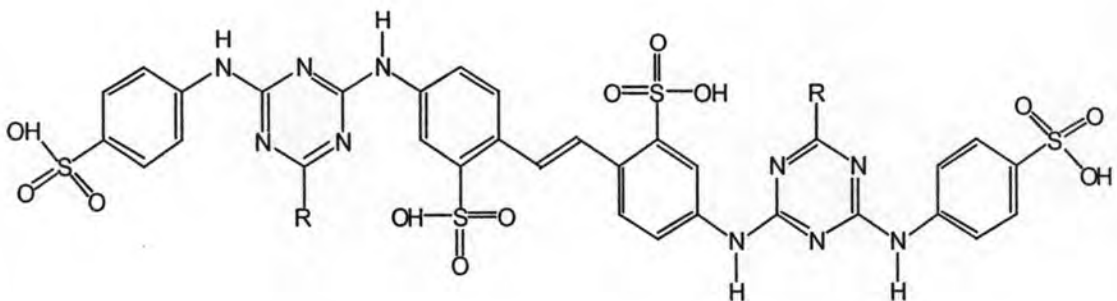
กระดาษพิมพ์เขียน ที่ต้องการความขาวสว่างปานกลางถึงสูง โดยสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดนี้ เหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการเตรียมน้ำเยื่อ (wet end) ซึ่งน้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำอ่อน (soft water) ที่มี pH เป็นกลางถึงเบสอ่อน ๆ จะเป็นผลดีต่อเส้นใย โครงสร้างสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดนี้ แสดงไว้ในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดไดซัลไฟ

- เตตระซัลไฟ (Tetrasulphonated diamino stilbene

disulphonic acid) เป็นสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดที่มีซัลไฟ 4 หมู่ ใช้กันอย่างกว้างขวาง คุณสมบัติโดยทั่วไปดีและส่วนใหญ่เหมาะกับ pH ที่มากกว่า 5.3 สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถปรับปรุงความขาวให้ดียิ่งขึ้นโดยการใช้สารเพิ่มความขาวสว่างทั้งในน้ำเยื่อและใช้เคลือบที่ผิวกระดาษในกระบวนการผลิต (size press) ซึ่งโครงสร้างสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดนี้ แสดงดังภาพที่ 7

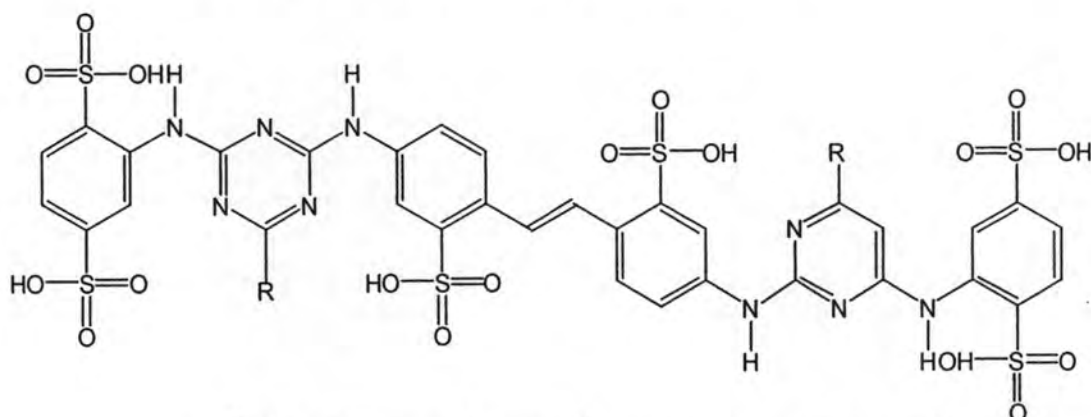


ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดเตตระซัลไฟ

- เฮกซะซัลไฟ (Hexsulphonated diamino stilbene

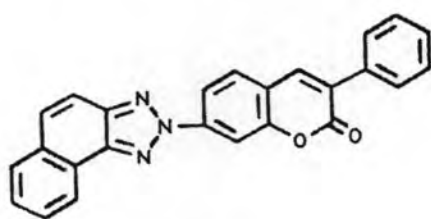
disulphonic acid) เป็นสารเพิ่มความขาวสว่างที่มีหมู่ซัลไฟ 6 หมู่ เหมาะสำหรับกระดาษที่ต้องการความขาวสว่างปานกลางถึงสูงมาก ในการใช้ส่วนใหญ่ไม่เหมาะสำหรับกระบวนการ

เตรียมน้ำเยื่อแต่จะเหมาะสำหรับใช้เคลือบที่ผิวกระดาษในกระบวนการผลิตและการเคลือบบนผิวของกระดาษ ใช้ได้ดีที่ pH 4.2 สารเพิ่มความขาวสว่างชนิดนี้มีโครงสร้างดังภาพที่ 8

