

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 กระบวนการผลิตกระดาษ [3,5,6,8,10]

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ มีขั้นตอนหลักๆ อยู่ 3 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นตอนการเตรียมเยื่อ (stock preparation)
2. ขั้นตอนการผลิตกระดาษ (papermaking)
3. ขั้นตอนการแปรรูป (converting)

#### การเตรียมน้ำเยื่อ

ในขั้นการเตรียมน้ำเยื่อนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาคุณภาพของเส้นใย โดยการนำเยื่อไปบด และปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยการผสมหรือใส่สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า “น้ำเยื่อ” หรือ “สต็อก” (stock) เยื่อที่นำมาทำกระดาษทุกชนิดจะต้องผ่านการบด มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของเยื่อ เยื่อบางชนิดไม่จำเป็นต้องบด เช่น เยื่อไม้บดและเยื่อเวียนทำใหม่ ในขั้นการเตรียมน้ำเยื่อประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการบดและผสมโดยมีขั้นตอนการปฏิบัติการเรียงลำดับดังนี้

- 1.การกระจายเส้นใย (defibering) กระจายเยื่อเพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นอิสระในน้ำโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไฮดรอปัลเปอร์ (hydropulper)
- 2.การบดเยื่อ (refining) บดเยื่อเพื่อให้เส้นใยแตกแขนงเป็นการเพิ่มศักยภาพของพันธะระหว่างเส้นใยให้สูงขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้คือรีไฟเนอร์ (refiner)
- 3.การผสมน้ำเยื่อ (blending) เป็นการเติมสารเติมแต่งลงไปผสมกับเยื่อที่ผ่านการบดแล้วโดยผสมในถังใบพัดกวน เยื่อจะถูกเก็บในถังที่เรียกว่า แมชีนเชสต์ (machine chest)
- 4.การแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำ เยื่อ (screening and cleaning) โดยใช้ pressure screen หรือ flat screener เพื่อคัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยออกแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความสะอาด เรียกว่า เซนตริฟิวต์คลีนเนอร์ (centrifugal cleaner) คัดแยกวัสดุอื่นออกไปโดยใช้หลักการถ่วงจำเพาะ
- 5.การควบคุมความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency regulator) เพื่อควบคุมให้น้ำเยื่อชื้นคงที่

## ขั้นตอนการผลิตกระดาษ

### 1. การปล่อยเยื่อกระดาษ ( Head Box )

หลังจากเตรียมเยื่อกระดาษที่มีส่วนผสมและความเข้มข้นของสารเคมีตามที่ต้องการแล้ว จะเริ่มขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ โดยเริ่มจากการนำเยื่อดังกล่าวมาปล่อยลงสู่ลวดเดินแผ่นเพื่อให้เยื่อเกิดการกระจายตัวและเรียงตัวซ้อนกันเป็นแผ่นกระดาษ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการปล่อยเยื่อกระดาษลงสู่ลวดเดินแผ่น เรียกว่า Head Box

### 2. ชุดลวดเดินแผ่น ( Wire Part )

การปล่อยเยื่อกระดาษลงสู่ลวดเดินแผ่น นอกจากจะเป็นการทำให้เยื่อเกิดการกระจายตัว และเรียงตัวซ้อนกันเป็นแผ่นกระดาษแล้ว ในช่วงของลวดเดินแผ่นนี้ น้ำและสารเคมีที่อยู่ในเยื่อกระดาษจะถูกระบายออกจนเหลือความชื้นประมาณ 70-80%

### 3. ชุดลูกกด ( Press Part )

เมื่อกระดาษผ่านชุดลวดเดินแผ่นแล้ว กระดาษจะถูกส่งเข้าสู่ชุดลูกกดโดยผ้าสักหลาด ซึ่งผ้าสักหลาดนอกจากจะทำหน้าที่พากระดาษไปยังขั้นตอนต่างๆของกระบวนการผลิตกระดาษแล้ว ยังทำหน้าที่ดูดซับน้ำออกจากกระดาษบางส่วนด้วย ซึ่งเมื่อกระดาษเข้าสู่ชุดลูกกด ชุดลูกกดจะทำหน้าที่รีดเอาน้ำออกจากกระดาษ โดยการใช้แรงในการกดและบีบน้ำให้ออกจากกระดาษให้มากที่สุด และเมื่อกระดาษผ่านออกจากชุดลูกกด กระดาษจะมีความชื้นเหลือประมาณ 55-60% ก่อนที่จะเดินทางเข้าสู่กระบวนการในชุดลูกอบต่อไป

### 4. ชุดลูกอบ ( Dryer Press )

เมื่อกระดาษเดินทางมาถึงชุดลูกอบ กระดาษจะถูกทำให้แห้งมากขึ้น โดยการใช้ความร้อนจากไอน้ำ ซึ่งกระดาษที่ผ่านออกจากชุดลูกอบจะค่อนข้างแห้ง และเหลือความชื้นประมาณ 5%

### 5. ชุดฉาบผิว ( Size Press )

เพื่อให้กระดาษมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และเหมาะกับการนำไปใช้งาน กระดาษจะผ่านการฉาบด้วยสารเคมี ซึ่งจะมีผลทำให้

- ต้านทานการถอนผิวได้ดีขึ้น ( Picking Resistance )
- ต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น ( Water Resistance )
- มีความเรียบดีขึ้น ( Smoothness )

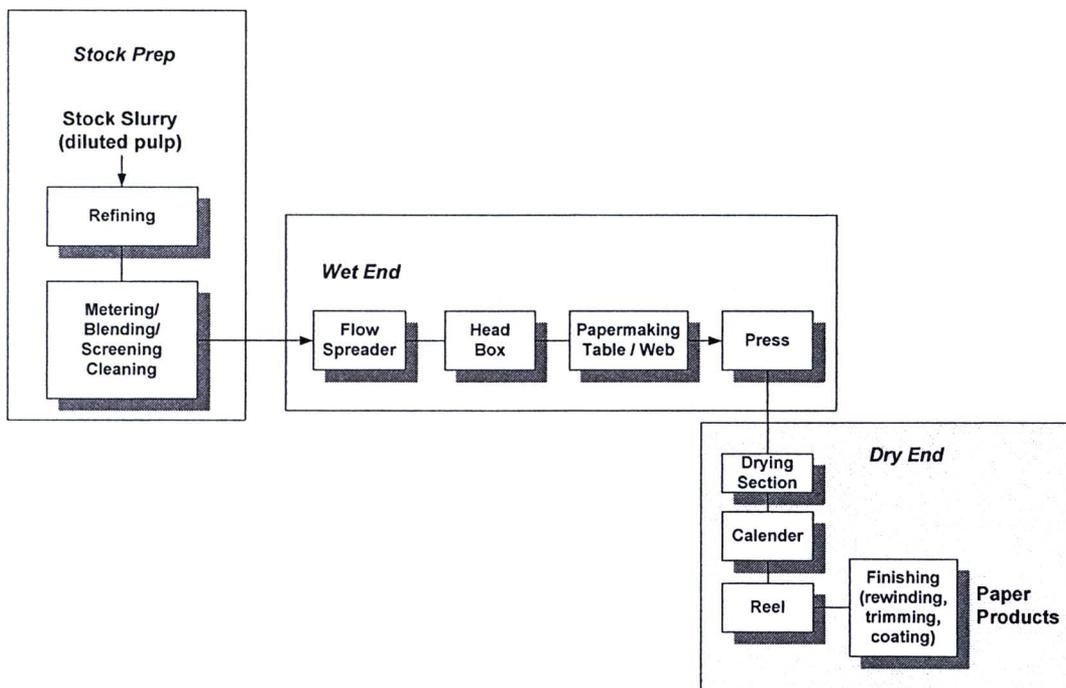
### 6. ชุดขัดผิว ( Calender )

