

เส้นใย

กระดาษคือแผ่นเส้นใยซึ่งเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ และสามารถเกิดพันธะระหว่างเส้นใยได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน คำจำกัดความนี้สามารถอธิบายกระดาษและกระดาษแข็งได้ทุกชนิด กระดาษและกระดาษแข็งแต่ละชนิดอาจมีสมบัติต่างกัน แต่จะมีพื้นฐานที่เหมือนกันคือ

ก. เส้นใยสามารถเกิดพันธะระหว่างกันได้โดยไม่ต้องใช้สารยึดเกาะ (Adhesive) หรือ กาว (Glue)

ข. เส้นใยเรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ

จากคำจำกัดความพื้นฐานข้อ ก. เห็นได้ว่าเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) จัดเป็นเส้นใยที่มีสมบัติตามคำจำกัดความ เพราะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ และจากการที่เส้นใยสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้เส้นใยเซลลูโลสสามารถแขวนลอยและกระจายในน้ำได้ คำจำกัดความพื้นฐานข้อ ข. จึงเป็นไปได้ เพราะเส้นใยสามารถเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบได้

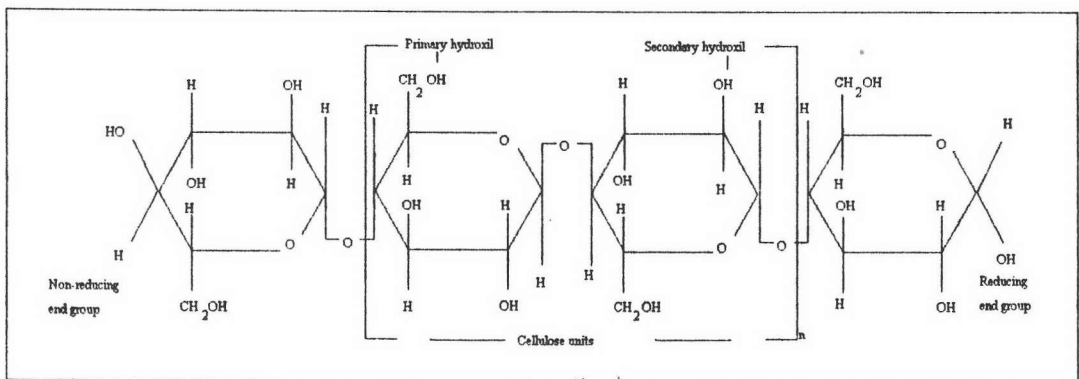
เส้นใยพืชทุกชนิดสามารถใช้ทำกระดาษได้ เส้นใยเหล่านี้สามารถแขวนลอยและกระจายได้ในน้ำ ขั้วโมเลกุลน้ำและกลุ่มไฮดรอกซิลในเซลลูโลสช่วยให้เส้นใยเซลลูโลสเกิดพันธะระหว่างกันได้ การเลือกใช้พืชชนิดใดในการผลิตกระดาษ ขึ้นอยู่กับสมบัติด้านความแข็งแรง ความเรียบของผิวและสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้เส้นใยจากไม้เป็นหลักในการผลิตกระดาษ แต่บางครั้งก็ใช้เส้นใยจากพืชอื่นที่ไม่ใช่ไม้ เช่น ปอกระเจา ฟางข้าว ชานอ้อย ไม้ไผ่ ในกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษบางประการ เช่น ใช้เยื่อปอสาในการทำกระดาษสาซึ่งต้องการลวดลายในเนื้อกระดาษ หรือใช้เยื่อชานอ้อยในกรณีที่ต้องการกระดาษที่มีความสามารถในการทรงรูปสูง เป็นต้น

ไม้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ไม้เนื้ออ่อนซึ่งให้เส้นใยยาวและไม้เนื้อแข็งซึ่งให้เส้นใยสั้น สมบัติของเส้นใยที่มีบทบาทต่อความแข็งแรงของกระดาษก็คือ ความแข็งแรงของเส้นใยและความสามารถในการเปียกน้ำหรือมน้ำของเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใยเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงสูงสุดของกระดาษ ส่วนความสามารถในการเปียกน้ำหรือมน้ำจะเป็นตัวแสดงถึงประสิทธิภาพของ

พันธะ โดยปกติเมื่อนำเส้นใยจากไม้มาทำเป็นเยื่อ การที่ทำให้เส้นใยเหล่านี้เปียกน้ำหรืออมน้ำมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงและต้นทุนในการผลิตสูงตามไปด้วย

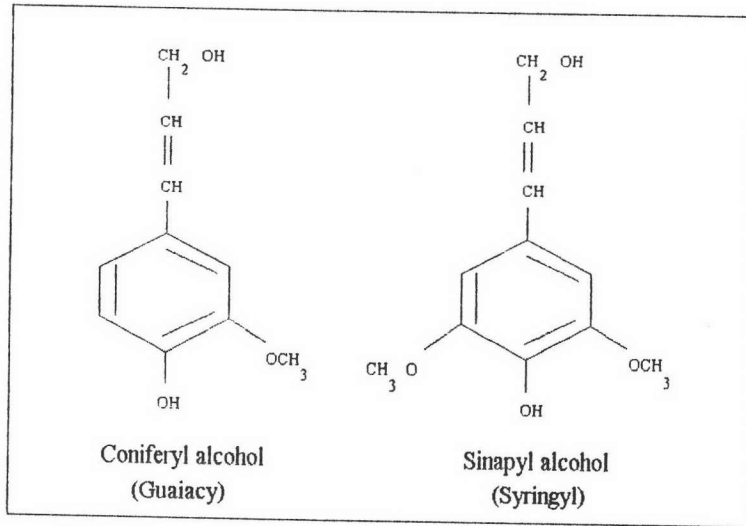
1. องค์ประกอบของเส้นใย ในเส้นใยประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ดังนี้

ก. เซลลูโลส(Cellulose) โมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเรียงต่อกันเป็นสายยาวแบบเบต้า-กลูโคสิดิกบอนด์ (β -glucosidic bond) ดังแสดงในรูป 2.1 โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงยาวสีขาวและแข็งแรงมาก โมเลกุลเซลลูโลสประมาณ 3-4 โมเลกุลรวมตัวกันเป็นเส้นฟิบริล (Fibril) มีลักษณะคล้ายเส้นด้าย เส้นฟิบริลนี้จะประกอบกันเป็นลำตัวของเส้นใย และถูกยึดติดกันด้วยลิกนิน (Lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose)



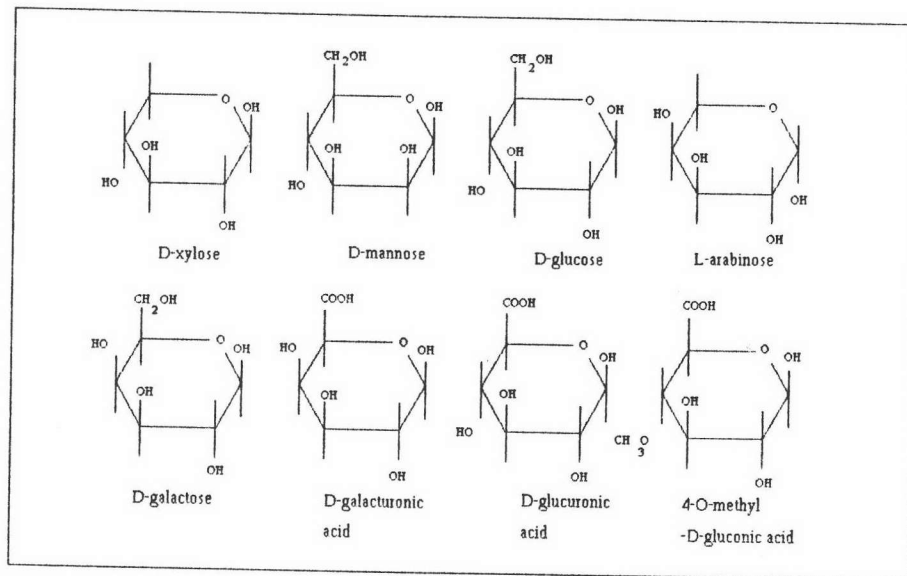
รูปที่ 2.1 : โมเลกุลเซลลูโลส

ข. ลิกนิน(Lignin) ลิกนินเป็นสารจำพวกโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยซึ่งมีโครงสร้างหลักคือ โพรพิลเบนซิน(Propyl benzene) โพรพิลไซริงกอล(Propyl syringol) โพรพิลไกคอลล (Propyl guaiacol) และโพรพิลฟีนอล (Propyl phenol) แทรกอยู่ในเนื้อไม้ ปะปนอยู่กับเฮมิเซลลูโลส ทำหน้าที่ประสานเส้นใยเข้าด้วยกัน ลิกนินเป็นสารต้านน้ำ (Hydrophobic) ถ้าเส้นใยมีปริมาณลิกนินมากจะทำให้เส้นใยไม่เปียกน้ำหรืออมน้ำ และไม่สามารถเกิดพันธะระหว่างเส้นใยได้ รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างหน่วยย่อย Phenylpropanoid ที่พบในลิกนิน



