



## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

#### 2.1.1 กระบวนการผลิตกระดาษ

ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ มีขั้นตอนหลักๆ อยู่ 3 ขั้นตอน [1, 2] คือ

1. ขั้นตอนการเตรียมเยื่อ
2. ขั้นตอนการผลิตกระดาษ
3. ขั้นตอนการแปรรูป

##### 2.1.1.1 ขั้นตอนการเตรียมเยื่อ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ มีการใช้วัตถุดิบหลากหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นประเภทหลัก ๆ 2 ประเภท คือ วัตถุดิบประเภทไม้ (Wood) และวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wood)

##### - วัตถุดิบประเภทไม้ (Wood)

จะแบ่งตามลักษณะของเส้นใย ได้ 2 แบบ คือเยื่อใยยาว (Long-fiber Pulp) ซึ่งเป็นเยื่อที่มีเส้นใยยาวประมาณ 3 – 5 มิลลิเมตร ทำจากไม้เนื้ออ่อน (Softwood) ส่วนใหญ่เป็นไม้ประเภทสน (Cone – bearing Tree) เช่น สนสองใบ สนสามใบ เส้นใยที่ได้จะมีความเหนียวแข็งแรงมาก และเยื่อใยสั้น (Short-fiber Pulp) ซึ่งจะให้เส้นใยที่สั้นกว่า คือ ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร จะมีความเหนียวและความแข็งแรงต่ำกว่าเยื่อใยยาว เยื่อใยสั้นจะได้จากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ส่วนใหญ่เป็นไม้ผลัดใบ (Deciduous Tree) เช่น ยูคาลิปตัส

##### - วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wood)

หมายถึงเส้นใยที่ได้จากพืชชนิดอื่นๆ หรือวัตถุดิบที่ไม่ใช่เนื้อไม้ ได้แก่ ขานอ้อย ปอแก้ว ฟางข้าว ไม้ไผ่ เป็นต้น

### 2.1.1.1.1 องค์ประกอบของไม้

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของไม้และมีผลต่อสมบัติของกระดาษคือ

1. เซลลูโลส (Cellulose) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเส้นใยและให้ความแข็งแรง
2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเส้นใย มีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อยู่ล้อมรอบเซลลูโลสและเชื่อมต่อกับเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนและให้ความแข็งแรงกับเส้นใย
3. ลิกนิน (Lignin) ทำหน้าที่เป็นสารยึดและให้ความแข็งแรงกับเนื้อเยื่อ (Tissue) ของไม้ ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จะต้องกำจัดลิกนินออกไป เนื่องจากเป็นสาเหตุทำให้กระดาษมีสีคล้ำ และเยื่อมีความแข็งแรงต่ำ

### 2.1.1.1.2 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

การสกัดเยื่อจากไม้ หรือวัตถุดิบประเภทอื่น ๆ สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. กระบวนการทางกล (Mechanical Pulping) โดยการบดเนื้อไม้ด้วยลูกกลิ้ง (Grinder or Grinding Stone) ขนาดใหญ่ ผลผลิตที่ได้ (Yield) สูง เนื่องจากลิกนินถูกสกัดออกไปน้อยมาก เยื่อที่ได้จึงมีความแข็งแรงต่ำ เหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษคุณภาพต่ำ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์
2. กระบวนการทางเคมี (Chemical Pulping) เป็นกระบวนการสกัดเยื่อด้วยสารเคมี เพื่อแยกเซลลูโลสออกมาให้มากที่สุด หรืออีกนัยหนึ่งเพื่อสกัดเอาลิกนินออกไปให้มากที่สุด บางกรณีจะสกัดเฮมิเซลลูโลสออกไปด้วย เยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง ผลผลิตที่ได้ต่ำ เนื่องจากลิกนินส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไป เหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษคุณภาพดี แต่ต้นทุนดำเนินการสูง สารเคมีที่ใช้สกัดเยื่อจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับกระบวนการ เช่น กระบวนการโซดา (Soda Process) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) กระบวนการซัลเฟต (Sulphate Process) จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide, Na<sub>2</sub>S) กระบวนการนี้บางครั้งเรียก กระบวนการคราฟท์ (Kraft Process) เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความแข็งแรงที่สุด ส่วนกระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite Process) จะใช้สารพวกไบซัลไฟต์ (Bisulphite) และหรือกรดซัลฟิวรัส (Sulphurous acid)

3. กระบวนการกึ่งเคมี (Semi – Chemical Pulping) เป็นกระบวนการ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการใช้สารเคมีเพื่อทำให้สารที่ยืดเส้นใยอ่อนตัวลง ทำให้สามารถสกัดเยื่อออกมาง่ายขึ้นและใช้พลังงานน้อยลง ขั้นตอนที่ 2 เป็นการบดเนื้อไม้หรือวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ผ่านการแช่สารเคมีมาแล้วเพื่อสกัดเยื่อออกมา เยื่อที่ได้จากวิธีนี้จะมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อที่สกัดโดยกระบวนการทางกล แต่ก็แข็งแรงน้อยกว่าเยื่อที่สกัดด้วยกระบวนการทางเคมี ผลผลิตที่ได้ต่ำกว่ากระบวนการทางกล เนื่องจากลิกนินบางส่วนถูกกำจัดออกไป

### 2.1.1.2 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือวัตถุดิบที่เป็นเส้นใย และวัตถุดิบที่ไม่ใช่เส้นใย

#### 1. วัตถุดิบที่เป็นเส้นใย

วัตถุดิบที่เป็นเส้นใย ได้แก่ เยื่อชนิดต่าง ๆ เช่น เยื่อเคมี เยื่อเชิงกล เยื่อกึ่งเคมี และเยื่อรีไซเคิลซึ่งทำจากเศษกระดาษ ซึ่งกระดาษแต่ละชนิดต้องการวัตถุดิบที่แตกต่างกัน หากต้องการกระดาษที่มีความแข็งแรงมากจะใช้เยื่อเคมีใญาวมาก หากต้องการกระดาษพิมพ์เขียน คุณภาพดีที่มีเนื้อละเอียดจะใช้เยื่อเคมีใญ่สั้นมาก ส่วนเยื่อจากเศษกระดาษนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษแข็งและกระดาษทำลอนลูกฟูก เนื่องจากมีความแข็งแรงต่ำลงจากการผลิตหลายครั้งและค่อนข้างสกปรก

#### 2. วัตถุดิบที่ไม่ใช่เส้นใย

การใช้วัตถุดิบที่ไม่ใช่เส้นใยในการผลิต สามารถแบ่งออกได้เป็นสารเติมแต่งหลัก และสารเติมแต่งเสริม ดังนี้