เมื่อกระดาษมาถึงชุดขัดผิว จะยังมีผิวหน้าที่ค่อนข้างหยาบ และยังไม่แน่นตัว ดังนั้นเมื่อมาถึงชุดขัดผิว กระดาษจะถูกส่งผ่านลูกกลิ้งโลหะที่ใช้แรงกดสูง เพื่อ

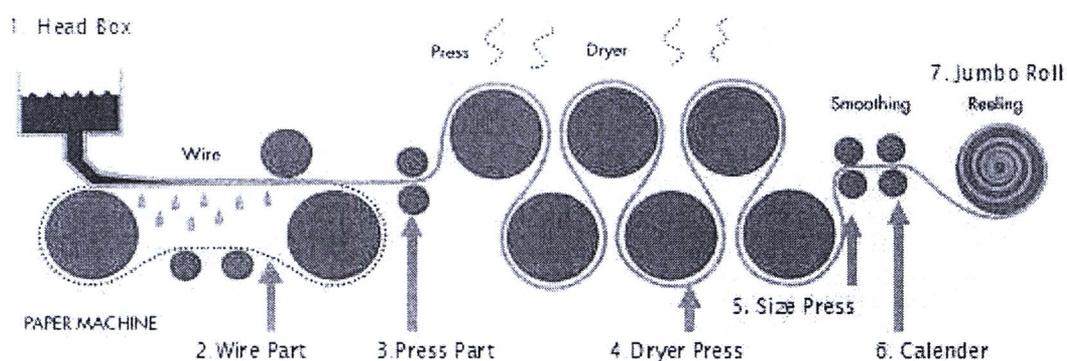
- ควบคุมความหนาของกระดาษให้ได้ตามที่ต้องการ
- ควบคุมความเรียบของกระดาษให้ได้ตามที่ต้องการ

และเมื่อผ่านขั้นตอนของชุดขัดผิวแล้วกระดาษจะถูกกรอเข้าม้วนใหญ่ (Jumbo Roll) เพื่อเข้าสู่กระบวนการแปรรูปต่อไป โดยกระบวนการหลักและขั้นตอนของการผลิตกระดาษแสดงได้ดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 2

หากต้องการปรับปรุงคุณภาพของผิวกระดาษให้มีความเรียบเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการพิมพ์ และมีความแข็งแรงขึ้น ก็สามารถนำกระดาษดังกล่าวไปทำการเคลือบผิว โดยผ่านเข้าเครื่องเคลือบผิว (Coater) ซึ่งทำหน้าที่นำสารเคลือบผิวซึ่งมีโพลีเมอร์กับแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเคมีหลัก และมีส่วนผสมของดินขาว หินปูน และลาเทกซ์อีกเล็กน้อย ไปเคลือบที่ผิวกระดาษ การเคลือบผิวอาจเป็นแบบ “เคลือบด้านเดียว” หรือ “เคลือบสองด้าน” ของกระดาษ และอาจจะ “เคลือบด้าน” หรือ “เคลือบมัน” ก็ได้ ทั้งนี้การเคลือบด้านหรือเคลือบมันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่ใช้ รวมถึงความมันวาวของกระดาษที่นำมาเคลือบผิว และวิธีการที่ใช้ในการเคลือบผิวเป็นสำคัญ ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบผิวกระดาษอาจเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องผลิตกระดาษ หรือแยกออกมาต่างหากก็ได้ กระดาษที่ผ่านการรีดผิวและ/หรือเคลือบผิวมาแล้วเป็นกระดาษที่มีความเรียบและความมันวาวในระดับหนึ่ง หากต้องการเพิ่มความมันวาวของกระดาษให้มีมากขึ้น จะต้องนำกระดาษไปขัดผิวอีกครั้งหนึ่งโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “Supercalender” ซึ่งจะสามารถเพิ่มความมันวาวของกระดาษให้มีมากขึ้นตามจำนวนครั้งที่กระดาษได้รับการขัดผิว

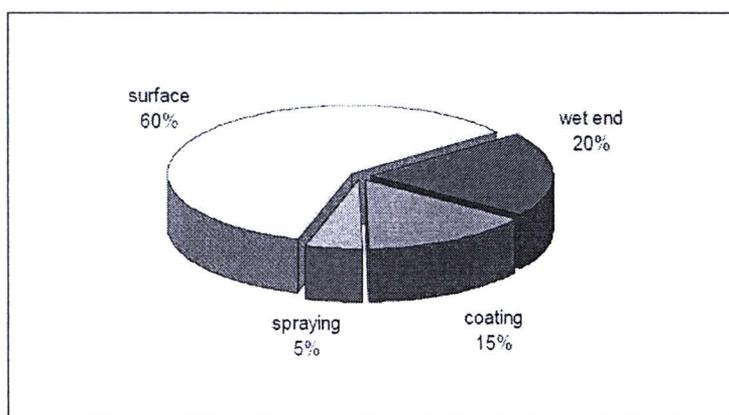


รูปที่ 1 แสดงกระบวนการหลักในการผลิตกระดาษ [10]



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนหลักในการผลิตกระดาษ [10]

## 2.2 การใช้แบ่งในกระบวนการผลิตกระดาษ [4,7,9,11]



รูปที่ 3 แสดงสัดส่วนการใช้แบ่งในกระบวนการผลิตกระดาษ [27]

จากรูปที่ 3 จะพบว่าในปี 2000 แบ่งที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษส่วนใหญ่แล้วจะพบมากใน 3 ขั้นตอนหลักๆด้วยกัน ได้แก่

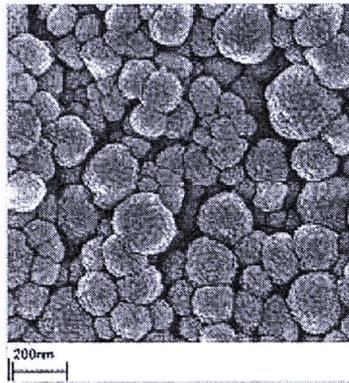
## 1. กระบวนการผลิตช่วงเปียก (wet end)

กระบวนการผลิตช่วงเปียกหมายถึงส่วนของกระบวนการผลิตที่เส้นใยและองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เช่น เยื่อใยอ่อน (cellulosic fine) และผงแร่ (mineral filler) กระจายตัวอยู่ในน้ำปริมาณมาก โดยทั่วไปจะมีการเติมแป้งลงในกระบวนการผลิตช่วงเปียกเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มการตกค้าง (retention aid) ช่วยให้เยื่อใยขนาดเล็กและผงแร่จับตัวกันและคงอยู่ในเนื้อกระดาษได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้การระบายน้ำ (dewatering) บนตะแกรงสายพานเดินแผ่นกระดาษเกิดได้ดีขึ้น แม้ว่าแป้งดิบ (native starch) จะสามารถใช้ในกระบวนการผลิตช่วงนี้ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้แป้งดัดแปรที่มีประจุบวกหรือที่เรียกว่าแป้งแคทไอออนิกมากกว่า โดยประจุบวกของแป้งแคทไอออนิกจะดึงดูดกับประจุลบของเส้นใยเซลลูโลสและผงแร่ได้ดี ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยด้วยตัวเอง และระหว่างเส้นใยกับผงแร่ได้ดีขึ้น ทำให้มีปริมาณตกค้างของผงแร่คงอยู่ในเนื้อกระดาษได้มากขึ้นและกระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบแล้ว การใช้แป้งแคทไอออนิกจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าและยังใช้ปริมาณที่น้อยกว่าด้วยแป้งแคทไอออนิกที่สำคัญทางการค้ามี 2 ประเภท ได้แก่ tertiary amino starch และ quaternary ammonium starch โดยแป้งชนิด quaternary ammonium starch จะมีประจุบวกในทุกๆ ระดับของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แต่แป้งชนิด tertiary amino starch จะมีประจุบวกเฉพาะสภาวะที่อยู่ในช่วงของความเป็นกรดเท่านั้น ดังนั้นการใช้ประโยชน์ของ tertiary amino starch จึงมีข้อจำกัดมากกว่า ประกอบกับ แนวโน้มของกระบวนการผลิตกระดาษที่มีการเปลี่ยนแปลงจากระบบที่มีสภาวะในช่วงกรดมาเป็นระบบที่มีสภาวะการผลิตในช่วงด่าง และยังมี การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้แป้งชนิด tertiary amino starch น้อยลงเรื่อยๆ