รูปที่ 2.2 : ตัวอย่างหน่วยย่อย Phenylpropanoid ที่พบในลิกนิน

ค. เฮมิเซลลูโลส(Hemicellulose) ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลย่อยประเภทอื่นๆ ที่ไม่ใช่กลูโคส เช่น เฮกโซส (Hexose) และเพนโตส (Pentose) ต่อเรียงกัน น้ำตาลเหล่านี้จะอมน้ำและพองตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ เฮมิเซลลูโลสจึงเป็นตัวทำให้เส้นใยเปียกน้ำและอมน้ำ ทำให้เกิดพันธะระหว่างเส้นใยได้ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างน้ำตาลที่พบในเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 2.3 : ตัวอย่างน้ำตาลที่พบในเฮมิเซลลูโลส

ง. สารสกัด(Attractives) เป็นสารจำพวกชันสน (Rosin) กรดไขมันสารที่ไม่สามารถเป็นสบู่ (Unsaponifiable) และกรดอิสระ พบสารพวกนี้มากในไม้เนื้ออ่อน ส่วนในไม้เนื้อแข็งมีน้อยหรือไม่มีเลย ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน

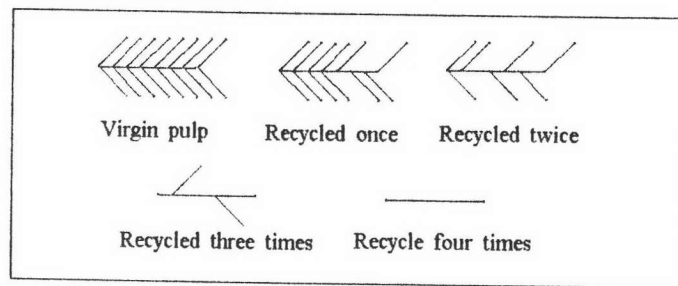
ตารางที่ 2.1 : เปรียบเทียบองค์ประกอบของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน

ชนิดไม้	เซลลูโลส	ลิกนิน	เฮมิเซลลูโลส	สารสกัด
ไม้เนื้ออ่อน	42	23	29	4
ไม้เนื้อแข็ง	45	34	21	-

เส้นใยต้องประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เพื่อสร้างความแข็งแรงของเส้นใยและเพื่อให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะได้ ส่วนลิกนินซึ่งเป็นตัวต้านการเกิดพันธะนั้นต้องกำจัดออกโดยคงปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสไว้ตามเดิม การกำจัดลิกนินออกในภาคปฏิบัตินั้น ต้องใช้ปฏิกิริยาทางเคมีที่รุนแรงซึ่งจะทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเวลาเดียวกัน ดังนั้น เมื่อกำจัดลิกนินออกมากความแข็งแรงของเส้นใยก็จะต่ำลง หรืออีกนัยหนึ่ง ถ้ายังทำให้เส้นใยเปียกน้ำมากขึ้น เส้นใยก็จะยิ่งอ่อนแอลง ในภาคปฏิบัติพบว่ากระดาษจะมีความแข็งแรงสูงสุด เมื่อในเส้นใยมีเฮมิเซลลูโลสประมาณ 20% และลิกนินไม่เกิน 4% (อร่าม อุดล, 2536)

2. เส้นใยจากเศษกระดาษ (Recovery fiber หรือ Secondary fiber)

เส้นใยที่ผ่านการผลิตมาแล้วจะมีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อนำมาผลิตกระดาษจะได้กระดาษที่มีความแข็งแรงต่ำลงเนื่องจากเส้นใยถูกตัดให้สั้นลงระหว่างขั้นตอนการผลิต โดยเฉพาะในขั้นตอนการนวดเยื่อ เฮมิเซลลูโลสมีความสามารถในการเปียกน้ำและอมน้ำลดลง ทำให้พันธะมีประสิทธิภาพต่ำลงมาก และจะต่ำลงทุกครั้งเมื่อมีการนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ สิ่งเจือปนที่อยู่ในกระดาษอาจเคลือบเส้นใยหรือแทรกตัวอยู่ระหว่างเส้นใย ทำให้พื้นที่พันธะลดลง การหมุนเวียนกระดาษกลับมาใช้ใหม่จึงได้กระดาษที่มีความแข็งแรงต่ำลงทุกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 : ความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งลดลงทุกครั้งที่น่ากลับมาใช้ใหม่

3. โครงสร้างของเส้นใย

เส้นใยประกอบด้วยผนังชั้นต่างๆ คือผนังรอบนอก(Middlelamella-ML) ผนังชั้นนอก (Primary wall-P) ผนังชั้นใน (Secondary wall-S) ซึ่งมี 3 ชั้นคือชั้น S1, S2 และ S3 ตรงกลางเส้นใยมักเป็นช่องว่างเรียกว่าลูเมน(Lumen) เนื้อเส้นใยประกอบด้วยมาโครไฟบริล (Macrofibril) จำนวนมากเรียงจับตัวกัน มาโครไฟบริลแต่ละเส้นประกอบด้วยไมโครไฟบริล (Microfibril) จำนวนมาก ผนังชั้นต่างๆ ของเส้นใยแตกต่างกันเพราะไมโครไฟบริลในแต่ละชั้นเรียงตัวไม่เหมือนกัน เช่น ชั้นนอกมีลักษณะเหมือนร่างแหทำหน้าที่คล้ายปลอกกรดชั้นในไว้ ส่วนไมโครไฟบริลของผนังชั้น S1 จะเรียงตัวในแนวเฉียงทำมุม 80 องศากับแกนเส้นใยและในผนังชั้น S2 และชั้น S3 ไมโครไฟบริลจะเรียงตัวทำมุม 20-36 องศาและ 30-64 องศาตามลำดับ

ประสิทธิภาพของพันธะ

วิธีการผลิตกระดาษอย่างคร่าวๆ ประกอบด้วยการนำเอาเส้นใยมาทำให้แขวนลอยในน้ำ น้ำเยื่อที่ได้เรียกว่าสต็อก นำน้ำเยื่อที่ได้มาราดบนตะแกรงลวดตาถี่ๆ ปล่อยให้ น้ำไหลทะลุตะแกรง โดยให้เยื่อค้างอยู่ด้านบนเป็นแผ่นบางๆ เรียกแผ่นบางๆ ที่เปียกนี้ว่าแผ่นเปียก จากนั้นก็นำแผ่นเปียกนี้ไปดูดและบีบน้ำออกแล้วอบแห้งด้วยความร้อนจนกลายเป็นแผ่นกระดาษ การที่กระดาษเป็นแผ่นอยู่ได้โดยที่ไม่หลุดร่วง ก็เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย โดยมีน้ำเป็นสารยึดเกาะ

เมื่อเส้นใย 2 เส้นที่ยึดติดกันด้วยพันธะถูกดึง ถ้าความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของพันธะ ความแข็งแรงของพันธะจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงสูงสุดของกระดาษ กระดาษจะขาดที่จุดพันธะ แต่ถ้าพันธะระหว่างเส้นใยแข็งแรงกว่าความแข็งแรงของเส้นใย เมื่อกระดาษขาด จะขาดที่ตัวเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเส้นใยหรือเยื่อ(วัตถุดิบ)

ที่ใช้ ยังไม่พบวิธีที่ทำให้ความแข็งแรงเส้นใยสูงขึ้นได้ การทำให้กระดาษแข็งแรงขึ้นจึงมีอยู่วิธีเดียวคือการทำให้ประสิทธิภาพของพันธะสูงขึ้นเท่านั้น โดยทั่วไปประสิทธิภาพของพันธะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ จำนวนจุดพันธะ พื้นที่เฉลี่ยของจุดพันธะแต่ละจุด แรงพันธะต่อพื้นที่ และความเป็นระเบียบของพันธะ