2.1 สารเติมแต่งหลัก เป็นสารที่ทำให้กระดาษมีสมบัติเฉพาะอย่างตามที่ต้องการ เช่น

- สารด้านการซึมน้ำ (Sizing Agent) ทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานการซึมน้ำผ่านของของเหลว เช่น โรซิน (Rosin), AKD, ASA เป็นต้น

- ตัวเติม (Filler) ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ วัตถุประสงค์ของการใช้สารนี้เพื่อเพิ่มปริมาณทำให้ได้กระดาษมากขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังใช้เพื่อเพิ่มความ

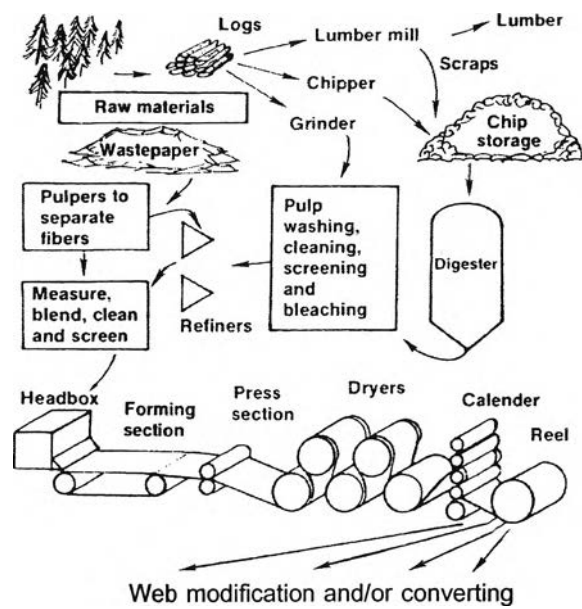
ขาว ความเรียบของกระดาษ และการดูดซับหมึกพิมพ์ สารที่นิยมใช้ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไชน่าเคลย์หรือคาโอลิน (China Clay or Kaolin) เป็นต้น

- สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Dry Strength Agent) สารนี้ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting Strength) และความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (Tear Strength) เป็นต้น สารที่ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ได้แก่ แป้ง กัมจากพืช (Vegetable Gum) ยาง และเรซินสังเคราะห์

นอกจากนี้ยังมี สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียก สีย้อม และสารเพิ่มความขาวสว่าง เป็นต้น

2.2 สารเติมแต่งเสริม สารในกลุ่มนี้ จะช่วยให้การทำงานของเครื่องจักรดีขึ้น สภาพคล่องของการผลิตดีขึ้น และยังช่วยให้เครื่องจักรสะอาดขึ้นอีกด้วย ได้แก่ สารเพิ่มการตกค้าง สารต้านการเกิดฟอง สารควบคุมจุลชีวะ (Biocide) สารช่วยกระจายตัว

ในขั้นตอนการผลิตกระดาษ เยื่อที่ได้จากกระบวนการเตรียมเยื่อจะถูกนำมาตีกระจาย ในน้ำและผสมกับสารเติมแต่งต่างๆ หลังจากนั้นจึงนำมาตีบดเยื่อ (Beating) เพื่อปรับปรุงผนังของเส้นใยให้อ่อนนุ่มและสามารถสร้างพันธะได้ดีขึ้น จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษโดยการระบายน้ำผ่านตะแกรง แล้วจึงถูกส่งไปกดรีดน้ำ (Pressing) โดยใช้สั๊กหลาด (Felt) แล้วจึงนำไปอบแห้งด้วยลูกกลิ้งผิวโลหะร้อน (Cylinder Dryers) โดยความชื้นสุดท้ายของกระดาษควรมีค่าประมาณร้อยละ 4-8 กระดาษที่จะนำไปทำแท่งนี้อาจมีการเคลือบสารต้านการซีมน้ำจําพวกน้ำแป้งที่ผิวหน้าก่อนด้วย จากนั้นกระดาษที่แห้งแล้วอาจมีการนำไปขัดผิว (Calendering) ก่อนเข้าม้วน และหากต้องการกระดาษเคลือบผิว ก็อาจมีการนำกระดาษไปเคลือบผิวต่อด้วยสารเคลือบ (Coating Color) แล้วจึงมีการขัดมัน (Supercalender) ซึ่งกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ [2]

### 2.1.1.3 ขั้นตอนการแปรรูป

การแปรรูปกระดาษจะมีอยู่ 2 แบบ คือ

- การแปรรูปเป็นกระดาษแผ่น : จะนำม้วน Jumbo Roll ขึ้นเครื่อง Cutter เพื่อตัดกระดาษให้เป็นแผ่น ตามขนาดที่ต้องการ
- การแปรรูปเป็นกระดาษม้วน : กระดาษ Jumbo Roll จะถูกนำขึ้นเครื่อง Slitter เพื่อกรอเป็นม้วนกระดาษใหม่ ให้ได้หน้ากว้างและเส้นผ่าศูนย์กลางตามขนาดที่ต้องการ

### 2.1.2 กระดาษกล่องลูกฟูก (Corrugated Board)

กระดาษกล่องลูกฟูก (Corrugated Board) ประกอบด้วย กระดาษผิวกล่อง (Liner Board) และกระดาษลอนลูกฟูก (Corrugating Medium) [2, 3]

#### 2.1.2.1 กระดาษผิวกล่อง (Liner Board)

เป็นกระดาษที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษอยู่ในช่วง 125-350 กรัมต่อตารางเมตร ใช้ประกอบอยู่ที่ด้านบนและล่างของลอนลูกฟูก (Flute) กระดาษผิวกล่องประกอบด้วย 2 ชั้น คือ ชั้นผิวบน (Top Ply) และชั้นฐาน (Base Ply) ในการผลิตกระดาษผิวกล่องจะใช้เยื่อ 2 ประเภท คือ

- เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin Pulp) ได้แก่ เยื่อไผ่ยาว (Softwood Pulp) บางกรณีจะใช้เยื่อไผ่สั้น (Hardwood Pulp)

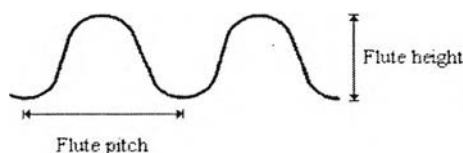
- เยื่อรีไซเคิล (Recycled Pulp) ได้แก่ เศษกระดาษ กระดาษกล่องลูกฟูกเก่า (Old Corrugated Container; OCC)