## 2. การฉาบผิวกระดาษ (surface sizing)

ในอุตสาหกรรมกระดาษมีการใช้แป้งมากที่สุดในช่วงขั้นตอนของการฉาบผิวกระดาษ การฉาบผิว หมายถึง กระบวนการที่แผ่นกระดาษวิ่งผ่านสารละลายของสารฉาบผิวกระดาษ แล้วจึงวิ่งผ่านลูกกลิ้ง ซึ่งจะทำหน้าที่กดอัดสารฉาบผิวเข้าไปในกระดาษและ ขณะเดียวกันก็จะช่วยรีดสารฉาบผิวที่มากเกินไปให้ออกจากผิวกระดาษ การฉาบผิวกระดาษมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงผิวกระดาษให้เรียบและแข็งแรงขึ้น เพื่อให้เหมาะกับงานเขียนและงานพิมพ์ ช่วยลดการหลุดลอกของเส้นใยที่ผิวกระดาษ ความเข้มข้นของสารละลายแป้งที่ใช้ในการฉาบผิวกระดาษอาจอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2 - 15% ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องฉาบผิวที่ใช้และ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการโดยทั่วไปแล้วแป้งดิบตามธรรมชาติมีความหนืดสูงมากเกินไปสำหรับใช้ในขั้นตอนการฉาบผิวกระดาษ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดความหนืดของแป้งลงก่อนที่จะนำไปใช้ได้ ซึ่งการลดความหนืดของแป้งนี้อาจทำได้ที่โรงงานผลิตกระดาษเองโดยการใช้เอนไซม์หรือ ใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี (thermochemical conversion) อย่างไรก็ตามแป้งที่ลดความหนืดด้วยการลดขนาดโมเลกุลนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดการคืนตัว หรือที่เรียกว่ารีโทรเกรเดชัน ซึ่งก็คือการที่โมเลกุลแป้งกลับมาจับตัวกันเองทำให้

ประสิทธิภาพในการเป็นสารฉาบผิวของแป้งลดลง อีกทางเลือกหนึ่งที่ได้คือการซื้อแป้งที่ผ่านการตัดแปร มาล่วงหน้าแล้วจากโรงงานผู้ผลิตแป้งตัดแปร แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งตัดแปรที่นิยมนำมาใช้ในการฉาบผิว กระจกมากที่สุดชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีสมบัติในการเกิดฟิล์มได้ดีและมีแนวโน้มในการเกิดริโทเกรเดชั่นต่ำ อย่างไรก็ตามถ้ามีการนำกระจกที่ฉาบด้วยแป้งออกซิไดซ์มาตีเป็นเยื่อและนำกลับมาใช้ใหม่ (recycled) แป้งออกซิไดซ์ซึ่งมีประจุลบจะผลึกผงแร่ (mineral filler) ให้เกิดการกระจาย ทั้งผงแร่และแป้งออกซิไดซ์เองจะไม่สามารถเกาะติดบนเส้นใยของเยื่อกระจกได้ ทำให้เกิดการสูญเสียผงแร่และแป้งออกซิไดซ์ไปในน้ำทิ้งของโรงงานเกิดปัญหาหมอกภาวะได้ แป้งตัดแปรที่มีการเติมหมู่ฟังก์ชันเข้าไปในโมเลกุลแป้ง เช่นแป้งอะซิเตท แป้งไฮดรอกซีเอทิล และแป้งแคทไอออนิกเริ่มเป็นที่นิยมสำหรับใช้เป็นสารฉาบผิวกระจกมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งกลุ่มนี้เกิดริโทเกรเดชั่นต่ำและไม่ทำให้เกิดการกระจายตัวหรือสูญเสียผงแร่ถ้ามีการนำกระจกกลับมาผลิตเป็นเยื่อใช้ใหม่ อนุภาคของแป้งแสดงได้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อนุภาคขนาดนาโนของแป้งจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [4]

### 3. การเคลือบผิวกระจก (paper coating)

การเคลือบผิวกระจก คือการนำส่วนผสมที่ประกอบด้วยผงแร่หรือที่เรียกว่า mineral pigment สารยึดติด (adhesive) และสารตัวเติมอื่นๆ มาเคลือบเป็นชั้นบางๆบนผิวกระจก ชั้นตอนนี้จะช่วยเพิ่มความขาวสว่าง ความเงา และความทึบแสงของกระจก ช่วยให้กระจกมีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ผงแร่เป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการเคลือบผิวกระจก ผงแร่ที่นิยมใช้ได้แก่ ดินขาว (clay), แคลเซียมคาร์บอเนต, ไททาเนียมไดออกไซด์ และ talc ในขั้นตอนการเคลือบผิวกระจกมีการใช้แป้งเพื่อทำหน้าที่เป็นสารยึดติดหรือเป็นกาว ช่วยให้ผงแร่ยึดเกาะกันและยึดติดกับแผ่นกระจกได้ดีขึ้น แป้งที่ใช้ในขั้นตอนการฉาบผิวกระจกตามที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่แล้ว สามารถนำมาใช้เป็นสารยึดติดในขั้นตอนการเคลือบผิวกระจกได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามแป้งสำหรับใช้ในขั้นตอนการเคลือบผิวนี้นี้จำเป็นต้องมีความหนืดต่ำมากกว่าแป้งที่ใช้ในขั้นตอนอื่นๆทั้งหมดในกระบวนการผลิตกระจก ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมส่วนผสม

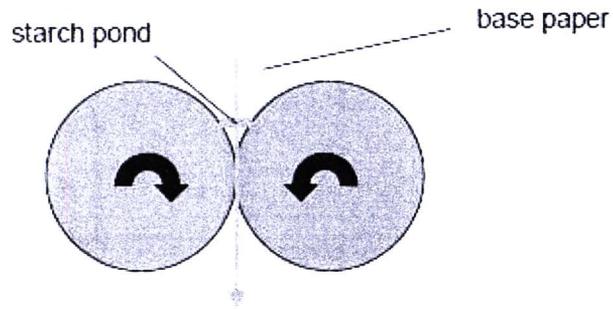
สำหรับเคลือบผิวกระดาษนั้นจำเป็นต้องเติมแป้งลงไปปริมาณที่สูงมาก เพื่อจะได้มีแรงยึดเหนี่ยวสำหรับยึดติดผงแร่ได้มากพอ และในขณะเดียวกันส่วนผสมนี้ก็ควรที่จะยังคงเหลือพอที่จะกลายเป็นชั้นบางๆบนผิวกระดาษได้ การใช้แป้งออกซิไดซ์เพื่อเป็นสารยึดติดในการเคลือบกระดาษนั้น จะมีปัญหาเช่นเดียวกับกรณีของการฉาบผิวกระดาษตามที่ได้กล่าวไปแล้ว คือถ้ามีการนำกระดาษกลับมาตีเป็นเยื่อใช้ใหม่ ประจุลบของแป้งออกซิไดซ์จะทำให้เกิดการกระจายตัวของผงแร่และเกิดการสูญเสียผงแร่ไปในน้ำทิ้ง ดังนั้นความนิยมใช้แป้งออกซิไดซ์เพื่อเป็นสารยึดติดในการเคลือบกระดาษจึงลดลง แป้งไฮดรอกซีเอทิลถือเป็นแป้งที่ดีและเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารยึดติดในการเคลือบผิวกระดาษ เนื่องจากมีสมบัติในการเกิดฟิล์มที่ดีเยี่ยมและเกิดรีโทรเกรเดชั่นได้ต่ำมาก อย่างไรก็ตามแป้งชนิดนี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง จึงไม่ค่อยนำมาใช้ในการผลิตกระดาษเกรดทั่วๆไป