การเพิ่มประสิทธิภาพของพันธะมีหลายวิธี แต่ละวิธีจะทำลายความแข็งแรงของตัวเส้นใยไม่เท่ากัน ถ้าเพิ่มประสิทธิภาพของพันธะด้วยวิธีที่การทำลายความแข็งแรงของเส้นใยมากเกินไป กระดาษที่ได้จะไม่มีค่าความแข็งแรงตามที่ต้องการ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เส้นใยที่อ่อนแอเป็นวัตถุดิบ การเพิ่มประสิทธิภาพของพันธะจะทำลายความแข็งแรงของเส้นใยเรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้

ก. การทำฟอร์มเมชัน(Formation)ของกระดาษให้ดีขึ้น ทำให้พันธะเป็นระเบียบ ลดการเกิดกลุ่มเยื่อ (Floc) ในเฮดบ็อก(Head box)

ข. การเติมสารยึดเกาะลงไปใต้น้ำเยื่อ ทำให้แรงพันธะต่อพื้นที่พันธะสูงขึ้น โดยเปลี่ยนพันธะของเส้นใย-เส้นใยให้เป็นพันธะของเส้นใย-สารยึดเกาะ-เส้นใย

ค. การทำให้เส้นใยอ่อนนุ่มลง จะทำให้เส้นใยนั้นเกิดพันธะง่ายขึ้น จำนวนจุดพันธะเพิ่มขึ้น พื้นที่จุดพันธะกว้างออกและเส้นใยแนบสนิทกันมากขึ้น กรณีหลังนี้ทำให้แรงพันธะต่อพื้นที่มากขึ้น

ง. การทำให้ผิวเส้นใยเปียกน้ำได้มากขึ้น ทำได้โดยทำให้เส้นใยมีขนหรือพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้แรงพันธะต่อพื้นที่สูงขึ้น ขนรอบๆ ลำตัวเส้นใยเกิดจากปฏิกิริยาขยี้เส้นใยในการบดเยื่อ และการขยี้เส้นใยนี้จะทำให้ความแข็งแรงลดลง

จ. การทำให้เส้นใยต่อเส้นใยในบริเวณพันธะแนบสนิทกันระหว่างการอบแห้ง

สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้ง(Dry strength agent)

ความแข็งแรงเมื่อแห้ง(Dry strength)ของกระดาษ หมายถึงคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดันทะลุและความต้านทานการฉีกขาด กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของกระดาษก็คือพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยจะสัมพันธ์กับจำนวนพันธะไฮโดรเจนในบริเวณพันธะโดยตรง (Scott, 1992)

พันธะระหว่างเส้นใยสามารถแข็งแรงขึ้นได้โดยการบดเยื่อ และการเติมสารเพิ่มความแข็งแรง วิธีแรกจะทำให้เส้นใยมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ผงเส้นใยอมน้ำได้ดีและเส้นใยมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

ทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเส้นใยมากขึ้น ส่วนวิธีหลังจะช่วยเพิ่มจำนวนพันธะระหว่างเส้นใย

กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อเติมสารเพิ่มความแข็งแรงได้แก่ (Scott, 1992)

ก. เพิ่มจำนวนพันธะไฮโดรเจนในพื้นที่ระหว่างเส้นใย ปกติแม้ว่าการบดเยื่อจะทำให้พื้นที่พันธะมากขึ้นและเส้นใยอมน้ำมากขึ้นก็ตาม แต่ในขณะที่เดียวกันตัวเส้นใยก็อ่อนแอลงด้วย แต่การเติม สารเพิ่มความแข็งแรงจะไม่ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง

ข. ทำให้การเรียงตัวของเส้นใยในเนื้อกระดาษดีขึ้น การกระจายของพันธะสม่าเสมอขึ้น

ค. เพิ่มการตกค้างของเศษเยื่อและฟิลเลอร์และช่วยเพิ่มการระบายน้ำของแผ่นเปียก

1. สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งตามธรรมชาติ

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงตามธรรมชาติซึ่งมีอยู่ในเส้นใย ส่วนสารเพิ่มความแข็งแรงตามธรรมชาติที่มีทั่วไปมีทั้งที่มาจากยางไม้และแป้ง ทั้งที่เป็นแป้งดิบ(Native starch) และแป้งแปรรูป ในระยะหลังแป้งประจวบก็ได้รับความนิยมมากที่สุด

แป้งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ สีขาว พบในส่วนต่างๆ ของพืช เช่นในเมล็ด(ข้าวโพดและข้าวสาลี) ในรากและหัว(มันสำปะหลังและมันฝรั่ง) และในลำต้น(สา쿠) แป้งเป็นอาหารที่พืชเก็บไว้สำหรับใช้ในฤดูหนาวหรือใช้ในการงอกของเมล็ด มีการใช้แป้งในการอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมานานแล้ว ก่อนที่จะมีการคิดเครื่องจักรผลิตกระดาษเสียอีก วัตถุประสงค์ในการใช้แป้งในการผลิตกระดาษก็คือ เพิ่มการตกค้างของเศษเยื่อและฟิลเลอร์ เพิ่มความแข็งแรงของกระดาษเมื่อแห้ง เพิ่มความต้านทานการซีมน้ำที่ผิวและการฉาบกระดาษด้วยเม็ดสี เป็นต้น

ก. แป้งในเว็ท-เอนด์(Wet-end starch) เว็ท-เอนด์ หมายถึงช่วงในการผลิตกระดาษหลังจากเครื่องบดละเอียดตัวสุดท้ายจนถึงส่วนลูกกดตัวสุดท้าย ในช่วงนี้ น้ำเยื่อจะมีความเข้มข้นต่ำ มีสารเคมีที่เติมในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษกระจายอยู่ในสภาพต่างๆ เช่น Dissolved electrolytes, เส้นใย, เศษเยื่อ(Crill), ฟิลเลอร์, น้ำ, Surface-active molecules, Dissolved polyelectrolytes และ Aggrated sizing molecules แป้งที่ใช้เว็ท-เอนด์ที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

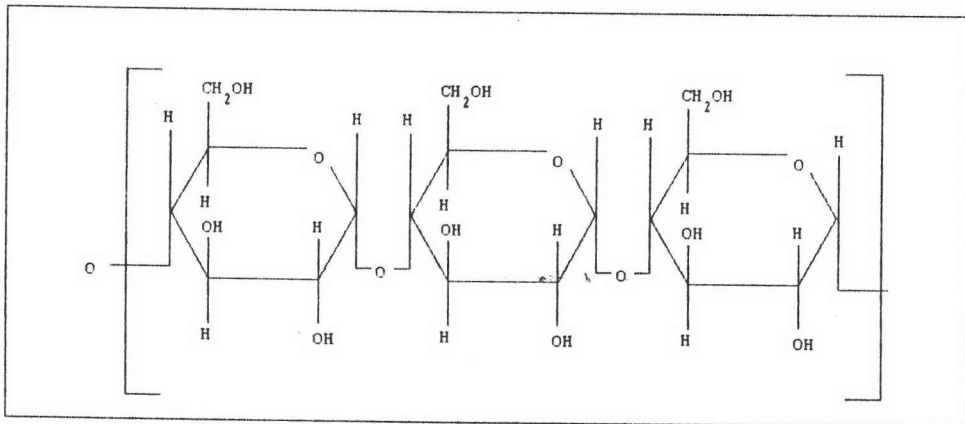
1) กระจายตัวง่าย และสามารถละลายน้ำได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำเย็นและน้ำร้อน ประสิทธิภาพของแป้งจะสูงสุดเมื่อแป้งละลายน้ำได้ 100% การละลายน้ำบางส่วนหรือไม่ละลายน้ำ ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มได้ไม่ดี

2) การตกค้างดี แป้งจะทำหน้าที่ได้ดีเมื่อตกค้างอยู่บนกระดาษเท่านั้น ถ้าการตกค้างต่ำ แป้งจะอยู่ในระบบและน้ำหมุนเวียน กลายเป็นเศษประจุลบและบวกและจะรบกวนระบบในที่สุด

3) ไม่เสื่อมสภาพ แป้งที่ดีต้องไม่มีการเสื่อมสภาพ เก็บได้นาน

ข. โครงสร้างทางเคมีของแป้ง แป้งในธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุล 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) แป้งที่ได้จากพืชทุกชนิดจะมีทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินปนกัน แต่อัตราส่วนจะแตกต่างกันไปตามชนิดพืช