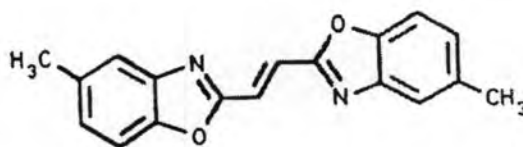


ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความขาวสว่างชนิดเฮกซะซัลโฟ

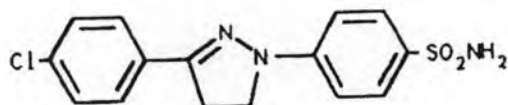
ส่วนสารเพิ่มความขาวสว่างที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมือองค์ประกอบพื้นฐานที่หลากหลายดังภาพที่ 9 อาทิ อนุพันธ์ของคูมาริน (coumarin), อนุพันธ์ของ 1,2-เอทิลีน (1,2-ethylene), อนุพันธ์ของไดแอริลไพราโซลีน (diarylpyrazoline) และอนุพันธ์ของแนพทาลิไมด์ (naphthalimide) เป็นต้น



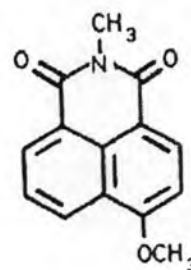
คูมาริน (coumarin)



1,2-เอทิลีน (1,2-ethylene)



ไดแอริลไพราโซลีน (diarylpyrazoline)

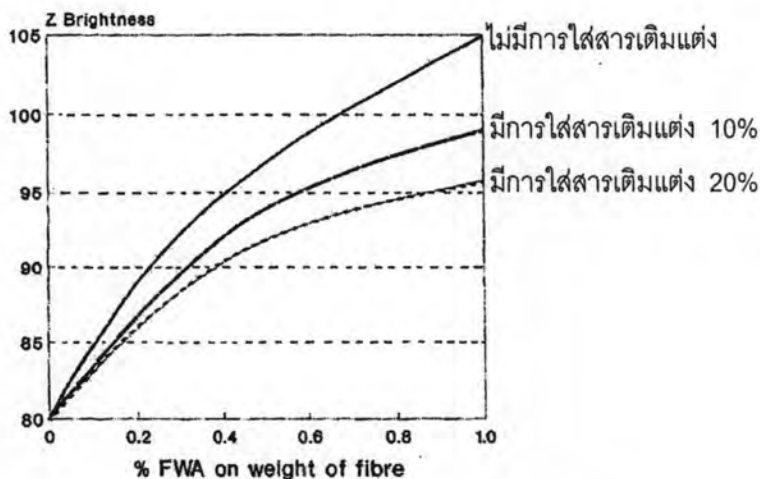


แนพทาลิไมด์ (naphthalimide)

ภาพที่ 9 อนุพันธ์ของสารเพิ่มความขาวสว่างที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

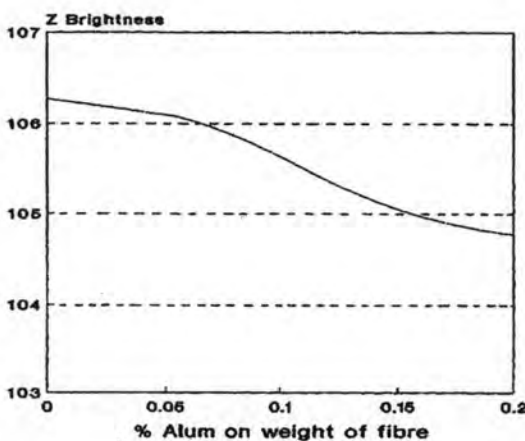
สารเพิ่มความขาวสว่างจะมีค่าความขาวสว่างเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการใส่สารเติมแต่งอื่นลงในแผ่นกระดาษ โดยชนิดของสารเติมแต่งแต่ละชนิดก็มีผลต่อค่าความขาวสว่างที่ได้

เช่น โททานเนียมไดออกไซด์ จะดูดกลืนรังสียูวี จึงลดประสิทธิภาพของสารเพิ่มความขาวสว่าง ทำให้ค่าความขาวสว่างที่ได้ลดลง ส่วนดินขาวจะทำให้การเป็นสารฟลูออเรสเซนต์ของสารเพิ่มความขาวสว่างเกิดได้ไม่ดี กระดาษจะกลายเป็นสีเหลืองเร็วขึ้น ดังนั้นการใส่สารเติมแต่งจึงมีผลต่อความขาวสว่างของกระดาษ ซึ่งปริมาณสารเติมแต่งที่มากขึ้นจะทำให้ความขาวสว่างของกระดาษลดลงมากขึ้นดังภาพที่ 10 ยกเว้นแคลเซียมคาร์บอเนต [5]



ภาพที่ 10 ผลของสารเติมแต่งต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ใส่สารเพิ่มความขาวสว่าง

นอกจากนี้อะลูมิเนียม ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้กระบวนการผลิตกระดาษมีค่าความเป็นกรด ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่เหมาะสมกับกระดาษ ดังนั้นกระดาษที่ผลิตได้ในสภาวะนี้จึงไม่คงทน เมื่อเก็บไว้นาน จะเกิดการเหลืองง่าย แม้จะมีการใส่สารเพิ่มความขาวสว่างลงในกระดาษก็ตาม แสดงดังภาพที่ 11 [5]



ภาพที่ 11 ผลของอะลูมิเนียม (alum) ที่มีต่อกระดาษที่มีการใส่สารเพิ่มความขาวสว่าง

(2) สารเติมแต่งเสริม (Chemical processing aids)