### 2.3 กระบวนการฉาบผิวกระดาษ (Size Press) [3,7]

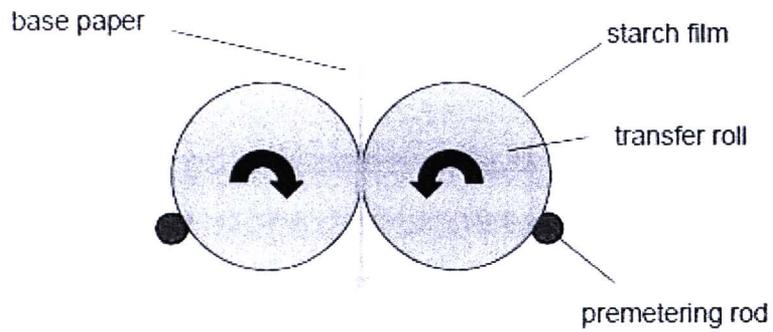
กระดาษที่ใช้ในการพิมพ์และเขียนจะต้องผ่านกระบวนการฉาบผิวเพื่อทำการปรับสภาพผิวหน้าด้วยเครื่องจักรที่ถูกระบุว่า Size Press

#### ประเภทของ Size Press [6]

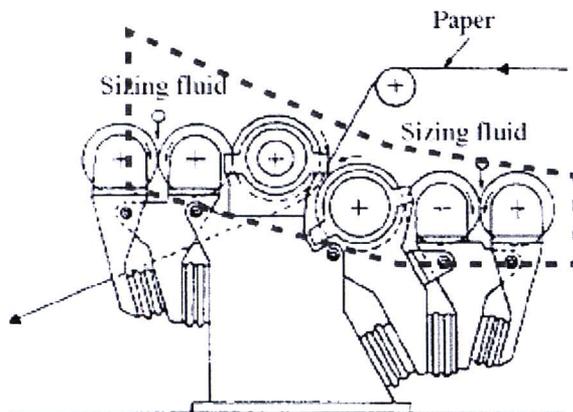
1. แบบแอ่งน้ำ ( Pond type or Puddle type size press ) ดังแสดงในรูปที่ 5  
มีลักษณะเป็นแอ่งอยู่ระหว่างลูกโรลทั้ง 2 ลูก ทำหน้าที่รองรับน้ำแป้งที่ผ่านการต้มสุกที่ถูกปล่อยลงแอ่งนั้น กระดาษจะเคลื่อนที่ผ่านแอ่งน้ำแป้งเพื่อเป็นการฉาบผิว ปรับสมบัติของผิวหน้ากระดาษ โดยแบ่งได้ 3 แบบ
  - แบบแนวนอน (Horizontal Type)
  - แบบแนวตั้ง (Vertical Type)
  - แบบเอียง (Inclined Type)
2. แบบควบคุมฟิล์ม ( Metering size press ) ดังแสดงในรูปที่ 6  
ลูกโรลทั้ง 2 ลูกจะรับน้ำแป้งจากถาด หรือ โดยสามารถแบ่งได้ 2 แบบดังนี้
  - Sym-sizer : ลูกโรลรับน้ำแป้งจากถาด และใช้ Rod หรือ Blade เป็นตัวควบคุมความหนาของฟิล์ม
  - Gate Roll : ลูกโรลรับน้ำแป้งจากลูกดัก และใช้ Rod หรือ Blade เป็นตัวควบคุมความหนาของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 5 Size Press แบบอ่างน้ำ [27]



รูปที่ 6 Size Press แบบควบคุมฟิล์ม [27]



รูปที่ 7 Size Press แบบ Gate Roll [11]

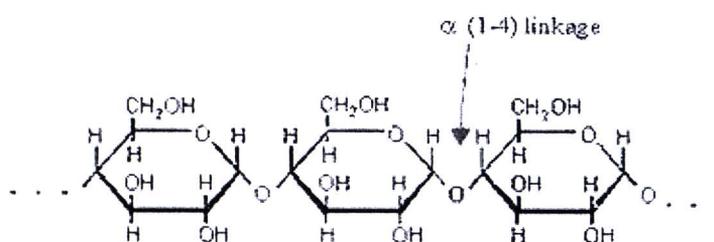
## ปัจจัยและผลที่สำคัญต่อการเคลือบผิว

1. ลักษณะของตัวแผ่นกระดาษ
  - โครงสร้าง (Sheet Structure)
  - ปริมาณของ Internal Sizing
  - ความชื้น (Moisture Content)
2. ชนิดและลักษณะของแป้งหรือส่วนผสมของสารที่นำมาเคลือบ
  - ความหนืด (Viscosity)
  - อุณหภูมิ (Temperature)
  - ความเข้มข้น (Solid Content)
  - ความเสถียร (Starch Stability)
3. ชนิดของ Size Press และการกำหนดสภาวะของการเดินเครื่อง
  - ความเร็ว (Operating Speed)
  - แรงกด/ความแข็งของลูกกลิ้ง (Nip Pressure/Roll Hardness)

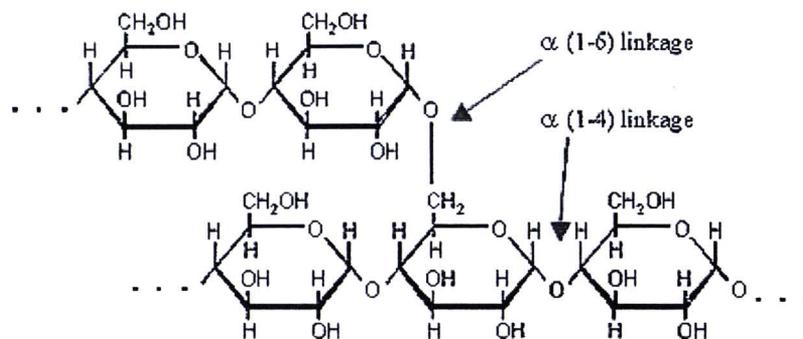
## 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและชนิดของแป้งในการฉาบ

### องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งมีหน่วย พื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง [18] โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย มีอยู่ในแป้งประมาณ 20-30% โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 8 และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้าน สาขามากมาย มีอยู่ในแป้งประมาณ 80% ของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ  $\alpha$ -1, 4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้าน หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage [19] ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของอะไมโลส [19]



รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างของอะไมโลเพคติน [19]

#### ชนิดของแป้งที่ใช้ในการเคลือบผิว [4]

แป้งที่ใช้ได้จากแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติ ได้แก่ ข้าวโพด, มันฝรั่ง, มันสำปะหลัง, ข้าว ฯลฯ และ ข้อแตกต่างระหว่างแป้งแต่ละชนิดแสดงตามตารางที่ 1

##### 1. แป้งชนิดออกซิไดส์ (Oxidized starches)

มักเตรียมโดยใช้ alkaline hypochlorite ในสารแขวนลอยแป้ง ปฏิกริยาออกซิเดชันจะทำให้ โมเลกุล แป้งเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการเติมหมู่คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลเข้าไปทำให้แป้งที่ได้ เกิดการคั่น ตัวน้อย หรือไม่เกิดการคั่นตัวเลย ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลจะถูกตัดด้วยทำให้แป้ง มีความเหนียวลดลง ภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลงมาก แป้งออกซิไดส์มีการคั่นตัวต่ำและให้สารละลายแป้งที่ใส [19]