1) **อะไมโลส** โครงสร้างของอะไมโลสเหมือนกับเซลลูโลส ตรงที่เป็นโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยกลูโคสจับกันที่คาร์บอนตัวที่ 1 และ 4 ดังแสดงในรูป 2.5 ส่วนที่ทำให้อะไมโลส



รูปที่ 2.5 : โมเลกุลของอะไมโลส

แตกต่างจากเซลลูโลสก็คือ ในโมเลกุลของเซลลูโลส กลูโคสเรียงตัวกันด้วยพันธะเบต้า-กลูโคสิดิก (β -glucosidic bond) พันธะระหว่างคาร์บอนตัวที่ 1 และออกซิเจนจะอยู่ในระนาบเดียวกับระนาบของกลูโคส ทำให้โพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ สามารถเกิดพันธะระหว่างกันได้แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนและอัดตัวกันแน่นกลายเป็นเส้นฟิบริลที่แข็งแรงได้ การอัดตัวกันแน่นระหว่างโมเลกุลต่อโมเลกุล ทำให้น้ำไม่สามารถซึมทะลุเข้าไประหว่างโมเลกุลได้ ส่วนโมเลกุลของอะไมโลสนั้น กลูโคสจะเรียงตัวกันด้วยพันธะอัลฟา-กลูโคสิดิก (α -Glucosidic bond) คาร์บอนตัวที่ 1 และออกซิเจนจะตั้งฉากกับระนาบของกลูโคส ทำให้โพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเกลียว (Spiral) จับตัวกันแบบหลวมๆ ไม่สามารถอัดตัวกันแน่นแบบโมเลกุลของเซลลูโลสได้ ทำให้น้ำสามารถซึม

เข้าไปในช่องว่างระหว่างโมเลกุลได้ อะไมโลสจึงสามารถอมน้ำและพองตัวขึ้นได้

2) อะไมโลเพคติน โมเลกุลของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยกลูโคสเช่นเดียวกับอะไมโลส แต่กลูโคสจะจับตัวกันแบบแขนงคล้ายกับเฮมิเซลลูโลส แขนงในอะไมโลเพคตินจะอยู่ที่คาร์บอนตัวที่ 3 หรือ 6 แต่ละแขนงมีหน่วยกลูโคสประมาณ 18-27 หน่วย การมีโครงสร้างแบบแขนงทำให้อะไมโลเพคตินอ่อนแอกว่าอะไมโลส แต่สามารถเปียกน้ำหรืออมน้ำได้ดีกว่า จึงมีอำนาจความเป็นกา (Adhesive power) สูงกว่าอะไมโลสมาก

ค. การกระจายตัวของแป้ง โดยทั่วไปแล้ว โพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีปัญหาในการกระจายตัวในน้ำ ทำให้ละลายน้ำได้ยาก อาจต้องใช้สารช่วยให้เปียก เช่น เมทธานอล เพื่อไม่ให้โพลีเมอร์จับตัวกันเป็นเม็ด แต่แป้งสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำได้โดยไม่มีปัญหา แม้ว่าจะเป็นในน้ำเย็น การเตรียมน้ำแป้งสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษจะมีการต้มให้สุกหรือเกือบสุก

เมื่อน้ำแป้งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิเกิดเจล เม็ดแป้งซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำแป้งจะอมน้ำและพองตัวขึ้น เนื่องจากอำนาจการทำละลายของน้ำสูงขึ้นจนถึงระดับที่น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปในเม็ดแป้งได้ ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการพองตัวของเม็ดแป้ง ถ้าน้ำแป้งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดเจล (ซึ่งต่างกันตามชนิดของแป้ง) อะไมโลสจะแยกตัวออกมา ความหนืดของน้ำแป้งจะลดลง เมื่อน้ำแป้งเย็นตัวลง ความหนืดของน้ำแป้งจะสูงขึ้นและเกิดเจล การเกิดเจลขึ้นอยู่กัปริมาณอะไมโลส เพราะอะไมโลสมีค่าดีพี (Degree of polymerization :DP) ต่ำประมาณ 3,000 ในขณะที่อะไมโลเพคตินมีค่าดีพี 2,000,000 อะไมโลสจึงตกตะกอนได้ง่ายกว่า ทำให้เกิดปัญหาในการเตรียมสารละลายแป้งแบบแบทช์ (Batch) เนื่องจากประสิทธิภาพของแป้งขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของแป้งและน้ำหนักโมเลกุล การต้มแป้งแบบเจ็ทไอน้ำ (Steam-jet cooking) ใช้อุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียสและแรงเฉือนทางเคมีสูง ทำให้แป้งที่ได้มีการกระจายตัวดี ไม่มีเม็ดแป้งเหลืออยู่และเกิดเจลได้ยาก โดยเฉพาะในแป้งข้าวโพด แต่การต้มแป้งโดยวิธีเจ็ทไอน้ำจึงต้องมีการควบคุมการปฏิบัติอย่างดี เนื่องจากการเตรียมสารละลายแป้งโดยวิธีนี้จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของแป้งลดลงด้วย

ง. การแปรรูปแป้ง แป้งดิบมีสมบัติแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง อุณหภูมิเกิดเจลและสัดส่วนน้ำหนักโมเลกุล การแปรรูปแป้งทำให้แป้งมีสมบัติเพิ่มขึ้นมาคือการใช้แป้งแปรรูปในเวท-เอนด์ได้ดี การเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแป้งแปรรูป ตารางที่ 2.2 แสดงวิธีการแปรรูปแป้งบางส่วน การผลิตกระดาษใช้แป้งแปรรูปหลายชนิด เช่น แป้งประจุบวก แป้งประจุลบ และแป้งไม่มีประจุ แป้งเหล่านี้ถูกใช้ในเวท-เอนด์เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษ เพิ่มการตกค้างของเศษเยื่อ การระบายน้ำ ฟอรัมเมชั่น ฯลฯ

ตารางที่ 2.2 : วิธีการแปรรูปแป้ง

การแปรรูปทางกายภาพ	Fractional into amylose and amylopectin components Thermomechanical conversion Acid hydrolysis
การแปรรูปทางเคมี	Oxidation Derivatization Enzyme conversion

จ. การตกค้างของแป้งในเวท-เอนด์ แป้งไม่มีประจุหรือแป้งดิบ ตกค้างบนเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน แป้งประจุบวกตกค้างบนเส้นใยด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของแป้งและประจุลบของผิวเส้นใย แป้งประจุลบตกค้างโดยอาศัยสารลิ่มในระบบการผลิตกระดาษแบบกรด ตารางที่ 2.3 แสดงการตกค้างรอบแรก(First pass retention) ของแป้งชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.3 : การตกค้างรอบแรกของแป้งชนิดต่างๆ

แป้ง	ความเป็นกรดต่าง = 4.5(สารลิ่ม)	ความเป็นกรดต่าง = 7
แป้งไม่มีประจุ	50%	40%
แป้งประจุลบ	100%	40%
แป้งประจุบวก	100%	100%

หมายเหตุ 1. ปริมาณแป้ง 1% เทียบกับเส้นใย

2. แป้งประจุบวกเป็นชนิดควอเตอร์นารีอะมีน

ฉ. แอ้งประจวบ มีการใช้แอ้งประจวบในการผลิตกระดาษหลายชนิดเพื่อ ปรับปรุง ความแข็งแรง การตกค้ำง ของฟิลเลอร์และการระบายน้ำ แอ้งประจวบสามารถกระจายในน้ำและ ทำให้แอ้งตกค้ำงบนเส้นใยได้ดี ประจวบที่เติมลงไปแอ้งเป็นพวกเทอร์เทียรีอะมีน (Tertiary amine) หรือควอเทอร์นารีอะมีน (Quaternary amine) ในพวกแรก ประจวบจะขึ้นกับค่าความเป็น กรดต่างของระบบ ประจวบจะลดลงเมื่อระบบเป็นด่าง ความเป็นกรดต่างมากกว่า 7.0 ในขณะที่กลุ่ม หลังจะมีเสถียรภาพดีกว่า สามารถใช้งานในช่วงความเป็น กรดต่างที่กว้างกว่า