ในการผลิตกระดาษผิวกล่อง เยื่อที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่นิยมใช้เยื่อบริสุทธิ์ โดยมีการใช้เยื่อไผ่ยาวเป็นส่วนประกอบหลักเรียกว่า Kraftliner แต่ถ้าหากมีเยื่อไผ่สั้นหรือเยื่อรีไซเคิลผสมอยู่จะเรียกว่า Testliner โดยจะผสมอยู่ประมาณร้อยละ 20 เนื่องจากบริเวณผิวกล่องต้องการความแข็งแรงสูงสำหรับการใช้งานต่อไป

สมบัติด้านความแข็งแรงที่จำเป็นของกระดาษผิวกล่อง ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst Strength) และความแข็งแรงต่อแรงกดในแนวขวางเครื่อง (Cross Machine Directional Compression Strength)

#### 2.1.2.2 กระดาษลอนลูกฟูก (Flute หรือ Corrugating Medium)

เป็นกระดาษที่นำมาทำให้เป็นคลื่นลอน ดังภาพที่ 2.2 อยู่ระหว่างกระดาษผิวกล่อง 2 ชั้น โดยมีน้ำหนักมาตรฐานอยู่ในช่วง 112-180 กรัมต่อตารางเมตร กระดาษลอนลูกฟูกมีหลายแบบแต่ที่นิยมใช้กันมากจะมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ คือ A, C, B และ E ซึ่งมีความแตกต่างกันทางด้านความสูงและความกว้างของลอน ดังตารางที่ 2.1 โดย แบบ A จะมีขนาดใหญ่ที่สุด และแบบ E มีขนาดเล็กที่สุด โดยแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมกับการใช้งานแตกต่างกันไป เช่น ลอนชนิด E เหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษที่สามารถนำไปพิมพ์ได้เนื่องจากสามารถรับแรงกดในการพิมพ์ได้ดีที่สุด



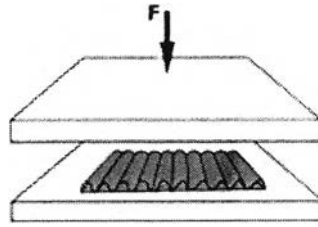
ภาพที่ 2.2 ลักษณะลอนกระดาษลูกฟูก [4]

**ตารางที่ 2.1 ความสูงและความกว้างของลอนแต่ละชนิด [2]**

ชนิดลอน	จำนวน ลูกฟูก	จำนวน ลอน/เมตร	ความสูงของ ลอน(มิลลิเมตร)	การใช้งาน
A	118		4.76	มีความหนามากที่สุด สามารถรับน้ำหนักของการเรียงซ้อนกันได้สูง
C	168		2.38	เหมาะสำหรับใช้กับกล่องซึ่งต้องรับแรงกระแทกสูง ใช้ในการขนย้าย
B	128-138		3.57	เป็นลอนซึ่งมีความหนาเล็กลงมาจากลอน C ลอนประเภทนี้จะทำให้กล่องมีความแข็งแรง แต่การดูดซับแรงกระแทกจะน้อยกว่าลอน C
E	316		1.19	เหมาะสำหรับใช้กับการทำกล่องขนาดเล็กและกล่องพิมพ์สี ซึ่งเป็นกล่องสำหรับใช้บรรจุสินค้าประเภทเน้นความสวยงามของกล่อง เช่น กล่องของเล่นสำหรับเด็ก กล่องจำพวกใส่เครื่องใช้ไฟฟ้า ฯลฯ

ในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูกนิยมใช้เยื่อ 2 ประเภท คือ เยื่อกึ่งเคมี (Semichemical Pulp) และเยื่อรีไซเคิล โดยปกติลอนลูกฟูกจะถูกเรียกว่า Corrugating Medium แต่ถ้าหากมีการใช้เยื่อกึ่งเคมีเพียงชนิดเดียวจะเรียกลอนที่ได้ว่า Fluting แต่ส่วนใหญ่แล้วในการผลิตลอนลูกฟูกจะนิยมใช้เยื่อรีไซเคิลในการผลิตมากกว่า แต่เนื่องจากเยื่อที่ใช้มีคุณภาพต่ำมาก ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ เพื่อให้กระดาษมีสมบัติด้านความแข็งแรงที่ดีขึ้น

สมบัติด้านความแข็งแรงที่สำคัญต่อกระดาษลอนลูกฟูก คือ ความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Compression Strength of Corrugating Medium) จะเป็นการวัดแรงกดลอนลูกฟูกที่สูงสุดที่สามารถทำให้ลอนลูกฟูกคงสภาพอยู่ได้ โดยจะมีการตีดเทพกาวบริเวณปลายด้านหนึ่งของลอน จากนั้นจึงให้แรงกดลอนลงมาทางด้านบน ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงออกมาเป็นค่านิวตัน



ภาพที่ 2.3 การวัดความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก [5]

ในการผลิตกระดาษกล่องลูกฟูก กระดาษจะถูกนำเข้าไปยังกระบวนการผลิตกระดาษลูกฟูก โดยลอนลูกฟูกจะติดกับกระดาษผิวกล่องด้วยกาว ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งกระดาษกล่องลูกฟูกมีอยู่ 4 ประเภท ดังภาพที่ 2.5 คือ

1. กระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (Single-Faced)

เป็นกระดาษแผ่นลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษผิวกล่อง 1 ด้านและลอนลูกฟูก

2. กระดาษลูกฟูก 3 ชั้น (Single-Wall)

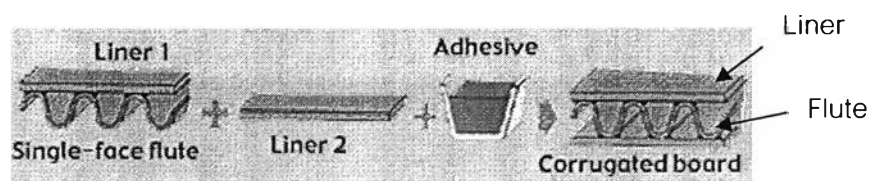
เป็นกระดาษแผ่นลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษผิวกล่องทั้งด้านหน้าและหลัง ตรงกลางเป็นลอนลูกฟูก ซึ่งลอนลูกฟูกดังกล่าวขึ้นอยู่กับการใช้งานที่ผู้ใช้งานต้องการ อาจเป็นลอน B, C หรือลอน A ก็ได้

3. กระดาษลูกฟูก 5 ชั้น (Double-Wall)

เป็นกระดาษแผ่นลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษผิวกล่อง 3 แผ่นและลอนลูกฟูกอีก 2 ชั้น โดยทั่วไปจะผลิตเพื่อใช้กับกล่องลูกฟูกที่ต้องการการรับน้ำหนักสูงซึ่งลอนที่ใช้มักเป็นลอน B และลอน C เป็นหลัก