##### 2. แป้งชนิดอีเทอร์และเอสเทอร์ (Starch ethers and esters)

ที่สำคัญที่สุดคือแป้งไฮดรอกซีเอทิลและแป้งอะซีเทต เตรียมโดยทำปฏิกริยาระหว่าง สารแขวนลอย แป้ง ในสภาพต่างกับ ethylene oxide หรือ acetic anhydride ที่ระดับการแทนที่ต่ำ (0.03-0.10) โมเลกุล แป้งไม่ถูกทำลาย ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเหนียวสูง บางครั้งถ้าต้องการให้ ความเหนียวลดลงอาจตัด แป้งต่อด้วยกรด แป้งอีเทอร์และเอสเทอร์จะให้ฟิล์มที่แข็งแรง [19]

3. แป้งที่เตรียมเองโดยใช้ (Converted starch) : เอนไซม์ (enzyme) หรือ แอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium Persulfate)

เตรียมโดยใช้เอนไซม์  $\alpha$ -amylase ย่อยแป้งสูงทำให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ดังนั้นความเหนียวจะ ลดลง และละลายได้ง่ายขึ้น มีการใช้แป้งดัดแปรนี้ในอุตสาหกรรมกระดาษ [19]



## 2.5 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง [23]

แหล่งของเอนไซม์สามารถผลิตได้จากจุลินทรีย์หลายชนิดด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง แบ่งออกได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

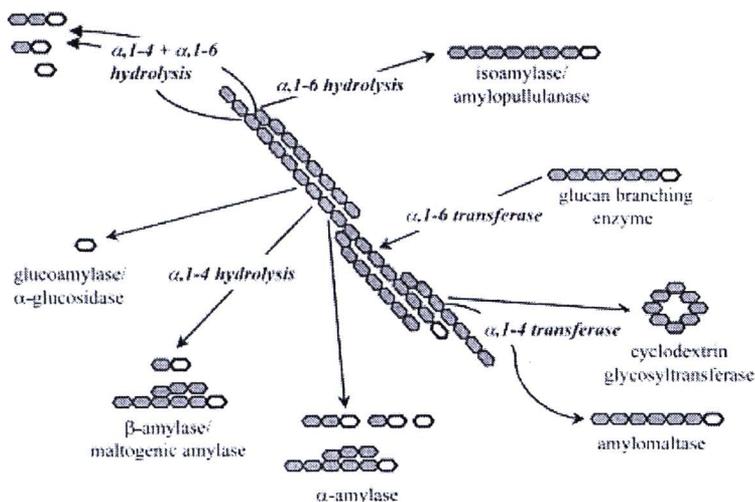
1. Endoamylase เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายในโมเลกุลของแป้ง จะตัดพันธะ  $\alpha$ -1,4 กลูโคซิดิก ระหว่างโมเลกุลกลูโคสภายในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน เอนไซม์ในกลุ่มนี้ได้แก่ แอลฟาอะไมเลส และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำงานของแอลฟาอะไมเลส คือ oligosaccharide และ  $\alpha$ -limit-dextrins

2. Exoamylase เป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะที่จับกันของกลูโคสทั้งพันธะ  $\alpha$ -1,4 และ  $\alpha$ -1,6 กลูโคซิดิก เอนไซม์ในกลุ่มนี้ได้แก่ กลูโคอะไมเลส เบต้าอะไมเลส และ แอลฟาไกลูโคซิเดส ซึ่งการทำงานจะตัดโมเลกุลกลูโคสที่ตำแหน่งปลายของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ดังนั้น ผลที่ได้จะเป็นกลูโคสเพียงอย่างเดียว เมื่อใช้กลูโคสอะไมเลส และแอลฟาไกลูโคซิเดส หรือได้มอลโตส และ  $\beta$ -limit-dextrin เมื่อใช้เบต้าอะไมเลส

3. Debranching enzyme เป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะ  $\alpha$ -1,6 กลูโคซิดิก เอนไซม์กลุ่มนี้ได้แก่ ไอโซอะไมเลส และ พูลูแลนเนส การทำงานของเอนไซม์กลุ่มนี้โดยการย่อยของพันธะกิ่งของอะไมโลเพคติน หรือการย่อยพันธะ  $\alpha$ -1,6 กลูโคซิดิก ในพูลูแลน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นโพลีแซคคาไรด์

4. Transferase เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่จับ  $\alpha$ -1,4 กลูโคซิดิก ของ donor molecule จะเปลี่ยนส่วนของ donor เพื่อเป็น glycosidic acceptor ซึ่งเป็นการสร้างพันธะกลูโคซิดิกใหม่ เอนไซม์กลุ่มนี้ได้แก่ amyloamylase และ cyclodextrin glucosyltransferase (CGTase) ซึ่งจะใช้ในการผลิตไซโคลเดกทรีน โดยการสร้างเป็น cyclic oligosaccharide ที่มีโมเลกุล 7-8 หน่วย

ตำแหน่งการตัดพันธะของเอนไซม์ทั้ง 4 กลุ่มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 [26]



รูปที่ 10 แสดงตำแหน่งการตัดพันธะของเอนไซม์ทั้ง 4 กลุ่ม [26]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่ 21	มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน	246974
เลขเรียกหนังสือ	

ตารางที่ 1 เอนไซม์ : แหล่งของจุลินทรีย์และคุณสมบัติบางประการ [23]

Microbial sources	Molecular weight	Optimum temp. (°C)
Bacillus subtilis	41,000	
B.amyloliquefaciens	49,000	70
B.licheniformis	62,000	90
B.cereus	35,000	50
B.circulans	53,000-63,000	60
Pseudomonas sp. BQ 6	37,000	45-55
Aspergillus awamori	83,700-88,000	60
A.niger I	99,000	
A.oryzae I	76,000	60
A.oryzae II	38,000	40
Penicillium oxalicum I	84,000	55-60
Rhizopus delemar	100,000	40
Aerobacter aerogenes	1,143,000	50
B.polymyxa	48,000	60
Streptomyces sp.no.280		5

## 2.6 กลไกการย่อยแป้ง (Hydrolysis ) และกระบวนการที่ใช้ในย่อยแป้ง

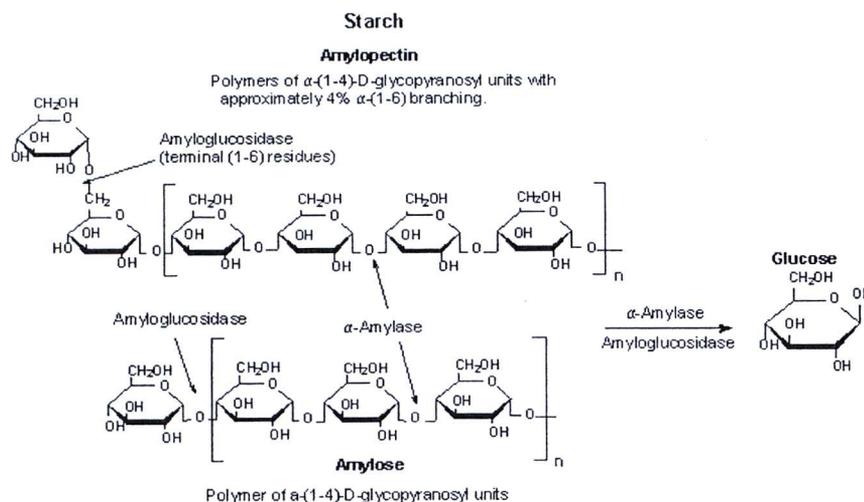
### กลไกการย่อยแป้ง

แป้งจะเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำมาผ่านกระบวนการย่อยโดยใช้ enzyme จากเชื้อจุลินทรีย์ เช่น น้ำย่อยจากเชื้อราในลูกแป้ง หรือน้ำย่อยทางการค้า เป็นต้น ในขั้นตอนการย่อยแป้งนี้ จะเป็นการทำงานของเอนไซม์เพื่อให้ได้เป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยแป้งโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ [23]