แอ้งประจวบทั่วไปมีระดับการแทนที่ของประจวบประมาณ 0.02 นั่นคือจะมี ประจวบ 2 กลุ่มต่อกลูโคส 100 หน่วยโดยเฉลี่ย ประจวบช่วยให้แอ้งกระจายตัวในน้ำได้ดี แอ้ง สุกเร็วขึ้นและความหนืดลดลง สมบัติของแอ้งประจวบจะขึ้นกับชนิดของแอ้งเติม กลุ่มที่แทนที่ ระดับการแทนที่ การกระจายของกลุ่มประจวบ ขนาดและรูปร่างของโมเลกุล แอ้งประจวบนอก จากจะใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและสารเพิ่มการตกค้ำงแล้ว ยังใช้เป็นสารช่วยอีมัลซิฟายอิง (Emulsifying aids) ในสารกันซึมสังเคราะห์ (Synthetic sizing) และใช้เป็นประจวบสำหรับ ระบบที่ต้องการการตกค้ำงของสารต่างๆ จำนวนมาก

ช. ปฏิกริยาของแอ้งประจวบ Marton and Marton (1976) ได้ศึกษาการตกค้ำง ของแอ้งประจวบบนเส้นใยเซลลูโลสและ สรุพบว่า การตกค้ำงของแอ้งประจวบบนเส้นใยนั้นเป็น การตกค้ำงแบบถาวร การตกค้ำงจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและกลุ่มคาร์บอกซิลบนเส้นใย การตกค้ำงจะ เกิดขึ้นรวดเร็วมากและเกิดขึ้น 100%

แอ้งประจวบถูกจับโดยเศษเยื่อเช่นเดียวกับโพลีเมอร์หรือสารที่เติมอื่นๆ Marton (1976) ยังแสดงว่า การเติมแอ้งประจวบมากเกินไปทำให้เศษเยื่อทั้งหมดกลายเป็นประจวบ การ ตกค้ำงจะลดลง ในแง่ของการเป็นสารเพิ่มการตกค้ำง โพลีเมอร์สังเคราะห์อื่นๆ ให้ผลดีกว่าแอ้ง ประจวบ โดยเฉพาะเมื่อเครื่องจักรมีความเร็วสูงขึ้น ในทางปฏิบัติจะเติมแอ้งประจวบความเข้มข้นประมาณ 1% ก่อนถึงเครื่องจักรในจุดที่ไม่มีแรงเฉือนมากเกินไป เพราะแอ้งประจวบมีความ ไวต่อแรงเฉือนมากกว่าโพลีเมอร์สังเคราะห์ จุดที่เติมไม่ควรมีเศษประจุลบ (Anionic trash) มากเกินไป เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของแอ้งประจวบลดลง ถ้าในระบบมีสารส้มมากจะทำให้แรง ดึงดูระหว่างเส้นใยและแอ้งประจวบลดลง

2. สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์(Synthetic dry strength resins)

การใช้สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์เริ่มจากการใช้โพลีอะครีอะไมด์ชนิดไม่มีประจุหรือพีเอเอ็ม (Polyacrylamide:PAM) กลุ่มอะไมด์ในโพลีเมอร์ชนิดนี้ไวต่อพันธะไฮโดรเจน ทำให้สามารถเพิ่มจำนวนพันธะในพื้นที่พันธะ โมเลกุลของพีเอเอ็มมีทั้งแบบเส้นตรงและแบบแขนง มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงกว้าง และยังสามารถทำเป็นโคโพลิเมอร์ได้อีกด้วย ทำให้พีเอเอ็มได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

น้ำหนักโมเลกุลของพีเอเอ็มปกติอยู่ในช่วง 100,000 ถึง 500,000 พีเอเอ็มมีประสิทธิภาพมากกว่าสารเพิ่มความแข็งแรงตามธรรมชาติ เนื่องจากสามารถผลิตให้ใช้งานได้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปใช้ปริมาณ 0.5% ของน้ำหนักเส้นใยหรือน้อยกว่าก็เพียงพอที่จะเพิ่มความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงดันทะลุ 25-30% โมเลกุลของพีเอเอ็มต้องยาวพอที่จะตกค้างบนเส้นใยและเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แต่ถ้าโมเลกุลยาวเกินไป โมเลกุลจะกลายเป็นสะพานเชื่อมระหว่างเส้นใย ทำให้เส้นใยจับกันเป็นก้อน น้ำหนักกระดาษแปรปรวน ทำให้บางพื้นที่ของกระดาษมีน้ำหนักน้อยและความแข็งแรงของกระดาษจะเสียไป

ก. พีเอเอ็มประจุลบ เนื่องจากพีเอเอ็มชนิดไม่มีประจุ ตกค้างบนเส้นใยได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการเติมประจุลบและบวกลงไปประมาณ 5-10% โดยโมล ทำให้พีเอเอ็มตกค้างบนเส้นใยได้ดีขึ้น พีเอเอ็มประจุลบเป็นพีเอเอ็มมีประจุชนิดแรกที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยทั่วไปพีเอเอ็มประจุลบมาจากโคโพลิเมอร์ของอะครีอะไมด์และกรดโพลีอะครีลิก อีกวิธีหนึ่งได้จากปฏิกิริยา Partial hydrolysis ของกลุ่มอะไมด์ในพีเอเอ็ม ไปเป็นกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก เนื่องจากทั้งเซลลูโลสและพีเอเอ็มประจุลบมีประจุเป็นลบเหมือนกัน จึงต้องเติมสารส้มหรือเรซินประจุบวกลงไป เพื่อช่วยให้พีเอเอ็มประจุลบตกค้างบนเส้นใยได้ การใช้พีเอเอ็มประจุลบสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ถึง 50% สำหรับเยื่อที่ไม่ได้บำบัด เมื่อมีการบำบัดเยื่อเพิ่มขึ้น พื้นที่พันธะจะเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงดีขึ้น การใช้พีเอเอ็มประจุลบจึงเพิ่มความแข็งแรงได้ไม่มากนัก การใช้พีเอเอ็มประจุลบจะได้ผลดีเมื่อมีการบำบัดเยื่อน้อยถึงปานกลาง

ข. พีเอเอ็มประจุบวก พีเอเอ็มประจุบวกถูกพัฒนาขึ้นหลังพีเอเอ็มประจุลบ พีเอเอ็มประจุบวกมีข้อดีตรงที่สามารถตกค้างบนเส้นใยได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้สารส้ม ใช้ได้ในช่วงความเป็นกรดต่างที่กว้างโดยเฉพาะในช่วงที่เป็นด่าง ประจุบวกในพีเอเอ็มประจุบวกมาจากการเติมควอเตอร์นารีอะมีนลงในพีเอเอ็ม การใช้พีเอเอ็มทั้งประจุลบและประจุบวกต้องมีการผสมกับน้ำเยื่ออย่างดี การผสมต้องไม่รุนแรงจนเกินไปเพื่อไม่ให้โมเลกุลของพีเอเอ็มสั่นลง ซึ่งจะทำให้เรซินมีประสิทธิภาพลดลง การเติมเรซินต้องเติมหลังจากสารกั้นซึมเพื่อไม่ให้ความต้านทานการซึมน้ำเสียไป

ค. เคมีของสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์ สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์ต้องมีสมบัติสำคัญมากอย่างหนึ่งคือต้องสามารถตกค้างบนเส้นใยได้ ปัจจัยใดก็ตามที่ทำให้สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์ตกค้างบนเส้นใยได้จึงมีความสำคัญทั้งสิ้น ปัจจัยเหล่านี้รวมถึงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ สภาพผิวเส้นใย และการรบกวนอื่นๆ ในระบบ

จากการที่สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงแคบ ปริมาณและชนิดของประจุจึงเป็นสิ่งสำคัญในการตกค้าง ในกรณีประจุบวก ถ้าปริมาณประจุจากการตกค้างจะดีขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับประจุลบ ในกรณีประจุลบ ต้องมีการเติมสารส้มหรือประจุบวกอื่นๆ เพื่อช่วยในการตกค้าง ประจุลบอื่นๆ ที่อยู่ในระบบสามารถจับกับสารส้มได้ทำให้ประสิทธิภาพของสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์ลดลง ความต้องการประจุบวกมีอิทธิพลมากต่อสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์ประจุบวก และยังมีผลต่อสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งสังเคราะห์ประจุลบด้วย แต่มีในระดับที่น้อยกว่า

ตัวแปรในระบบเวท-เอนด์

การใช้แปรงประจุบวกอย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องพิจารณาสภาวะของระบบที่มีอยู่เดิมว่าเป็นอย่างไร มีตัวแปรหลายตัวที่ต้องพิจารณา เพื่อให้เลือกใช้แปรงได้ถูกต้องทั้งชนิดและปริมาณ ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง ความนำไฟฟ้าจำเพาะ คักซ์ซีต้า และความต้องการประจุบวกหรือลบ