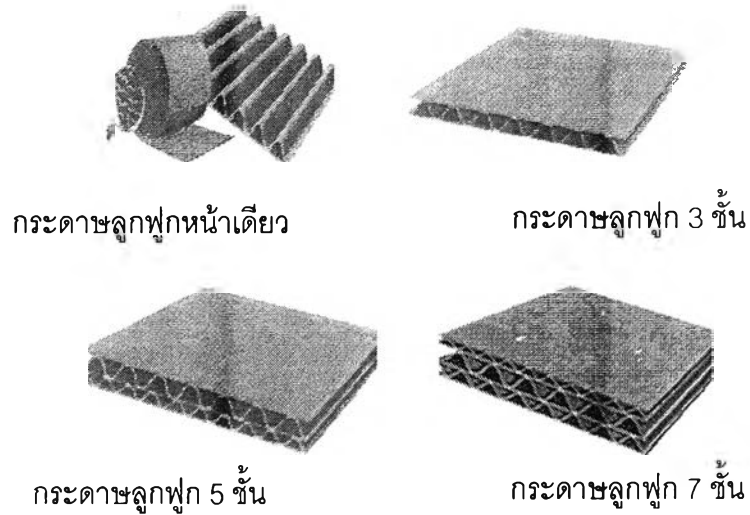
4. กระดาษลูกฟูก 7 ชั้น (Triple-Wall)

เป็นกระดาษลูกฟูกที่ผลิตเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมหนัก ที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกเป็นปริมาณมาก เช่น เครื่องจักรในอุตสาหกรรม ประกอบด้วยกระดาษแผ่นเรียบ 4 ชั้นและลอนลูกฟูกอีก 3 ชั้น



ภาพที่ 2.4 กระบวนการผลิตกระดาษกล่องลูกฟูก [6]





ภาพที่ 2.5 ประเภทของกระดาษกล่องลูกฟูก [7]

### 2.1.3 แป้งมันสำปะหลัง

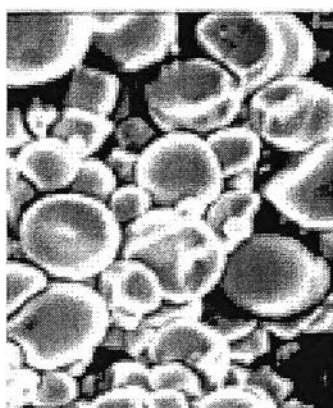
มันสำปะหลังกล่าวได้ว่าเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ จัดเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยชนิดหนึ่ง นิยมปลูกมากทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงผลผลิตมันสำปะหลังที่ปลูกได้ตามภาคต่างๆ ของประเทศไทย เพื่อนำมาผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลัง มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี และสะดวกในการดูแลรักษา มันสำปะหลังมีชื่อภาษาอังกฤษ คือ cassava มีชื่อภาษาอื่นๆ เช่น Mandioca Yucca และ Manioc ในทางพฤกษศาสตร์มันสำปะหลังเป็นพืชในวงศ์ (class) โบเลี้ยงคู่ (Dicotyledoneae) ตระกูล (family) Euphobiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz.[8] องค์ประกอบของมันสำปะหลังประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 69.8 แป้งร้อยละ 22 น้ำตาลร้อยละ 5.1 โปรตีนร้อยละ 1.1 ไขมันร้อยละ 0.4 เส้นใยร้อยละ 1.1 และ เถ้าร้อยละ 0.5 [9]

**ตารางที่ 2.2** ผลผลิตมันสำปะหลังที่จากภาคต่างๆ ของประเทศไทย [10]

Region/ Province	Plant Area(1,000 rai)			Productivity/rai(ton)			Productivity(ton)		
	2006/2007	2007/2008	% (+ -)	2006/2007	2007/2008	% (+ -)	2006/2007	2007/2008	% (+ -)
Total All Region	7,201,243	7,302,960	1.41	3.668	3.782	3.11	26,411,233	27,618,736	4.57
Northern	1,057,593	1,084,509	2.55	3.615	3.774	4.40	3,822,862	4,092,916	7.06
Northeast	3,961,165	4,026,150	1.64	3.607	3.701	2.59	14,286,484	14,898,818	4.29
Central	2,182,485	2,192,301	0.45	3.804	3.935	3.45	8,301,886	8,627,029	3.92

### 2.1.3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

แป้ง เป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่ละลายในน้ำเย็น ลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง มีรูปร่าง กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด ดังภาพที่ 2.6 เม็ดแป้งมีขนาด 5-35 ไมครอน ซึ่งมีขนาดปานกลางเมื่อเทียบกับแป้งอุตสาหกรรมทั่วไป [8] แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมี คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของหน่วยกลูโคส ที่เกิดจากการต่อกันเป็นสายของหน่วยกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือที่เรียกว่าพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic Linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde Group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (Reducing End Group) ซึ่งโครงสร้างของแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ อะมิโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะมิโลเพกตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง โดยโครงสร้างและสมบัติที่ต่างกันของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3



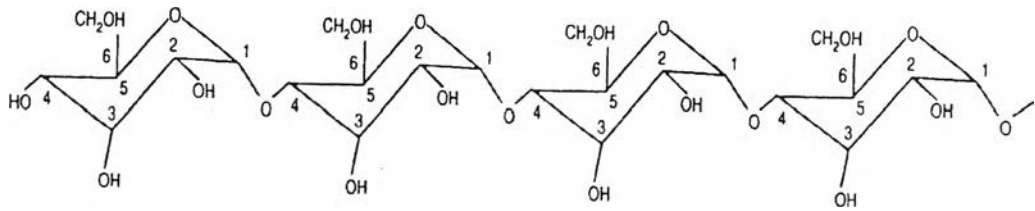
**ภาพที่ 2.6** ลักษณะเม็ดแป้งมันสำปะหลัง [11]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน [8]

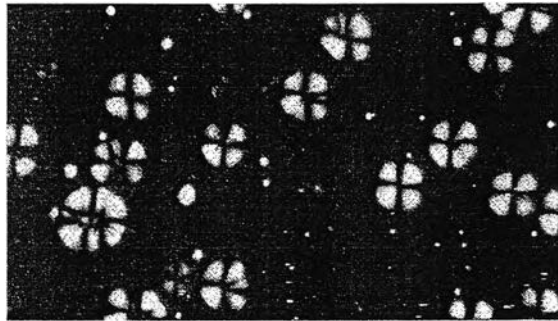
สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกติน
1. ลักษณะโครงสร้าง	โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรง	โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นกิ่งก้าน
2. พันธะที่จับ	$\alpha$ -1,4	$\alpha$ -1,4 และ $\alpha$ -1,6
3. ขนาด	200 – 2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
4. การละลาย	ละลายน้ำได้ดี	ละลายน้ำได้น้อย
5. การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีม่วงแดง
6. การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนและทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	เมื่อให้ความร้อนและทิ้งไว้จะไม่จับตัวเป็นวุ้น