สารเติมแต่งเสริม ทำหน้าที่ช่วยเสริมให้สารเติมแต่งหลักทำหน้าที่ได้ดีขึ้น และยังช่วยในการบำรุงรักษาความสะอาดของเครื่องจักรที่ผลิตกระดาษ เพื่อให้สามารถเดินกระดาษได้ดี สารเติมแต่งประเภทนี้แบ่งได้เป็น 6 ชนิด ตามลักษณะหน้าที่ ดังนี้

ก. สารเพิ่มการตกค้าง (retention aids) สารชนิดนี้ช่วยให้มีการตกค้างของเส้นใยละเอียดและตัวเติมค้างในเยื่อกระดาษมากขึ้น

ข. สารต้านการเกิดฟอง (defoamers) สารชนิดนี้ช่วยป้องกันการเกิดฟองและช่วยให้เนื้อกระดาษมีความสม่ำเสมอดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้น้ำแยกตัวออกจากเยื่อได้เร็ว

ค. สารควบคุมจุลชีวะ (microbiological control agent) สารชนิดนี้จะช่วยควบคุมการเกิดเมือก (slime) และการแพร่ขยายของจุลชีวะ

ง. สารควบคุมการเกิดตาปลา (pitch control agent) เป็นจุดต่างคล้ายรอยเปื้อนของน้ำมัน

จ. สารช่วยแยกน้ำ (drainage aids) สารชนิดนี้จะช่วยเพิ่มอัตราการแยกน้ำออกจากกระดาษให้เร็วขึ้น

ฉ. สารช่วยกระจายตัว (formation aids) สารชนิดนี้จะช่วยให้เส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอลดการจับกลุ่มก้อนของเส้นใย

2.1.2 การผลิตเยื่อกระดาษ (pulping)

การผลิตเยื่อกระดาษ หมายถึง การผลิตเส้นใยเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ ดังนั้นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจึงเป็นกระบวนการที่แยกเส้นใยออกมาเดี่ยว ๆ โดยอาจจะมีการเอาลิกนินออกหรือไม่มีการเอาลิกนินออก แบ่งออกได้เป็น 3 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ [1]

2.1.2.1 การผลิตเยื่อไม้บด/เยื่อเชิงกล (mechanical pulping) หมายถึง กระบวนการผลิตเยื่อจากเยื่อชนิดเส้นใยยาว โดยใช้พลังงานกลช่วยทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันอย่างอิสระ หรือทำให้ลิกนินอ่อนตัวลงโดยความร้อนหรือความดัน จึงแยกเส้นใยออกจากกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งการผลิตเยื่อด้วยวิธีนี้จะไม่มีการใช้สารเคมี จึงไม่มีการทำลายเส้นใย ผลผลิตของเยื่อที่ได้จึงสูงประมาณร้อยละ 90-95

เนื่องจากการผลิตเยื่อโดยวิธีเชิงกลจะไม่มีการกำจัดลิกนินออก จึงมีลิกนินผสมอยู่ด้วยเกือบทั้งหมด เส้นใยที่ได้จึงค่อนข้างหยาบกระด้างและฉีกขาดเป็นท่อน ๆ ไม่แยกเป็นเส้นใยสมบูรณ์ มีชิ้นไม้เล็ก ๆ หรือ มีกลุ่มของเส้นใย (bundles of fibers) ปนอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อ

นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ จะทำให้กระดาษนั้นมีความทึบแสงสูงแต่แรงยืดเหนียวระหว่างเส้นใยต่ำ ไม่เหมาะกับการไปใช้ในการผลิตกระดาษประเภทรับน้ำหนักมาก แต่จะเหมาะสมเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษพวกหนังสือพิมพ์และกระดาษห่อของขวัญ เป็นต้น กระดาษที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีนี้ยังคงมีลิกนินหลงเหลืออยู่ เมื่อได้รับความร้อน ความชื้นและแสง กระดาษจึงเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ง่าย (Yellowness)

2.1.2.2 การผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping) หมายถึง กระบวนการผลิตเยื่อโดยใช้พลังงานความร้อนและสารเคมีในการเอาลิกนินออก ทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายและสมบูรณ์ เยื่อที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบเคมีจะมีความขาว ความขาวสว่าง ความแข็งแรง และมีโอกาสที่จะเกิดการเหลืองได้ เนื่องจากลิกนินยังคงเหลืออยู่เพราะกำจัดออกไม่หมด แต่เมื่อเทียบกับเยื่อเชิงกลก็ถือว่าเยื่อเคมีมีโอกาสเหลืองน้อยกว่า ส่วนผลผลิตของเยื่อเคมีจะมีประมาณร้อยละ 40-50 ซึ่งน้อยกว่าเยื่อเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากการผลิตเยื่อด้วยวิธีเคมีจะต้องมีขั้นตอนที่ใช้สารเคมีเพื่อทำลายลิกนินที่อยู่ติดกับเส้นใย ในระหว่างนั้นสารเคมีจึงสามารถทำลายเส้นใยนี้ได้ ทำให้เกิดการสูญเสียเส้นใยผลผลิตจากเยื่อเคมีที่ได้จึงน้อยลง

สำหรับวิธีการผลิตเยื่อเคมีจะแบ่งย่อยตามสารเคมีที่ใช้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการซัลไฟต์ (sulfite pulping) และกระบวนการซัลเฟต (sulfate pulping)