1. ความเป็นกรดต่าง

ในระบบเป็นกลาง สามารถใช้เคลเซียมคาร์บอเนตเป็นฟิลเลอร์ได้ จะมีสภาพที่เหมาะสมแก่การใช้แปรงประจุบวก ในระบบที่เป็นกรดจะมีการเติมสารส้มลงในระบบ นั่นคือในระบบมีประจุ

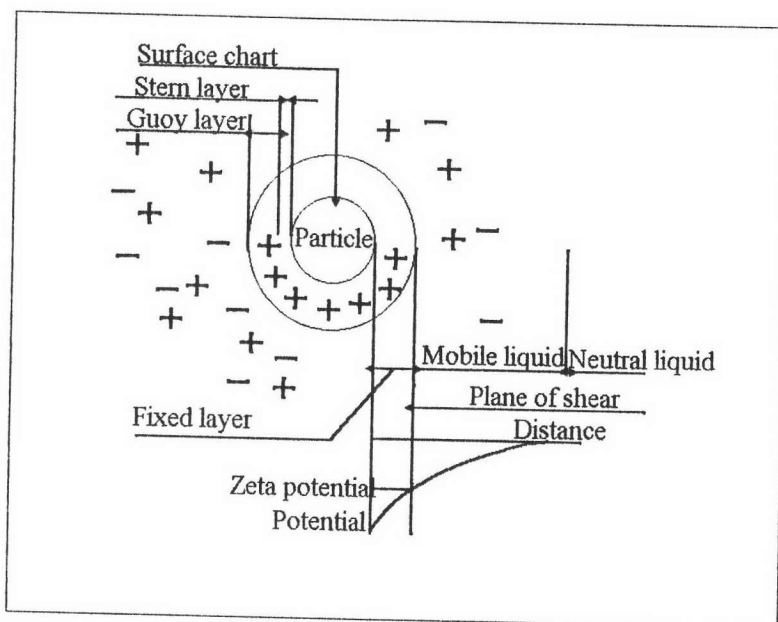
บวกอยู่แล้ว ปริมาณสารส้มที่มีอยู่ในระบบจะมีอิทธิพลต่อการตกค้างแข็งประจุบวก อาจต้องลดปริมาณสารส้มลงบ้าง เพื่อให้มีที่ว่างสำหรับให้แข็งประจุบวกตกค้าง ถ้าไม่สามารถลดสารส้มลง อาจต้องเลือกใช้แข็งประจุลบแทน นอกจากนี้ ความเป็นกรดต่างยังมีอิทธิพลต่อสารเติมที่มีประจุอื่นๆ โดยเฉพาะในแง่ของความไวในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพ

2. ความนำไฟฟ้าจำเพาะ

ในระบบเวท-เอนด์ ความนำไฟฟ้าจำเพาะหมายถึงปริมาณเกลือ (Salt) ที่มีอยู่ในระบบ ถ้ามีเกลืออยู่มาก ความนำไฟฟ้าจะสูงตามไปด้วย เกลือจะแตกตัวเป็นไอออนและบดบัง(Shielding) ประจุของแข็งและเส้นใย ทำให้ความไวในการทำปฏิกิริยาลดลง เกลือที่จับกับกลุ่มประจุลบบนผิวเส้นใยทำให้คัลกยี่ซีต้าเข้าใกล้ศูนย์ โดยที่ประจุลบที่มีอยู่ยังเท่าเดิม และเกลือที่จับกับประจุบวกบนแข็งประจุบวกทำให้แข็งประจุบวกมีประสิทธิภาพลดลง ต้องใช้แข็งที่มีระดับการเติมประจุสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าความนำไฟฟ้ายังสามารถบอกได้ว่าควรใช้แข็งชนิดใดและประสิทธิภาพควรเป็นเท่าไร

3. คัลกยี่ซีต้า(Zeta potential)

อนุภาคในระบบเวท-เอนด์ จะถูกล้อมรอบด้วยชั้นตรึง (Fixed layer) ของของเหลวซึ่งเป็นชั้นของเหลวบางๆ ชั้นตรึงนี้มีประจุไฟฟ้าอยู่ และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ ชั้นตรึงจะเคลื่อนที่ตามไปด้วย ถัดจากชั้นตรึงเป็นของเหลวที่อยู่โดยรอบ ความต่างคัลกยี่ซีต้าระหว่างชั้นตรึงและของเหลวโดยรอบเรียกว่าคัลกยี่ซีต้า ซึ่งบ่งถึงแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 คัลกยี่ซีต้า

โดยปกติคัลท์ซีต้าในระบบ เวท-เอนด์จะมีค่าลบ แต่สามารถทำให้กลายเป็นประจุบวกได้โดยการเติมสารประจุบวกให้ตกค้างบนอนุภาคและการปรับค่าความเป็นกรดต่าง การตกค้างจะเกิดขึ้นดีที่สุดเมื่อคัลท์ซีต้าเข้าใกล้ศูนย์

4. ความต้องการประจุบวกหรือลบ(Cationic or Anionic Demand : CD/AD)

ความต้องการประจุบวกเกิดจากเศษประจุลบที่ละลายอยู่ในระบบ เศษประจุลบนี้มีองค์ประกอบและปริมาณที่ไม่แน่นอน เรียกโดยทั่วไปว่าคอลลอยด์ ในระบบมักมีเศษประจุลบซึ่งมาจากลิกนินและอนุพันธ์ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส กรดไขมัน สารกันซึม สารช่วยการกระจายตัว ฯลฯ ส่วนความต้องการประจุลบเกิดจากเศษประจุบวกที่ละลายอยู่ในระบบ เช่น สารส้ม สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียก สีประจุบวก ฯลฯ เศษประจุลบจะรบกวนการตกค้างของเบี่ยงประจุบวกโดยการรวมตัวกับเบี่ยงประจุบวก เกิดเป็นสารเชิงซ้อนก่อนที่เบี่ยงประจุบวกจะตกค้างบนเส้นใย ทำให้ประสิทธิภาพของเบี่ยงประจุบวกลดลง ถ้าในระบบมีเศษประจุลบมากควรมีการกำจัดเสียก่อน

การบดเยื่อ

ในอุตสาหกรรมกระดาษมีการกล่าวกันว่า "การเตรียมเยื่อที่ดีนั้นเสมือนหนึ่งได้ทำกระดาษเสร็จแล้วกึ่งหนึ่ง" (ณรงค์ วุทธเสถียร, 2524) ถ้าเตรียมเยื่อไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการแล้ว จะไปแก้ไขในเครื่องจักรผลิตกระดาษแทบไม่ได้เลย เพราะเครื่องจักรผลิตกระดาษนั้นมีหน้าที่เพียงทำให้เยื่อที่เตรียมมาดีแล้วเรียงตัวเป็นแผ่น กระดาษทุกชนิดโดยเฉพาะกระดาษชนิดพิเศษ เช่น กระดาษมวนบุหรี กระดาษชนบัตร คุณภาพกระดาษจะขึ้นกับขั้นตอนการเตรียมเยื่ออย่างมาก และหัวใจของการเตรียมเยื่อของกระดาษทุกประเภทก็คือการบดเยื่อ (Beating หรือ refining) "เราจะทำกระดาษไม่ได้เลยถ้าปราศจากการบดเยื่อ" (อร่าม อุดล, 2536) เพราะการผลิตกระดาษทุกประเภทต้องนำเยื่อมาบดจนได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ เยื่อที่ไม่ผ่านการบดนั้น ถ้านำมาผลิตเป็นกระดาษจะได้กระดาษที่ไม่มีคุณภาพ แข็งแรง ขาดง่าย เนื้อฟ้าม (Bulky) ผิวกระดาษจะหยาบ เนื้อกระดาษไม่ดี

เยื่อที่ยังไม่บดจะมีสภาพเส้นใยอยู่ในสภาพดี ไม่ขัดขวางหรือต้านทานการไหลของน้ำ แต่เมื่อผ่านการบดแล้ว น้ำจะไหลผ่านเยื่อได้ยากขึ้น เส้นใยจะอมน้ำไว้บางส่วน ถ้านำน้ำเยื่อไหลผ่านตะแกรง น้ำจะไหลได้ช้ากว่าเมื่อยังไม่บด การวัดการบดเยื่อจะวัดจากการอมน้ำของเยื่อ โดยเรียกเป็นฟรีเนส (Freeness) มีหน่วยเป็น CFS (Canadian standard freeness) หรือ SR (Shopper rienger)