#### 2.1.3.1.1 อะมิโลส (Amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear Polymer) ของหน่วยย่อยดี-กลูโคส (D-Glucose) ซึ่งมีหน่วยกลูโคส (Anhydroglucose Unit : AGU) อยู่ประมาณ 200 – 2,000 หน่วย เชื่อมกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคซิดิก ( $\alpha$ -1,4-Glucosidic Linkage) มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2.7 เมื่อส่องโดยใช้แสงโพลาไรซ์ (Polarized Light) จะพบว่าอะมิโลสมีลักษณะเป็นวงแหวนดังภาพที่ 2.8 [12] โดยในแป้งมันสำปะหลังจะมีปริมาณอะมิโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 17 [13,14] เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่โมเลกุลอะมิโลสจะละลายออกมาจากเม็ดแป้ง ทำให้แป้งเปียกที่ได้มีความหนืดต่ำ เมื่อแป้งเย็นตัวลงแป้งจะเกิดการคืนตัวโดยโมเลกุลอะมิโลสจะเกิดการรวมตัวกัน ในกรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งน้อย การรวมตัวกันของอะมิโลสจะทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitate) แต่ถ้าหากสารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งสูง การรวมตัวกันของอะมิโลสจะทำให้เกิดเป็นเจล (Gel) [15]



ภาพที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของอะมิโลส [12]



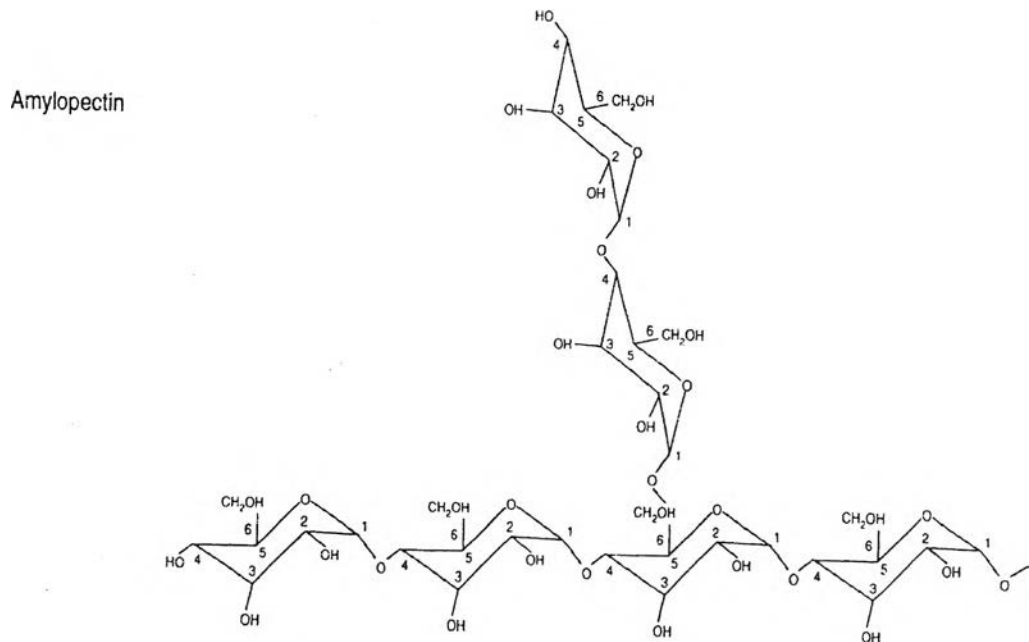
ภาพที่ 2.8 ลักษณะของอะมิโลสภายใต้แสงโพลาไรซ์ [12]

#### 2.1.3.1.2 อะมิโลเพกทิน (Amylopectin)

แป้งมันสำปะหลังมีอะมิโลเพกทินประมาณร้อยละ 83 [13,14] มีลักษณะโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่ประกอบด้วย พอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคสซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคซิดิก ( $\alpha$ -1,4-Glycosidic Linkage) และกิ่งที่แยกออกซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6-กลูโคซิดิก ( $\alpha$ -1,6-Glycosidic Linkage) ซึ่งจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด โดยแต่ละกิ่งมีกลูโคส 20 – 25 หน่วย ดังภาพที่ 2.9 อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^8$  ดาลตัน เมื่อต้มในน้ำ แป้งจะมีความหนืดสูงและมีลักษณะใส ไม่มีสี เนื่องจากอะมิโลเพกทินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ และมีกิ่งก้านสาขามาก ดังนั้นโมเลกุลจึงสามารถรวมกันได้น้อยลง และเมื่อต้มแล้วทิ้งไว้พบว่าไม่สามารถจับตัวเป็นเจลได้ เนื่องจากโมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวระเกะระกะจึงรวมตัวกันยากและมีอัตราการคืนตัวต่ำ

ภายในเม็ดแป้งจะมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะมีการจัดเรียงตัวในเม็ดแป้ง 2 แบบ คือโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก

(Crystalline) เป็นส่วนที่โมเลกุลจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มๆ อย่างมีระเบียบ ประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสเป็นส่วนใหญ่ การดูดน้ำและการพองตัวจะเกิดอย่างจำกัด และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous หรือ Gel Phase) คือส่วนที่โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลเพกทินเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีโครงสร้างที่ระเกะระกะ มีการดูดน้ำได้ดีและไวต่อการเกิดปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [12]

### 2.1.3.2 คุณสมบัติของแป้ง

#### 2.1.3.2.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย [8,12,15]

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของบรรยากาศ เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีความชื้นร้อยละ 10 ถึง 17 เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติที่อยู่ในเม็ดแป้งมี 3 แบบ และจะมีแรงในการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ ดังนี้ น้ำในผลึกน้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound Water) และน้ำในรูปอิสระ (Free Water)

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนอุณหภูมิของน้ำแป้งสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่เชื่อมต่อกันจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ซึ่งความสามารถในการละลายของแป้งจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรทางเคมี

การพองตัวของเม็ดแป้งจะเกิดเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพันธะไฮโดรเจน นั่นคือขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลในเม็ดแป้งที่เป็นส่วนผลึก และอสัณฐาน โดยในการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน จะเริ่มจากการพองตัวของส่วนที่เป็นอสัณฐานเพียงอย่างเดียว เนื่องจากโครงสร้างส่วนที่เป็นอสัณฐานจะมีโครงร่างที่แข็งแรงน้อยกว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่วนที่เป็นผลึกจะเริ่มคลายตัวและเริ่มเปลี่ยนเป็นอสัณฐาน ทำให้เกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งส่วนที่เป็นผลึกกลายเป็นส่วนที่เป็นอสัณฐานทั้งหมด

#### 2.1.3.2.2 ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง คือ ชนิดและสายพันธุ์ของพืช การตัดแปรแป้ง ขนาดของแป้ง และปริมาณอะมิโลส กล่าวคือเมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนตัวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุดซึ่งเป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไป รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลง เมื่อลดอุณหภูมิลง ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง [8]

#### 2.1.3.2.3 การเกิดเจลาทีไนเซชัน

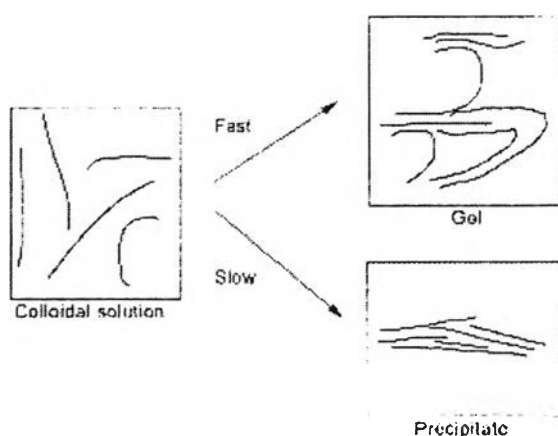
โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งจัดเรียงตัวในรูปของร่างแห (Micelles) จึงทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นเม็ดแป้งจะสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งดูดซึมน้ำและพองตัวได้มากขึ้น สารละลายแป้งจะมีความหนืดและใสมากขึ้น

เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งลดน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization) [8]

#### 2.1.3.2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) จะเกิดเมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวเต็มที่และเกิดการแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของอะมิโลส เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่จะสามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซึมน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัว เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีกจะพบว่าโครงสร้างของแป้งจะยึดติดกันแน่นขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในเม็ดแป้งจะถูกบีบออกมาจนออกเจล เรียกว่า Syneresis ซึ่งจะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

ในการคืนตัวของแป้งจะเกิดได้ 2 ลักษณะขึ้นอยู่กับความเร็วในการคืนตัว เมื่อการคืนตัวเกิดอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน แต่ถ้าการคืนตัวเกิดอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังภาพที่ 2.10 [8]



ภาพที่ 2.10 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [12]

### 2.1.3.3 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม (ภาพที่ 2.11) [8] มีดังนี้

2.1.3.3.1 การร่อนทราย (Sieving and Washing) : เป็นการชำระล้างทรายและหินที่ติดมากับมันสำปะหลัง ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการผลิต โดยทำการขนถ่ายมันสำปะหลังลงบนสายพาน เพื่อเข้าสู่เครื่องร่อนทราย ในระหว่างขนถ่ายบนสายพาน จะมีการสับเหง้าของมันสำปะหลังออก เนื่องจากเหง้าของมันสำปะหลังเป็นอุปสรรคในการโม่มันสำปะหลัง จากนั้นจึงนำมันสำปะหลังมาร่อนเปลือก และล้างทำความสะอาด

2.1.3.3.2 การโม่หิวมัน (Raspig) : หลังจากทำความสะอาดมันสำปะหลังแล้ว มันสำปะหลังจะถูกส่งเข้าเครื่องโม่หิวมัน โดยมันสำปะหลังจะถูกสับเป็นชิ้นเล็กๆ ผสมรวมกับน้ำที่ใช้ใน กระบวนการผลิตก่อนที่จะถูกส่งไปยังเครื่องแยกกาก

2.1.3.3.3 การแยกกากหยาบ (Coarse Extracting) : เครื่องแยกกากจะทำกรแยกกากมันสำปะหลังออกจากน้ำแป้ง โดยน้ำแป้งที่ได้จากเครื่องโม่หิวมัน จะมาผ่านเครื่องแยกกากหยาบ 2 ครั้ง กากหยาบที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ต่อไป

2.1.3.3.4 การแยกกากละเอียด (Fine Extracting) : หลังจากผ่านเครื่องแยกกากหยาบ น้ำแป้งยังคงมีเยื่อของมันสำปะหลังหรือกากอ่อนรวมอยู่ในน้ำแป้ง ซึ่งจะทำให้น้ำแป้งที่ได้มีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นจึงมีการนำน้ำแป้งมาผ่านเครื่องแยกกากละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

2.1.3.3.5 การแยกแป้ง (Separating) : เป็นการนำน้ำแป้งมาปรับความเข้มข้น และความบริสุทธิ์ โดยผ่านเครื่องแยกแป้ง ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้แยกแป้งออกจากสิ่งเจือปน