1. การเจลาติไนเซชัน ( Gelatinization ) ซึ่งเป็นขั้นตอนในการทำให้แป้งพองตัว โดยเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำขณะที่ได้รับความร้อนทำให้เม็ดแป้งพองตัว เรียกอุณหภูมิช่วงนี้ว่า อุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature)

2. การเกิดลิควิเฟกชัน (liquefaction) เป็นขั้นตอนการลดความหนืดของน้ำแป้ง โดยการย่อยจะเป็นการย่อยแบบสุ่มของสายโซ่กลูโคส เกิดการแยกเป็นสายสั้นๆ ขนาดโมเลกุลของแป้งเล็กกลงและความหนืดลดลง ขั้นตอนนี้จะใช้กรดหรือเอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะมิเลส (alpha-amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิประมาณ 95-100°C ของเหลวที่ได้จะมีค่าสมมูลเด็กโทรส (Dextrose equivalent, DE) อยู่ในช่วง 10-15% เรียกว่า มอลโตเด็กซ์ทริน (Maltodextrin) ดังรูปที่ 11

3. การเกิดแซคคาริฟิเคชัน (Saccharification) เป็นขั้นตอนการย่อยแป้งเป็นโมเลกุลของน้ำตาล ภายหลังการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว น้ำตาลโมเลกุลคู่ หรือน้ำตาลที่มีโมเลกุลมากกว่า สารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งควรมีสสมมูลเด็กโทรส (Dextrose equivalent, DE) สูง ยีสต์จึงจะทำงานได้ดี ขั้นตอนนี้จะใช้ เอนไซม์กลูโคอะมิเลส (glucoamylase) เข้าไปย่อยให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว น้ำย่อยสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 60°C เมื่อสิ้นสุดการย่อยจะให้ความร้อนเพื่อหยุดกิจกรรม เอนไซม์และฆ่าเชื้อที่อาจปนเปื้อนก่อนที่จะเข้ากระบวนการหมักยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์เมื่ออยู่ในสภาพปราศจากอากาศ (หรือมีอากาศจำกัด)



รูปที่ 11 แสดงกลไกการย่อยแป้งในขั้นตอนลิควิเฟกชัน [26]

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบ่งแต่ละชนิด [4]

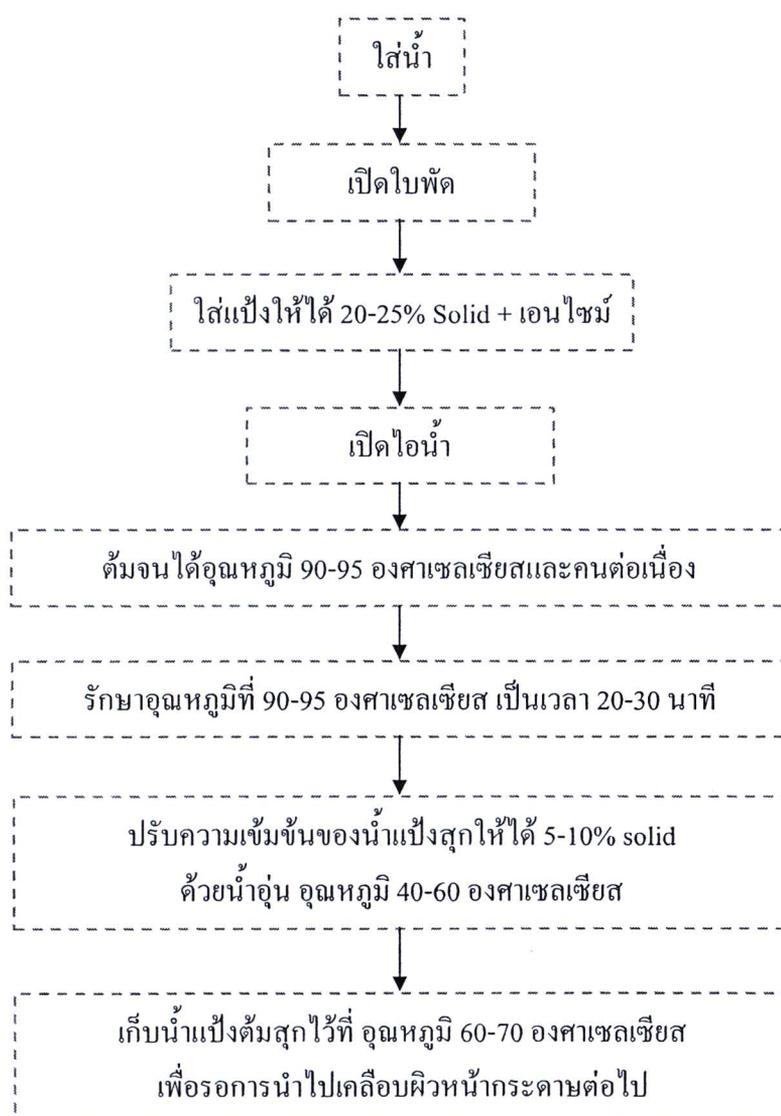
ชนิดแบ่ง	ข้อดี	ข้อเสีย
แบ่งอ็อกซิไดส์	<ul style="list-style-type: none"> <li>-แบ่งไม่เกิดการคืบตัว</li> <li>-กากน้อย</li> <li>-เพิ่มความแข็งแรงของกระดาษได้มาก</li> <li>-การซึมผ่านกระดาษดี</li> <li>-สร้างตัวเป็นฟิล์มที่ผิวหน้ากระดาษได้ดี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ราคาปานกลาง</li> <li>-กระจายตัวอยู่ในช่วง wet end ชัดขวาง filler</li> <li>-ค่า BOD ในระบบสูง</li> <li>-ทำให้ความทึบแสงของกระดาษลดลง</li> </ul>
แบ่งอีเธอร์และเอสเทอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>-สร้างตัวเป็นฟิล์มที่ผิวหน้ากระดาษได้ดี (ช่วยให้ความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษดีกว่าการใช้แบ่งอ็อกซิไดส์)</li> <li>-ไม่มีประจุ</li> <li>-แบ่งไม่เกิดการคืบตัว</li> <li>-ไม่กระจายใน wet end</li> <li>-กากน้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ราคาสูง</li> <li>-ค่า BOD ในระบบสูง</li> </ul>
แบ่งที่เตรียมเอง	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ราคาต่ำ</li> <li>-สามารถตัดพันธะของแบ่งได้ตามความต้องการด้วยการลดความหนืด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-กากมากเนื่องจากการแปรรูปโดยใช้เอนไซม์</li> <li>-มีแนวโน้มที่แบ่งจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาล</li> </ul>