(1) กระบวนการซัลไฟต์

กระบวนการซัลไฟต์ เป็นกระบวนการที่ใช้กรดในการทำปฏิกิริยา โดยสารเคมีที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สามารถแบ่งกระบวนการออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก. กระบวนการผลิตเยื่อโดยวิธีกรดซัลไฟต์ (acid sulfite pulping) โดยใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผลิตมาจากซัลฟิวรัส (H_2SO_3) และ MHSO_3 เมื่อ M คือแคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg) และโซเดียม (Na) ใช้เวลาดำ 4-20 ชั่วโมง อุณหภูมิเท่ากับ 120-135 องศาเซลเซียส

ข. กระบวนการผลิตเยื่อโดยวิธีไบซัลไฟต์ (bisulfite pulping) โดยใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผลิตมาจาก MHSO_3 เพียงชนิดเดียว เมื่อ M คือ Ca, Mg และ Na ใช้เวลาดำ 2-4 ชั่วโมง อุณหภูมิเท่ากับ 140-160 องศาเซลเซียส

(2) กระบวนการซัลเฟต

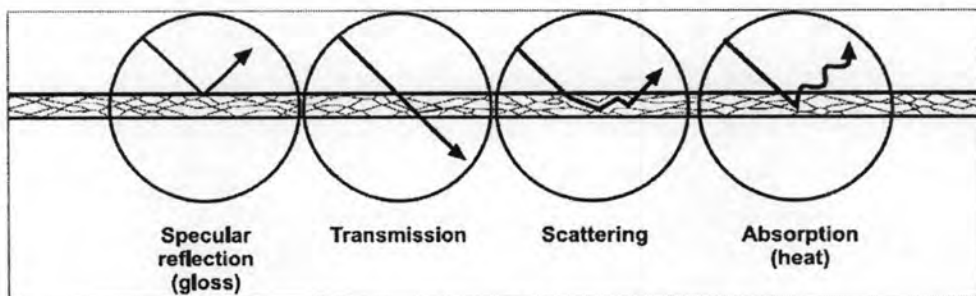
กระบวนการซัลเฟต หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการคราฟท์ (kraft pulping) เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีซึ่งมีความเป็นด่างเพื่อทำปฏิกิริยากับลิกนิน โดยกระบวนการนี้ดัดแปลงมาจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (soda process) ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

(sodium hydroxide) เพียงชนิดเดียวในการผลิต โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการซัลเฟต คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

2.1.2.3 การผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi-chemical pulping) หมายถึง กระบวนการผลิตเยื่อที่ต้องอาศัยพลังงานกลและมีการใช้สารเคมีเข้ามาช่วยให้เส้นใยแยกตัวเป็นอิสระง่ายขึ้น สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ชนิดที่เป็นกลาง (neutral sodium sulfite) โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) เยื่อที่ผลิตได้ยังคงมีปริมาณลิกนินอยู่บ้างแต่น้อยกว่าปริมาณลิกนินในเยื่อเชิงกล

2.1.3. สมบัติเชิงแสงของกระดาษ

เมื่อแสงตกกระทบบนกระดาษ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ การสะท้อนของแสง (reflect) การทะลุผ่านของแสง (transmit) การกระเจิงแสง (scatter) และการดูดกลืนแสง (absorb) [6] ดังภาพที่ 12

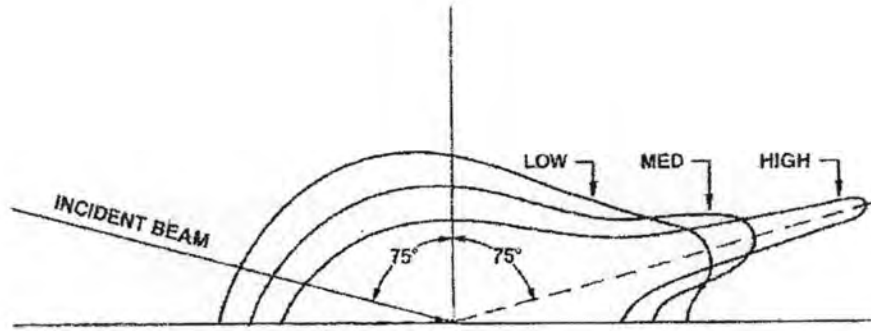


ภาพที่ 12 การสะท้อนของแสง การทะลุผ่านของแสง การกระเจิงของแสง และการดูดกลืนแสง

สมบัติเชิงแสงของกระดาษโดยทั่วไปที่นิยมวัด ได้แก่ ความมันวาว ความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง

2.1.3.1 ความมันวาว (gloss)

เป็นการวัดค่าการสะท้อนของแสงที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ (specular angle) สำหรับกระดาษทั่วไป มักวัดความมันวาวที่มุม 75 องศา ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การวัดความมันวาวที่มุม 75 องศา

2.1.3.2 ความขาว (whiteness)