การบดเยื่อซึ่งที่จริงก็คือการบดเส้นใยนั่นเอง สามารถกระทำได้โดยการให้เส้นใยผ่านไป ระหว่างวัตถุสองชิ้น(ส่วนใหญ่เป็นโลหะ) ซึ่งจะเกิดแรงกระทำต่อเส้นใย ทั้งแรงบีบ แรงอัด แรงเฉือน แรงกด แรงตัด ทำให้เส้นใยมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป จุดประสงค์หลักในการบดเยื่อก็คือต้องการให้เส้นใยมีสมบัติในการอมน้ำ การอ่อนตัว การยุบตัว ตัดเส้นใยที่ยาวเกินไปให้สั้นลง เกิดเศษเยื่อ ลำตัวเส้นใยฉีกขาด พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ฯลฯ เมื่อเยื่อถูกบด จะเกิดปฏิกิริยาเชิงกลที่สำคัญขึ้นพร้อมๆ กัน 3 ประการคือ การนวดเยื่อ (Beating) การขยี้เยื่อ (Crushing) และการตัดเยื่อ (Cutting)

1. การนวดเส้นใย

เส้นใยในสภาพเยื่อและยังไม่ผ่านกระบวนการผลิต มีโครงสร้างเซลล์ูโลสที่เป็นระเบียบ และเรียงตัวกันแน่น โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างโมโครฟิบริลได้ ในการบดเยื่อ จะมีแรงส่วนหนึ่งกระทำต่อเส้นใยในแนวตั้งฉาก ทำให้เฮมิเซลล์ูโลสภายในชั้น S2 แตกร้าว เส้นฟิบริลจะแยกตัวออกจากกัน ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปได้ เส้นใยจึงอมน้ำและบวมได้ การแตกร้าวภายในเส้นใยจะแตกในแนวตามยาว เส้นใยจึงพองตัวออกทางด้านกว้างโดยที่ความยาวของเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง การพองตัวของเส้นใยนี้ทำให้เส้นใยอ่อนนุ่มลง ทำให้สามารถเกิดพันธะระหว่างกันได้ง่ายขึ้นและช่วยให้พื้นที่พันธะกว้างขึ้นด้วย การแตกร้าวภายในของเส้นใย (Internal fibrillation) เช่นนี้ จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของพันธะสูงขึ้นมาก แต่ความแข็งแรงของเส้นใยจะไม่ถูกทำลายและพรีเนสลดลงน้อยมาก กรณีของเยื่อใยยาวจะมีผนังชั้นนอกหุ้ม S1 ไว้ การแตกร้าวภายในของเส้นใยจะไม่สามารถทำให้เส้นใยพองตัวได้ ถ้าไม่มีการทำให้ผนังชั้นนอกฉีกขาดด้วย

2. การขยี้เส้นใย

การขยี้เส้นใยเกิดจากการที่เส้นใยได้รับแรงกระทำในแนวขนานกับความยาวของเส้นใย แรงกระทำนี้ทำให้เกิดการแตกที่รอยต่อของ S1 และ S2 ทำให้เกิดการแตกปริของเส้นใย (External fibrillation) ขึ้นที่เฮมิเซลล์ูโลส ทำให้เส้นฟิบริลหลุดออกมีลักษณะคล้ายขนหรือเส้นใยอยู่รอบลำตัวเส้นใย ในแง่ของประสิทธิภาพของพันธะ การแตกปริของเส้นใยจะทำให้ผิวเส้นใยเปียกน้ำได้ดีขึ้น พื้นที่พันธะกว้างออก ความเหนียวของแผ่นเปียกสูงขึ้น การขยี้เส้นใยทำให้ประสิทธิภาพของพันธะสูงกว่าการนวดเส้นใย แต่การขยี้เส้นใยจะทำลายความแข็งแรงของเส้นใยด้วย

3. การตัดเส้นใย

การตัดเส้นใยเกิดจากการที่เส้นใยได้รับแรงกระทำเช่นเดียวกับการขยี้เส้นใย แต่จะรุนแรงกว่ามาก เส้นใยจะฉีกขาดเป็นชิ้นเล็กๆ มีความยาวลดลง บางส่วนของเส้นใยจะหลุดออก เรียกว่าเศษเยื่อซึ่งมีขนาดเล็กมาก เศษเยื่อที่เป็นชิ้นส่วนของชั้น S1 ล้วนๆ เรียกว่าคริล(Crill) เศษเยื่อจะทำให้ฟรีเนสลดลงได้มากที่สุด และการตัดเส้นใยนี้จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงมากที่สุดด้วย ดังนั้น ถ้านวดเยื่อให้มีฟรีเนสลดลงมากเท่าไร แสดงว่ามีเศษเยื่อเกิดขึ้นมากขึ้นเท่านั้น และความแข็งแรงของเส้นใยก็จะถูกทำลายไปด้วย

การผลิตกระดาษกล่องไม่เคลือบ

ขั้นตอนการผลิตกระดาษแทบทุกชนิดอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน ต่างกันก็เพียงรายละเอียด ในการทำให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ตัวอย่างเช่น กระดาษเซ็ดหน้าต้องการความนุ่ม เพื่อให้หน้าใช้และความแข็งแรงเมื่อเปียก แต่ไม่ต้องการความต้านทานความชื้นน้ำเพื่อให้สามารถซับน้ำได้มาก ในขณะที่กระดาษพิมพ์เขียนต้องการความต้านทานความชื้นน้ำเพื่อให้หมึกไม่ซึมในขณะที่พิมพ์หรือเขียนและต้องการความแข็งแรงที่ผิว เพื่อให้สามารถลบตัวหนังสือได้โดยกระดาษไม่เป็นขุยเป็นต้น

กระดาษกล่องไม่เคลือบที่ผู้วิจัยศึกษา มีน้ำหนักตั้งแต่ 230 ถึง 500 กรัม/ตารางเมตร กระดาษที่มีน้ำหนัก 230 ถึง 290 กรัม/ตารางเมตร ประกอบด้วย 4 ชั้น เป็นชั้นขาว (Top liner) 1 ชั้นและชั้นน้ำตาล (Liner) 3 ชั้น และกระดาษที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 310 ถึง 500 กรัม/ตารางเมตร ประกอบด้วย 5 ชั้นคือ ชั้นขาว 1 ชั้น ชั้นน้ำตาล 2 ชั้น และฟิลเลอร์(Filler) 2 ชั้น ชั้นขาวประกอบด้วยเยื่อไม้ไผ่ (Bamboo pulp) ผสมกับเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ยังไม่ผ่านการพิมพ์ (Pulp substitute) ในอัตราส่วน 35 : 65 สารเคมีที่ใช้มีสารส้ม(Paper alum) ชันสน(Rosin size) เพื่อเพิ่มความต้านทานความชื้นน้ำและสี (Dye stuff) ชั้นน้ำตาลประกอบด้วยเศษกระดาษ 100% เศษกระดาษที่ใช้เป็นเศษกระดาษที่สะอาดและมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากมีเยื่อใยยาวผสมอยู่มาก เช่น เศษกระดาษกล่อง ไม่มีการเติมสารเคมีในชั้นนี้ ส่วนฟิลเลอร์ เป็นชั้นของเศษกระดาษที่มีความแข็งแรงต่ำและมีสิ่งเจือปนมาก เช่น วารสารเก่า หนังสือพิมพ์เก่า เป็นต้น ไม่มีการเติมสารเคมีเช่นเดียวกับชั้นน้ำตาล การผลิตกระดาษกล่องไม่เคลือบแบ่งเป็น 2 ชั้นคือการเตรียมเยื่อและการทำแผ่น

1. การเตรียมเยื่อ ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

ก. การตีเยื่อ(Pulping) เป็นการทำให้เศษกระดาษหรือเยื่อกระจายออก แขนวลอยในน้ำเป็นเส้นใยอิสระโดยไม่ตัดเส้นใย เส้นใยจะแยกจากกันที่จุดพันธะโดยใช้โมตีเยื่อ(Pulper) น้ำเยื่อที่ได้มีความชื้น (Consistency) ประมาณ 5-8% ในกรณีของเศษกระดาษ น้ำเยื่อที่ได้จะมีสิ่งเจือปนต่างๆ น้ำเยื่อจะถูกจ่ายสู่ขั้นตอนการทำความสะอาดต่อไป ส่วนเยื่อซึ่งสะอาดอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องทำความสะอาด สามารถนำไปใช้ได้เลย