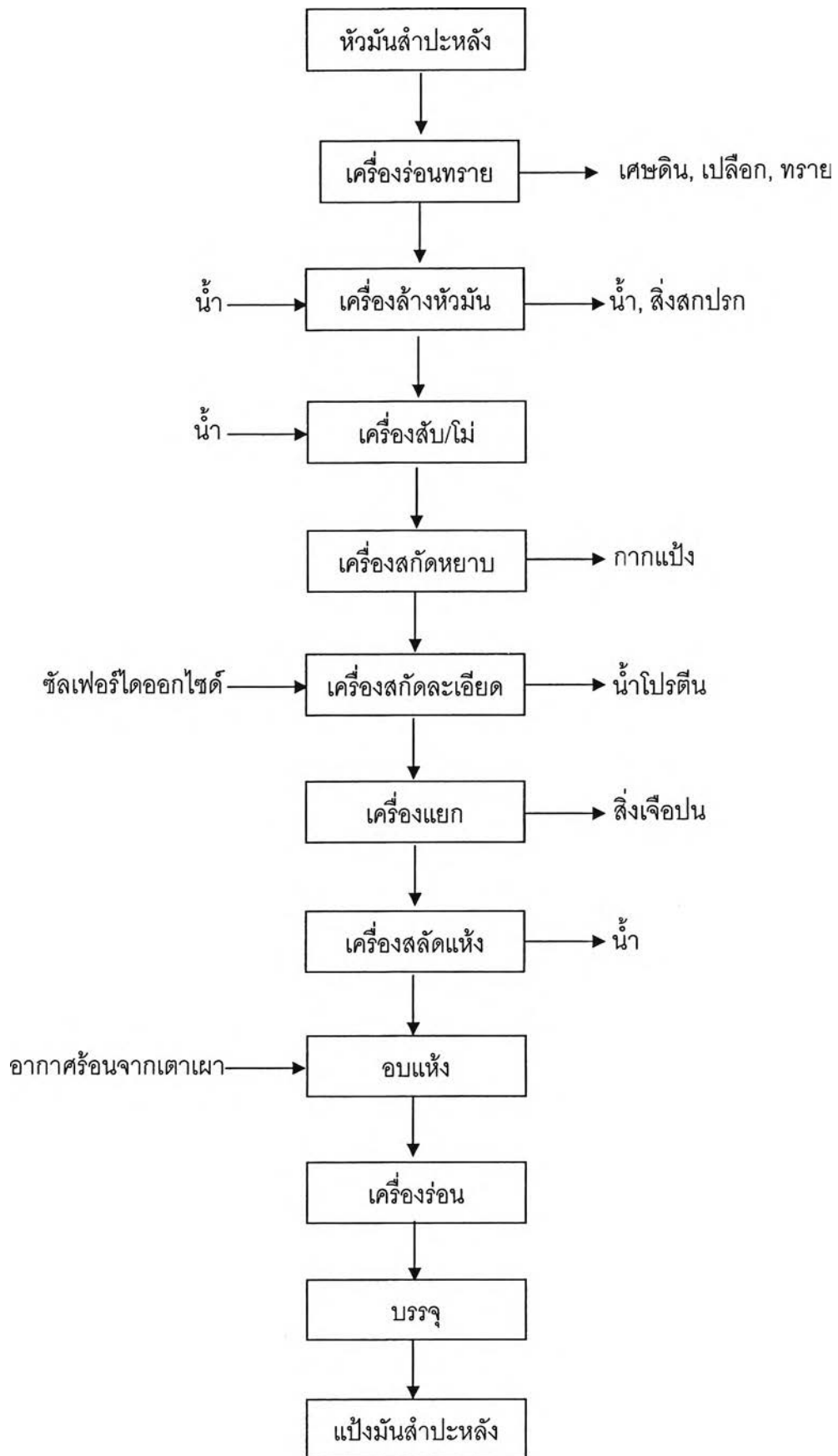
2.1.3.3.6 การสลัดแห้ง (Centrifugal) : น้ำแป้งที่ได้จะไหลเข้าสู่เครื่องสลัดแห้ง ซึ่งจะทำให้การแปรสภาพน้ำแป้งเป็นแป้งหมาด

2.1.3.3.7 การอบแห้ง (Flash Drying) : แป้งหมาดจะถูกลำเลียงตามสายพานเข้าสู่เครื่องอบแห้ง เพื่อผ่านลมร้อนอุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส ทำให้แป้งหมาดมีความชื้นลดลง จากนั้นก็จะทำให้เย็นลง แล้วส่งผ่านไปไปยังเครื่องร่อนแป้ง

2.1.3.3.8 การร่อนแป้ง (Sieving) : แป้งที่ผ่านเครื่องอบแห้งมานั้น จะถูกนำมาผ่านเครื่องร่อนแป้ง เพื่อคัดขนาดเม็ดแป้ง ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

2.1.3.3.9 การบรรจุแป้ง: แป้งที่ผลิตได้จะถูกนำมาบรรจุใส่ถุงเพื่อส่งให้ลูกค้าต่อไป





ภาพที่ 2.11 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม [8]

#### 2.1.3.4 กากมันสำปะหลัง (Cassava Residue หรือ Cassava Bagasse)

ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง จะพบว่ากากมันสำปะหลังเป็นส่วนที่ผลิตได้ออกมาในขั้นตอนการสกัดแป้ง โดยกากที่ได้นี้จะเป็นส่วนที่ได้จากเปลือกของหัวมันและเยื่อใยในตัวของมันสำปะหลัง ซึ่งเปลือกมันสำปะหลังประกอบด้วยเนื้อเยื่อในชั้นเพอริเดิร์ม (Periderm), สเกลอเรนคิมา (Schlerenchyma) คอร์ติคัล พาเรนคิมา (Cortical Parenchyma) และไฟลเอ็ม (Phloem) [8] ซึ่งภายในกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบที่ประกอบด้วย แป้งร้อยละ 56 โปรตีนร้อยละ 5.3 ไขมันร้อยละ 0.1 เส้นใยร้อยละ 35.9 และเถ้าร้อยละ 2.7 [16] ซึ่งประโยชน์ของกากมันสำปะหลังมีดังนี้

- ผลิตอาหารสัตว์ โดยใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์
- ผลิตแอลกอฮอล์ โดยนำมาใช้ผลิตสุราและยาฆ่าเชื้อโรค
- ผลิตเอทานอล เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงอื่น

#### 2.1.4 แป้งดัดแปร

แป้งดัดแปร คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และ/หรือทางกายภาพ ด้วยวิธีทางกายภาพ และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือทางเคมี เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ วิธีการดัดแปรแป้งมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทและหลายรูปแบบ ในที่นี้จะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ การดัดแปรโดยวิธีทางเคมี การดัดแปรโดยวิธีทางกายภาพ และการดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ [17]

##### 2.1.4.1 วิธีการดัดแปรแป้ง

###### 2.1.4.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical Modification)

เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของแป้งกับสารที่ใช้ดัดแปรในภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา แป้งออกเป็น

###### 2.1.4.1.1.1 การเกิดอนุพันธ์ (Derivization)

1. การแทนที่สารโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (Monostarch Substitution)  
ได้แก่ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน

2. การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งเชื่อมขวาง (Cross-Linked Starch)

2.1.4.1.1.2 การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยใช้กรด (Acid Thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด (Acid-Modified Starch)

2.1.4.1.1.3 เด็กซ์ทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการลดขนาดโมเลกุลหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (Depolymerization/Transglycosylation) โดยการใช้ความร้อน หรือ ความร้อนกับกรด เช่น เด็กซ์ทรีน (Dextrin)

2.1.4.1.1.4 ออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสี (Bleaching) และลดขนาดโมเลกุล (Depolymerization) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized Starch)

2.1.4.1.1.5 การย่อยสลาย (Hydrolysis) เป็นการย่อยสลายน้ำตาลให้กลายเป็นโมเลกุลเล็กๆ โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เช่น มอลโตเด็กซ์ทรีน (Maltodextrin)