ความขาวคือ ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษทุกช่วงคลื่น ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณการสะท้อนแสงสีขาวและความสม่ำเสมอของการสะท้อนแสงตลอดความยาวคลื่น โดยถ้า ค่าการสะท้อนแสงมากกระดาษจะมีความขาวมาก ส่วนความสม่ำเสมอของการสะท้อนแสงตลอดความยาวคลื่นต้องมีการสะท้อนแสงในแต่ละความยาวคลื่นที่ปริมาณเท่า ๆ กัน ไม่ดูดกสีเฉพาะสีใดสีหนึ่ง หากมีปริมาณการสะท้อนแสงสีขาวแต่ไม่มีความสม่ำเสมอของการสะท้อนแสงตลอดความยาวคลื่น กระดาษอาจมีเจดสีหนึ่งลดเจดสีหนึ่งสว่าง และหากมีปัจจัยความสม่ำเสมอของการสะท้อนแสงตลอดความยาวคลื่นแต่ไม่มีปริมาณการสะท้อนแสงสีขาวก็จะได้กระดาษเป็นสีเทา ซึ่งการปรับปรุงความขาวทำได้โดยการฟอกเยื่อ การเติมสีย้อม เพื่อให้ค่าการสะท้อนแสงสม่ำเสมอขึ้นตลอดทุกความยาวคลื่นหรือการเติมสารเพิ่มความขาวสว่าง โดยสารนี้จะดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงยูวีแล้วปล่อยออกมาในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น

2.1.3.3 ความขาวสว่าง (brightness)

ความขาวสว่างคือ ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษในช่วงคลื่น 457 นาโนเมตร สารที่ดูดกลืนรังสียูวีจะทำให้ประสิทธิภาพของสารเพิ่มความขาวสว่างลดลง เช่นไททาเนียมไดออกไซด์ ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตจะสะท้อนรังสียูวี จะทำให้ประสิทธิภาพของสารเพิ่มความขาวสว่างสูงขึ้น ความขาวสว่างเป็นสมบัติที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อในการกำจัดความเหลืองที่เกิดจากลิกนิน และความไม่บริสุทธิ์อื่น ๆ ที่เกิดจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความขาวสว่างของกระดาษได้แก่ สารสี สารเติมเต็ม ความขาวสว่างของเยื่อ ความบริสุทธิ์ของน้ำ เป็นต้น

2.1.3.4 ความทึบแสง (opacity)

ความทึบแสงขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้แสงทะลุผ่านของกระจก (light transmission) กระจกที่โปร่งใส (transparent) จะยอมให้แสงทะลุผ่าน โดยไม่เกิดการกระเจิงแสง (scattering) กระจกที่ทึบแสงโดยสมบูรณ์จะไม่ยอมให้แสงทะลุผ่านมาอีกด้านหนึ่ง

ปัจจัยที่มีผลต่อความทึบแสงของกระจก ได้แก่ น้ำหนักมาตรฐาน สีย้อม โดยสีย้อมจะเพิ่มความทึบแสง เนื่องจากไปเพิ่มการดูดกลืนแสงของกระจก ทำให้ปริมาณแสงที่ทะลุผ่านกระจกน้อยลง การตีเยื่อและการกรีดรีดน้ำ ซึ่งจะปลดความทึบแสง เนื่องจากทำให้กระจกมีเนื้อแน่นมากขึ้น ช่องว่างภายในลด การกระเจิงแสงจึงลด สารเติมเต็มก็มีผลทำให้ความทึบแสงเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากมีค่าดัชนีการสะท้อนแสงสูง เส้นใย เนื่องจากเส้นใยเล็กมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้การกระเจิงแสงมาก ความทึบแสงสูง

2.1.4 ผลกระทบของสภาพแวดล้อมที่มีต่อกระจก

ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของกระจก ได้แก่ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-เบส ความร้อน แสง และอื่นๆ [7]

2.1.4.1 ผลกระทบจากความชื้น

ความชื้นภายในกระจกส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของกระจก กระจกมีการดูดซับความชื้นจากบรรยากาศ และคายความชื้นสู่บรรยากาศจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในกระจก (moisture content) และ บรรยากาศที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกระจกจะมีความชื้นภายในน้อย ทำให้ทนต่อแรงดึงได้มาก แต่จะมีการยืดตัวได้น้อย (elongation มีค่าต่ำ) ส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะกลับกัน

2.1.4.2 ผลกระทบจากความร้อน

ความร้อนจะเป็นตัวที่เร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้ความแข็งแรงทางโครงสร้างของกระจกลดลง กระจกเกิดการเปลี่ยนสี ส่งผลต่อการยึดหดของกระจกเนื่องจากกระจกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (viscoelastic material)

2.1.4.3 ผลกระทบจากค่าความเป็นกรด-เบส

ค่าความเป็นกรด-เบสจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของกระจกในด้านความแข็งแรงของกระจก ค่ากรด-เบสที่เหมาะสมกับกระจกมีค่าประมาณ 5-7 การที่กระจกสัมผัสกับอากาศจะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสในกระจกลดลง ซึ่งปริมาณของซิลเฟอไรไดออกไซด์ในอากาศสามารถทำให้กระจกเสื่อมลงได้ เป็นเหตุให้กระจกเปลี่ยนสีและเปราะบริเวณที่เป็นขอบ

มาก เนื่องจากกระดาษจะดูดซับ (absorb) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศแล้วเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก ดังนั้นจึงทำให้กระดาษมีความเป็นกรด จึงนิยมใส่สารเติมเต็ม พวก แคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อปรับให้ค่าความเป็นกรด-เบสในกระดาษเป็นกลางมากขึ้น