### กระบวนการย่อยแบ่งครั้งแรก (Liquefaction) [4]

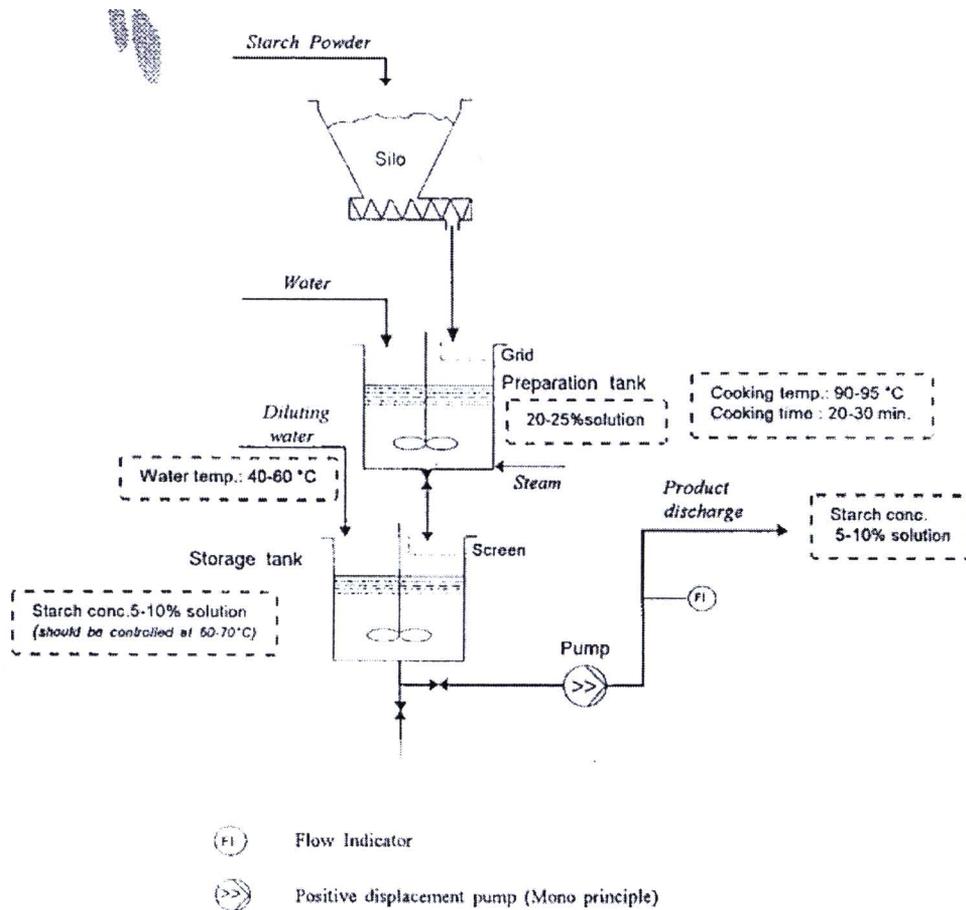
กระบวนการย่อยแบ่งเป็นกระบวนการเตรียมแบ่งเพื่อใช้ในการฉาบผิวกระดาด กระบวนการย่อยแบ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันนิยมใช้การต้มโดยใช้เอนไซม์ มี 2 ระบบ ดังต่อไปนี้

#### 1. ระบบการย่อยแบ่งแบบกะ (Batch Cooking System)

กระบวนการย่อยแบ่งแบบกะเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ตั้งแต่ยุคแรกๆ ในการผลิตกระดาด ขั้นตอนการย่อยแสดงดังรูปที่ 12 และ ระบบการเตรียมดังรูปที่ 13 ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยแบ่ง จะเกิดจากไอน้ำร้อน ไอน้ำร้อนจะค่อยๆปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยขึ้นจากอุณหภูมิปกติเป็นอุณหภูมิที่กำหนด



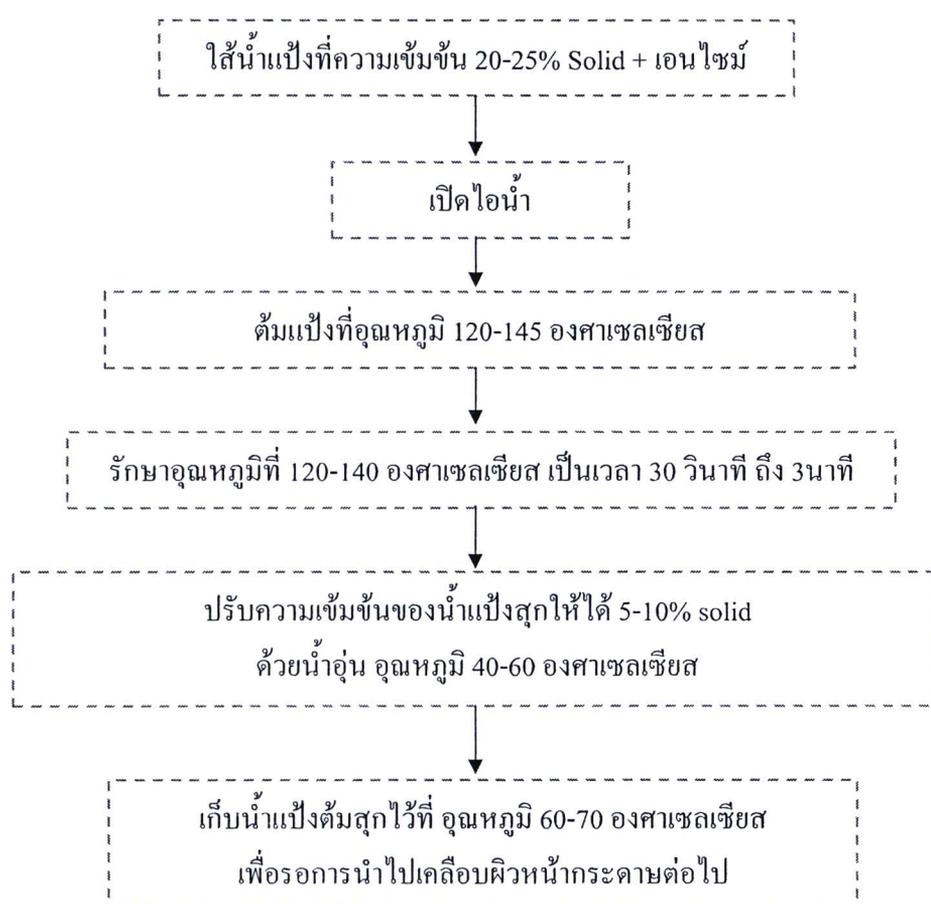
รูปที่ 12 แสดงขั้นตอนการย่อยแบ่งแบบกะ [4]



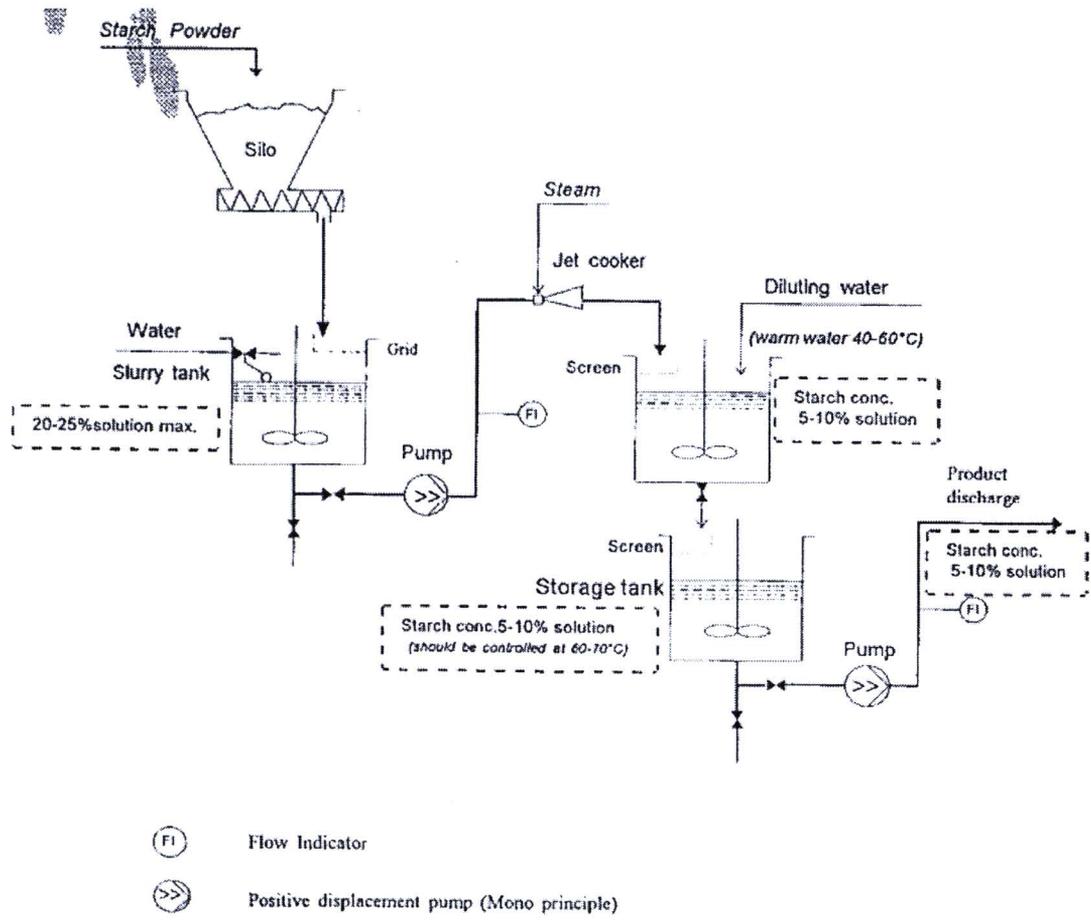
รูปที่ 13 การเตรียมแป้งโดยใช้ระบบการย่อยแบบกะ [4]