ข. การทำความสะอาด เศษกระดาษแต่ละชนิดจะแยกกันทำความสะอาด โดยมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่เหมือนกันคือคลีนเนอร์ (Cleaner) และสกรีน (Screen) คลีนเนอร์เป็นไซโคลนสำหรับของเหลว (Liquid cyclone) ใช้กำจัดสิ่งเจือปนที่มีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใย เช่น กรวดทราย เศษโลหะ เศษแม็กซ์ เป็นต้นมีทั้งแบบที่ทำงานที่ความชื้นเยื่อสูงและที่ความชื้นเยื่อต่ำ ส่วนสกรีนใช้กำจัดสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใย มักเป็นพวกเศษกระดาษที่เป็นแผ่น(Lump) โฟมพลาสติกเคลือบกระดาษ เป็นต้น สกรีนมีทั้งแบบรูและแบบร่อง

ค. ตะแกรงวิดเยื่อ(Decker or thickener) น้ำเยื่อความชื้นต่ำประมาณ 1% ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ถูกจ่ายไปยังตะแกรงวิดเยื่อเพื่อแยกน้ำออก น้ำที่ได้จะถูกหมุนเวียนนำกลับไปใช้ที่โมตีเยื่อ เยื่อที่ได้จากตะแกรงวิดเยื่อมีความชื้นประมาณ 3.5%

ง. เครื่องบดละเอียด (Refiner) เยื่อจะผ่านเครื่องบดละเอียดเพื่อให้เส้นใยมีสมบัติตามต้องการ เส้นใยจะอ่อนตัวลง สั้นลง มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น

จ. การเติมสารเคมี เติมเฉพาะชั้นบนเพื่อเพิ่มความต้านทานความชื้นน้ำและคุณภาพที่ปรากฏแก่สายตาเช่นสี ความขาวสว่างและสมบัติด้านการพิมพ์ เช่น ความเรียบ ความต้านทานการซีมน้ำ เป็นต้น

2. การทำแผ่น

เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษกล่องไม่เคลือบที่ผู้วิจัยศึกษา เป็นแบบตะแกรงกลม-ลูกอบหลายลูก(Cylinder-multidryer) ความเร็วเครื่องประมาณ 30-55 เมตรต่อนาที ความกว้าง 68 นิ้ว ส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรมีดังนี้

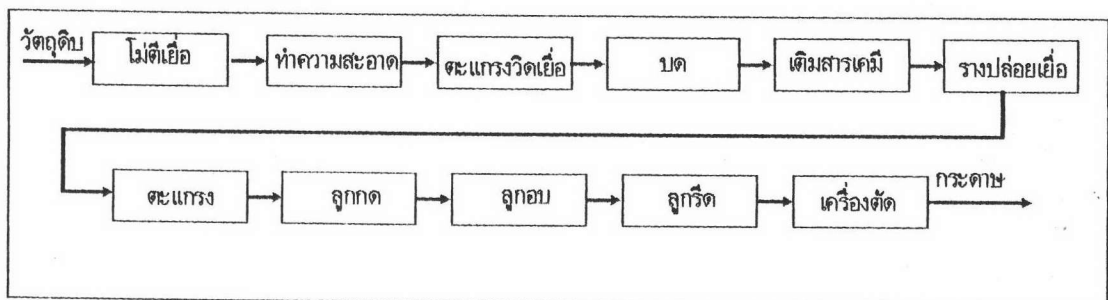
ก. ส่วนตะแกรง (Wire part) เป็นตะแกรงกลมจำนวน 5 ลูก น้ำเยื่อที่มีความชื้นประมาณ 0.5% ถูกจ่ายเข้าตะแกรงกลมแต่ละลูก น้ำจะลอดตะแกรงเหลือเส้นใยซึ่งแผ่เป็นแผ่นเปียกอยู่ด้านบน เยื่อที่ผ่านส่วนตะแกรงมีความชื้นประมาณ 82%

ข. ส่วนลูกกด(Press part) แผ่นเปียกจากส่วนตะแกรงถูกส่งมายังส่วนลูกกดด้วยผ้าใบ (Felt) แผ่นเปียกจะถูกดูดด้วยรางลมดูด(Suction box) ซึ่งต่ออยู่กับปั๊มลมดูด(Suction pump) บีบด้วยลูกกด(Press roll) จนแผ่นเปียกมีความชื้นประมาณ 60%

ค. ส่วนลูกอบ(Dryer part) ประกอบด้วยลูกอบแยงกี้(Yankee dryer) 1 ลูกและลูกอบดรัม (Drum dryer) 16 ลูก ใช้ไอน้ำความดัน 4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร น้ำในกระดาษจะระเหยเป็นไอ กระดาษที่ออกมาจะมีความชื้นประมาณ 5%

ง. ส่วนลูกรีด(Calender part) ประกอบด้วยชุดลูกรีด 2 ชุด แต่ละชุดมีลูกรีด 5 ลูก ที่ลูกรีดชุดแรกมีการเติมสารเคมี แบ่งแปรรูป สารฟอกขาว(Optical brightness agent: OBA) แวกซ์ (Wax) และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่ชั้นบนของกระดาษ ลูกรีดจะทำให้กระดาษเรียบและมีความหนาลดลง

จ. เครื่องตัด(Cutter) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของเครื่องจักร กระดาษที่ผ่านลูกรีดชุดที่ 2 จะถูกตัดเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ขนาดปกติคือ 31 นิ้ว x 43 นิ้ว แล้วห่อเพื่อส่งแก่ลูกค้าต่อไป

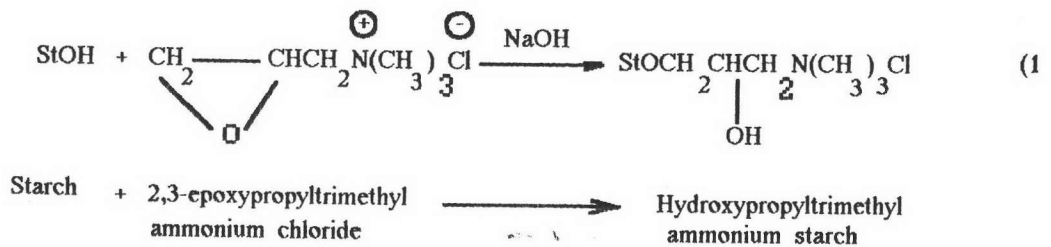


รูปที่ 2.7 : การผลิตกระดาษ

การผลิตแป้งแปรรูปประจุบวก

การผลิตแป้งประจุบวกในสมัยก่อนจะเป็นขั้นตอนในการผลิตอนุพันธ์อะมิโนเซลลูโลส จนกระทั่งช่วงปี ค.ศ. 1950 จึงมีการผลิตอนุพันธ์แป้งประจุบวกสังเคราะห์ในอุตสาหกรรม มีการค้นพบว่าไดเอทิลอะมิโนเอทิลคลอไรด์ (Diethylaminoethyl chloride) สามารถทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งโดยอะมิโนที่ติดอยู่บนแป้งได้ต่าง ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า แป้งที่ได้ไม่มีการเกิดเจล

แป้งชนิดควอเทอร์นารีแอมโมเนียมอัลคิลอีเทอร์ (Quaternary ammonium alkyl ethers) มาจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งและ 2,3-อีพอกซีโพรพิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (2,3-Epoxypropyltrimethylammonium chloride) หรือคลอโรโพรพิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Chloropropyltrimethylammonium chloride) ตัวหลังนี้จะเปลี่ยนไปเป็นตัวแรกในสภาวะต่าง ปฏิกิริยาของการผลิตแป้งประจุบวกที่เกิดขึ้นคือ



อนุพันธ์ของอีเทอร์ประจุบวกมักจะผลิตจากปฏิกิริยาแบบ Suspension ในสภาพต่าง ที่อุณหภูมิ 20 -50 องศาเซลเซียส เวลานาน 8 - 16 ชั่วโมง จากนั้นปรับความเป็นกรดต่างให้ลดลงในช่วง 3 - 7 ด้วยกรดเจือจาง กรองเอาของเหลวออก ล้าง แล้วทำให้แห้ง แป้งประจุบวกอาจผลิตด้วยปฏิกิริยาแบบกึ่งแห้ง (Semidry) ได้เช่นกัน