2.1.4.4 ผลกระทบจากแสง

เนื่องจากลิกนินมีองค์ประกอบของโครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแสง และจะเปลี่ยนเป็นสารที่มีโครงสร้างเหมือนควินิน (quinine-like substance) ซึ่งจะดูดกลืนแสงมีผลทำให้กระดาษเกิดการเหลือง (yellowing)

2.1.4.5 ผลกระทบจากปัจจัยอื่น

ผลกระทบจากปัจจัยอื่น มีดังนี้

- โรซิน (rosin)

โรซินมีผลต่อความคงทนของกระดาษ โดยการใช้โรซินปริมาณมากสามารถทำให้เกิดการเหลืองของกระดาษได้และทำให้กระดาษสูญเสียความคงทน โดยกระดาษที่ทำด้วยไฮโดรจีเนต โรซิน (hydrogenate rosin) จะมีความเสถียรมากกว่าโรซินจากธรรมชาติ [8]

- แป้ง (starch) และกาวสัตว์

แป้งและกาวสัตว์มีผลทำให้การทนต่อการพับ (folding) และความทนต่อแรงดันทะลุ (bursting strength) ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

- สารเคลือบ (coating) และแล็กเกอร์ (lacker)

สารเคลือบและแล็กเกอร์จะช่วยยืดอายุการใช้งานได้นานขึ้น เนื่องจากสารเคลือบบนผิวหน้าของกระดาษจึงเป็นด่านแรกที่ป้องกันสิ่งต่าง ๆ ที่ทำให้กระดาษเกิดการเสื่อม

- สารเติมเต็ม (additives)

มีผลต่อการเสื่อมสภาพของกระดาษน้อย สารเติมเต็มพวกที่มีความเป็นเบสสูง จะช่วยยืดอายุการใช้งานของกระดาษ

- สีย้อม (dye)

สีย้อมจะเป็นตัวช่วยป้องกันเซลล์ลูโลสจากการถูกทำลายโดยแสง

2.1.5 การเร่งอายุ (Accelerated aging)

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้กระดาษที่ต้องเก็บไว้นานเกิดการเสื่อมสภาพ คือ สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ แสงแดด ความชื้น และความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อมของกระดาษที่เก็บไว้ในระยะยาวมาเกี่ยวข้อง แต่เนื่องจากการทดสอบจะต้องสังเกตผลที่เกิด

ขึ้นซึ่งต้องใช้เวลาหลายปีจึงจะทราบผลดังกล่าว ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาการทดสอบให้เร็วขึ้นจึงมีการเร่งอายุกระดาษด้วยวิธีการต่าง ๆ ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งถือว่าการเร่งอายุตัวอย่างให้เสมือนเก็บไว้นานตามธรรมชาติ เพื่อทดสอบความคงทนที่ยังเหลืออยู่ในด้านเชิงกลและเชิงแสงของกระดาษที่ผ่านการเร่งอายุ เช่น การทนต่อการพับ (folding endurance) การฉีกขาด (tearing strength) และ ความขาวสว่าง (brightness) เป็นต้น โดยทั่วไปจะศึกษาการเร่งอายุกระดาษด้วยการใช้ อุณหภูมิ แสง รังสียูวี ความชื้น ดังนี้

2.1.5.1 การใช้ความร้อนในการเร่งอายุกระดาษพิมพ์เขียน

การใช้ความร้อนในการเร่งอายุจะมี 2 สภาวะ ดังนี้

(1) แห้งด้วยความร้อน (dry heat) ตามมาตรฐาน ISO 5630-1 ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบที่มีการระบายอากาศ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของอากาศต้องไม่น้อยกว่า 10 ต่อชั่วโมง และควรรักษาอุณหภูมิไว้ที่ $105\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับตัวอย่างที่ทดสอบไม่ควรให้โดนแสง และควรได้รับความร้อนจากตู้อบ ไม่ควรให้ความร้อนกับตัวอย่างโดยตรงจากอุปกรณ์ให้ความร้อนอื่น ๆ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ต้องได้มาตรฐานสากล หรือมาตรฐานอื่นที่เป็นที่ยอมรับ และควรรักษาความชื้นสัมพัทธ์ไว้ที่ 10 – 35 % [9]

(2) แห้งด้วยความชื้น (moist heat) ตามมาตรฐาน ISO 5630-3 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 โดยรักษาอุณหภูมิไว้ที่ $80 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 2\text{ }%$ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบได้มาตรฐานสากลหรือมาตรฐานที่ยอมรับโดยทั่วกัน และควรรักษาความชื้นสัมพัทธ์ที่ 10 – 35 % [10]

2.1.5.2 การใช้แสงในการเร่งอายุกระดาษพิมพ์เขียน

จะใช้หลอดไฟซีนอน (xenon arc lamp) และกระจกกรองแสง (glass filtration) กันด้านหน้าของหลอดไฟเพื่อกระตุ้นแสงอาทิตย์ ให้ผ่านกระจกกรองแสงสี (window glass) จึงถือเป็นการตัดแสงส่วนใหญ่ที่ความยาวคลื่นช่วงสั้น ซึ่งต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ออกไป และใช้อุณหภูมิที่ $20 - 30$ องศาเซลเซียส ควบคุมความเข้ม (intensity) ของการอาบแสงของหลอดไฟซีนอนเป็น 765 ± 75 วัตต์ต่อตารางเมตร สามารถกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้วัดได้ตั้งแต่ 290-800 นาโนเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 6789-02 [11]