## 2. ระบบการย่อยแป้งแบบต่อเนื่อง (Jet Cooking System)

ระบบการย่อยแป้งแบบต่อเนื่องเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพของน้ำแป้งได้ดีกว่า ใช้อุณหภูมิในการย่อยที่คงที่ไม่ต้องปรับอุณหภูมิขึ้นจากอุณหภูมิปกติ ขั้นตอนการย่อยแสดงดังรูปที่ 14 และ การเตรียมการย่อยแบบต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 15 แต่ระบบนี้มีข้อจำกัดคือต้องใช้ปริมาณน้ำแป้งในการอบอย่างต่อเนื่อง โรงงานเล็กๆจึงไม่เหมาะที่จะใช้



รูปที่ 14 แสดงขั้นตอนการย่อยแป้งแบบต่อเนื่อง [4]



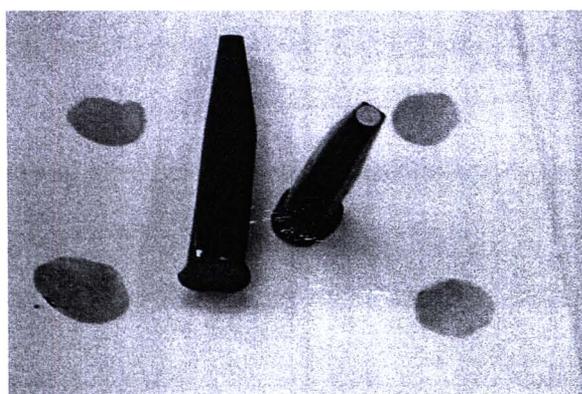
รูปที่ 15 การเตรียมแป้งโดยใช้ระบบการย่อยแบบต่อเนื่อง [4]

## 2.6 ความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษ ( Surface Strength)

ความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษมีความสำคัญมากกับกระดาษที่นำไปใช้ในงานพิมพ์ เนื่องจากการลงหมึกในระหว่างการพิมพ์จะมีทั้งแรงกดและแรงดึงที่ผิวหน้ากระดาษ ซึ่งขนาดของแรงดึงจะขึ้นกับ tackiness ของหมึก และความเร็วของการพิมพ์ ถ้าผิวหน้ากระดาษไม่มีความแข็งแรง จะทำให้เกิดการลอกของผิวขึ้น โดยการทดสอบความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษในปัจจุบันนั้นนิยมใช้ [2] ได้แก่

1.wax pick เป็นการใช้ซี่ผึ้งเบอร์ต่างๆ ที่มีความพลังในการติดต่างกันติดลงไปทีกระดาษประมาณ 15 นาทีและดึงออก ยิ่งซี่ผึ้งเบอร์สูง แรงการติดก็จะมาก โดยซี่ผึ้งที่ใช้ในการทดสอบจะมีตั้งแต่เบอร์ 2 จนถึงเบอร์ 26 การทดสอบแบบนี้ใช้การแพร่หลาย แต่ยังไม่มีความสัมพันธ์กับแรงกดและดึงจากการพิมพ์มากนัก แสดงดังรูปที่ 16

2.IGT printability tester, LTF Picking test, the Hurcules-Brookfield print tester, The waldon pick tester เป็นการจำลองการพิมพ์ การป้อนหมึก แรงกด และแรงดึง จากการพิมพ์ในโรงพิมพ์ วิธีนี้จึงเป็นที่นิยมมากกว่า wax pick แสดงดังรูปที่ 17



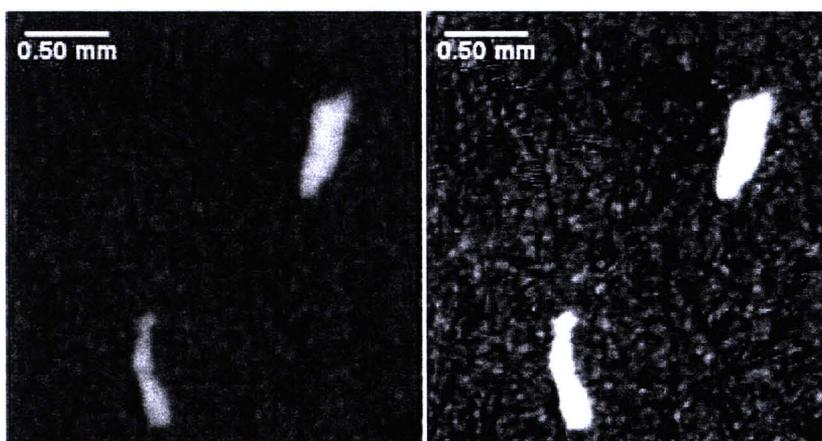
รูปที่ 16 wax pick test [2]



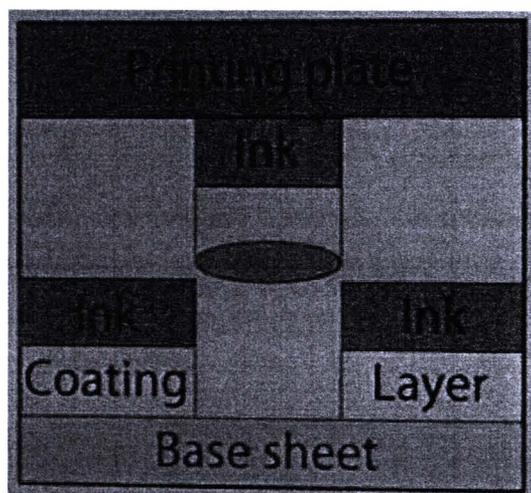
รูปที่ 17 IGT Tester [2]

## 2.7 ปัญหาการถอนผิว picking

Picking เป็นปัญหาการถอนผิวที่เกิดจากแรงดึงในขั้นตอนการพิมพ์ โดยส่วนที่ถูกดึงออกมาจะเป็นท่อลำเลียงน้ำของพีชที่นำมาทำเยื่อกระดาษ การถอนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรูปลิ่มเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 18 และรูปที่ 19 จะแสดงลักษณะการถอนในแนวภาพตัดขวาง ซึ่งจะเห็นว่า การถอนจะเกิดในช่วงรอยต่อระหว่างชั้นของน้ำยาเคลือบผิวกับผิวหน้ากระดาษ และแรงในการดึงผิวหน้ากระดาษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนืดของหมึกที่ใช้ในการพิมพ์ การป้องกันการเกิดปัญหานี้จึงเป็นการทำให้ผิวหน้ากระดาษมีความแข็งแรงมากที่สุด การทดสอบความแข็งแรงของผิวหน้าเพื่อป้องกันการปัญหา picking ส่วนมากจะใช้วิธีตาม TAPPI T459 [8]



รูปที่ 18 แสดงภาพปัญหา picking ที่เกิดบนผิวหน้ากระดาษ [8]



รูปที่ 19 แสดงลักษณะการถอนผิวกระดาษด้วยภาพตัดขวาง [8]