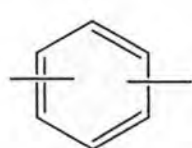
2.1.5.3 การใช้รังสียูวีในการเร่งอายุด้วยเครื่องเร่งสภาวะ (QUV accelerated aging)

โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ ยูวีเอ (UVA-340 fluorescent lamps) ที่อุณหภูมิ 60 ± 3 องศาเซลเซียส โดยหลักการคือหลอดฟลูออเรสเซนต์ ยูวีเอ นี้จะไปกระตุ้นรังสียูวีที่ความยาวคลื่นช่วงสั้นและช่วงกลางของแสงอาทิตย์

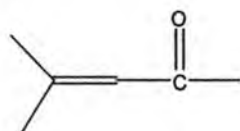
2.1.6 โครโมฟอร์ (Chromophore)

โครโมฟอร์ (Chromophore) คือ ส่วนของโมเลกุลที่เป็นพันธะไม่อิ่มตัวซึ่งสามารถดูดกลืนรังสียูวี การมีพันธะไม่อิ่มตัวสลับกับพันธะเดี่ยวที่เรียกว่าคอนจูเกตต่อกันหลายพันธะจะเพิ่มการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงจากช่วงรังสียูวีไปถึงช่วงที่ตามองเห็นได้ การดูดกลืนแสงของโครโมฟอร์สามารถทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะในโมเลกุลที่เรียกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis) ได้ ในกรณีของสารที่มีสีบางชนิดเมื่อมีการแตกพันธะออก โมเลกุลจะมีขนาดเล็กลงทำให้สีของสารนั้นเปลี่ยนไปจากมีสีเป็นไม่มีสี [7]

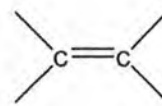
ในไม้หรือในเยื่อจะมีโมเลกุลที่มีโครโมฟอร์เป็นส่วนประกอบจำนวนมาก โครโมฟอร์ที่พบส่วนใหญ่คือหมู่แอมโรมาติก (aromatic) คอนจูเกตหมู่คาร์บอนิล (conjugated carbonyl groups) และพันธะคู่ (double bond structures) ดังภาพที่ 14 โครโมฟอร์เหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานาน เนื่องจากโครโมฟอร์เหล่านี้สามารถดูดกลืนรังสียูวีและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้โครงสร้างใหม่ที่ทำให้เกิดสีเหลือง สีธรรมชาติ (natural dye) และสีสังเคราะห์ (synthetic dyes) ที่ใช้ในการปรับเฉดสีและเป็นสารเติมแต่ง (additives) อื่น ๆ ในเยื่อและกระดาษก็มีโครโมฟอร์เหล่านี้อยู่ในโครงสร้างเช่นเดียวกัน จึงสามารถเกิดการซีดจางของสีได้เมื่อได้รับแสงเป็นเวลานาน [12]



หมู่แอมโรมาติก



คอนจูเกตหมู่คาร์บอนิล



พันธะคู่

ภาพที่ 14 โครโมฟอร์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในไม้และเยื่อ [12]

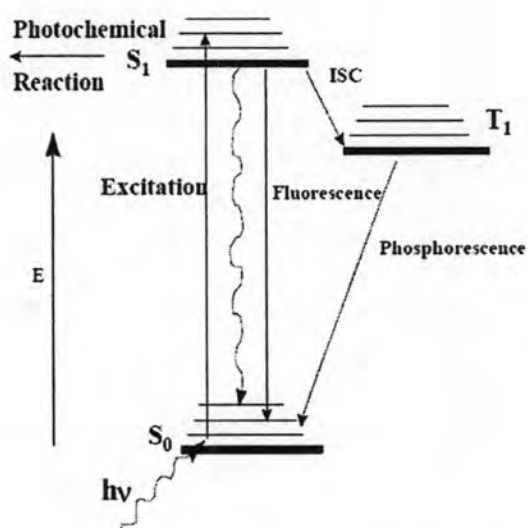
เมื่อโมเลกุลที่มีกลุ่มโครโมฟอร์ได้รับพลังงานแสงก็สามารถดูดกลืนพลังงานแสงและเกิดการกระตุ้นจากสถานะพื้น (ground state) ไปสู่สถานะกระตุ้น (excited state) ดังสมการที่ 1



สถานะกระตุ้นจะมี 2 แบบขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในชั้นพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ คือ สถานะกระตุ้นซิงเกิลต (singlet excited state; S) ซึ่งอิเล็กตรอนจะจัดเรียงตัวโดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในโมเลกุลาร์ออร์บิทัลที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ในระดับพลังงานสูงสุด และสถานะกระตุ้นทริเปิลต (triplet excited state; T) ซึ่งอิเล็กตรอนจะจัดเรียงตัวโดยมีทิศทางเดียวกันกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในโมเลกุลาร์ออร์บิทัลที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ในระดับพลังงานสูงสุด โดยสถานะทริเปิลตนั้นโมเลกุลจะมีความเสถียรมากกว่า

โมเลกุลบางชนิดเมื่อได้รับพลังงานแสงจะเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนสู่ชั้นซิงเกิลตจากนั้นสามารถกลับคืนสู่สถานะพื้นได้โดยการปล่อยพลังงานแสงออกมาที่เรียกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescent) หรือจากสถานะซิงเกิลตเกิดการเปลี่ยนแปลงสู่สถานะทริเปิลตแล้วค่อยปล่อยพลังงานแสงออกมาที่เรียกว่าการเกิดฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescent) ดังภาพที่

15



ภาพที่ 15 การกระตุ้นโครโมฟอร์โดยโฟตอนของแสง [13]

สารเพิ่มความขาวสว่างเมื่อได้รับแสงในช่วงรังสียูวีจะปล่อยพลังงานแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น คือ ในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินซึ่งเราเรียกว่าเป็นการเกิดฟลูออเรส

เซนต์ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกสารเพิ่มความขาวสว่างว่า สารเพิ่มความขาวฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Whitening Agent; FWA) แต่ถ้าโมเลกุลนั้นได้รับพลังงานแสงอีกขณะอยู่ในชั้นสถานะกระตุ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปและทำให้เกิดการซีดจางลง ดังนั้นระยะเวลาที่โครโมฟอร์อยู่ที่สถานะกระตุ้นยิ่งนานเท่าไร ก็มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยแสงทำให้ซีดจางมากด้วยเช่นกัน

2.1.7 การเหลือง (Photoyellowing)

จะพบมากในเยื่อเชิงกลเนื่องจากยังมีลิกนินเหลืออยู่ ส่วนเยื่อเคมีก็เกิดการเหลืองได้เช่นกันแต่จะน้อยกว่า อย่างไรก็ตามในช่วงต้มเยื่อและฟอกเยื่อนั้นจะเกิดโครงสร้างที่ไวต่อแสงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กระจายจึงเกิดการเหลืองได้ ดังนั้นในเยื่อเคมีฟอก (bleached chemical pulps) จะต้องพิจารณารวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลลูโลสหรือองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส การเกิดหมู่ปลายไซ (end group) การเปลี่ยนรูปและการเกิดของพันธะคู่ คีโตน แอลดีไฮด์ และหมู่คาร์บอกซิลิก การรวมตัวกับโลหะหนัก การต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อด้วยภาวะที่รุนแรง อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแยกสลายพอลิเมอร์ด้วยน้ำ (hydrolysis depolymerization) ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrangement) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เยื่อเคมีเกิดการเหลืองขึ้น [7]

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bond และคณะ [14] และ Hunt และคณะ [15] ศึกษาผลของแสงที่มีต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติเชิงเคมีของกระดาษโดยพัฒนาวิธีการเร่งอายุของกระดาษพิมพ์เขียน ด้วยการทดลองฉายแสงกระดาษตัวอย่างเป็นเวลาานถึง 4 ปี จากการทดลองพบว่าในกรณีของกระดาษที่มีลิกนิน (lignin-containing papers) แสงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนินเป็นสารประเภทแอมโรมาติกที่มีขนาดเล็กลง ส่วนในกรณีกระดาษที่ไม่มีลิกนิน (lignin-free papers) แสงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในโครงสร้างของกระดาษ ทั้งสองกรณีส่งผลให้กระดาษมีความเหลืองเพิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงลดลง

Malesic และคณะ [16] ศึกษาระยะเวลาที่กระดาษได้รับแสงโดยพบว่ายิ่งกระดาษได้รับแสงนานขึ้นปริมาณของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl groups) จะยิ่งมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสลายของเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals) และ หมู่คาร์บอนิล ดังนั้นแสงสามารถเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเซลลูโลส

Ragauskas, Allison และ Li [17] ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความขาวสว่างสำหรับเยื่อกึ่งเคมี เยื่อที่ใช้คือ Bleached chemithermo mechanical pulps (BCTMP) และใช้สารเพิ่มความขาวสว่างปริมาณร้อยละ 0.1 - 0.5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการทดลองพบว่าสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงความขาวสว่าง (brightness reversion) ของเยื่อกึ่งเคมีได้ถึงร้อยละ 25

Katuscak และคณะ [18] ศึกษาผลของการเสื่อมของกระดาษที่มีลิกนินโดยทำการเร่งอายุกระดาษตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO 5630-1 เป็นเวลา 0, 3, 6, 9 และ 12 วัน โดยมีสภาวะตามมาตรฐาน ISO 187 (อุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 2\%$) พบว่าการเร่งอายุกระดาษด้วยการอบจะให้ค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 280 nm ต่ำลงตามระยะเวลาในการอบที่นานขึ้น

Nabil, Safy และ Fahmy [19] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระดาษพิมพ์เขียนที่ทำจากเยื่อเคมีชนิดเส้นใยยาวและเยื่อจากขานอ้อย (bagasse dissolving pulp) โดยการเร่งอายุด้วยความร้อนที่เวลาต่างกัันดังนี้ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณของคาร์บอกซิล (carboxyl) ของเยื่อเคมีชนิดเส้นใยยาวเพิ่มขึ้นเมื่อเร่งอายุด้วยความร้อนจนกระทั่งถึง 96 ชั่วโมง ขณะที่ปริมาณคาร์บอกซิลของเยื่อจากขานอ้อยเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเร่งอายุ ถึง 72 ชั่วโมง ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวของเยื่อจะทำให้ลดระดับความขาวและทำให้โพลีเมอร์เกิดการเสื่อมสลายในช่วงการเร่งอายุด้วยความร้อน