ในการดัดแปรแป้งทางเคมี โดยส่วนใหญ่นิยมทำในสภาพแขวนลอย ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ประมาณ 45-50 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งจะเกิดบริเวณพื้นผิวของส่วนผลึก และภายในส่วนอสัณฐาน ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งต้องทำในสภาวะชุ่มน้ำหรือกับเม็ดแป้งที่ปรับสภาพด้วยต่าง เพื่อให้เม็ดแป้งพองตัวและสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1,000 ได้ [8]

การจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นของส่วนที่เป็นผลึกภายในเม็ดแป้ง ทำให้การเคลื่อนที่ของสารเคมีเข้าไปภายในเม็ดแป้งเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ต่ำ อย่างไรก็ตามพบว่าพื้นผิวของอะมิโลเพคตินจะมีช่องขนาดเล็ก (Micro Channel) จำนวนมาก ทำให้สารเคมีสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้ และภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นส่วน Non-crystalline สารเคมีจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในโมเลกุลได้ง่ายกว่า ดังนั้นสารเคมีจึงมีแนวโน้มที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง และพบว่าสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรโดยการแทนที่จะอยู่บริเวณอสัณฐานของอะมิโลเพคติน [18] เนื่องจากส่วนที่เป็นผลึกของอะมิโลสจะแทรกอยู่เป็นโมเลกุลที่จับตัวกันแน่น ขณะที่อะมิโลเพคตินจะมีขนาดใหญ่กว่าทำให้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า แต่ในกรณีที่ไม่มีน้ำในปฏิกิริยา

สารเคมีจะไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในโมเลกุลของแป้งได้ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำให้เม็ดแป้งบวมและช่วยพาสารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเม็ดแป้งได้ [19]

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าระดับการแทนที่ (Degree of Substitution, DS) คือ จำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ถูกแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันต่อจำนวนหน่วยน้ำตาลกลูโคส (Anhydroglucose Unit, AGU) ในโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสของโมเลกุลแป้งจะมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 ของน้ำตาลกลูโคสถูกแทนที่ทั้งหมด จะมีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 3 ถ้าแทนที่ 2 หมู่จะมีค่า DS เท่ากับ 2 และถ้าแทนที่ 1 หมู่จะมีค่า DS เท่ากับ 1 ดังนั้นระดับการแทนที่ของแป้งดัดแปรที่ได้จะเป็นตัวบอกระดับการดัดแปรหรือปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ เนื่องจากค่าระดับการแทนที่จะเป็นของทั้งโมเลกุล โดยการคำนวณค่าระดับการแทนที่ที่สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.1 ดังนี้ [8]

$$DS = \frac{\text{โมลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่โดยเฉลี่ย}}{\text{โมลของแอนไฮโดรกลูโคส}} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.1}$$

การดัดแปรทางเคมีในระบบอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาน้อย โดยส่วนใหญ่จะทำการดัดแปรให้มีค่าระดับการแทนที่ของสารเคมีประมาณ 0.1 ถึง 0.2 การประเมินผลการดัดแปรแป้งโดยใช้ปฏิกิริยาการแทนที่ เพื่อควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุดและผลผลิตมีความคงตัวตามความต้องการ สามารถดูได้จากสมบัติทางเคมี โดยดูจากปริมาณหมู่แทนที่ที่มีอยู่ในแป้งแล้วคำนวณออกมาในรูปของค่าระดับการแทนที่ และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดจึงมีการเปรียบเทียบระดับการแทนที่จากการทดลองและระดับการแทนที่จากทฤษฎี เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ นอกจากการประเมินผลด้านการเกิดปฏิกิริยาการแทนที่โดยดูจากสมบัติทางเคมีแล้ว สามารถพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปแป้งที่ผ่านการดัดแปรโดยปฏิกิริยาการแทนที่นั้นจะมีความหนืด และความใสสูงกว่าแป้งดิบ ขณะที่อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ และช่วงให้ความเย็นพบว่าค่าความหนืดสุดท้ายก็ต่ำกว่าแป้งดิบ แสดงให้เห็นถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันน้อยลง และพบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรมีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งดิบ [20]

#### 2.1.4.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification)

เป็นการเปลี่ยนสมบัติของแป้งโดยใช้ความร้อนหรือแรงกล สมบัติของแป้งที่ได้จากการดัดแปรโดยวิธีนี้ คือสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และให้ความหนืดแก่ผลิตภัณฑ์ แป้งออกเป็น

2.1.4.1.2.1 เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแป้งจนผ่านขั้นตอนเจลาติไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized Starch)

2.1.4.1.2.2 แป้งละลายน้ำเย็น (Granule-Cold-Water-Soluble-Starch: GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่ละลายในน้ำเย็นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

2.1.4.1.2.3 การลดขนาดของเม็ดแป้งโดยทางกล จะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

2.1.4.1.2.4 การให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชัน หรือเรียกว่า annealing

2.1.4.1.2.5 การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat Moisture Treatment) เป็นการให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

#### 2.1.4.1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological Modification)

เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

2.1.4.1.3.1 Waxy Starch เป็นแป้งอะมิโลสต่ำหรือไม่มีอะมิโลสเลย

2.1.4.1.3.2 High Amylosed Starch เป็นแป้งที่มีอะมิโลสสูง

2.1.4.1.3.3 การย่อยสลาย (Hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก

### 2.1.4.2 แป้งประจุบวก (Cationic Starch)

แป้งประจุบวก เป็นแป้งดัดแปรที่เกิดจากปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน ได้จากสารเคมีที่มีหมู่อะมิโน (Amino), อิมิโน (Imino), แอมโมเนียม (Ammonium), ซัลโฟเนต (Sulfonate) หรือ ฟอสโฟเนียม (Phosphonium) เช่น (3-chloro-2-hydroxypropyl)trimethylammonium (CHPT) [12] แทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง แป้งประจุบวกสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

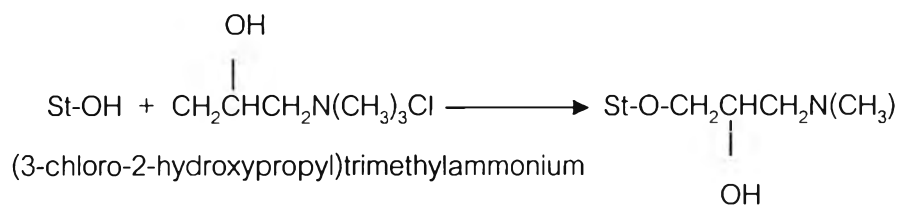
#### 1. เทอร์เทียรอะมิโนแอลคิลสตาร์ชอีเทอร์ (Tertiary Aminoalkyl Starch Ether)

ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ 2-diethylaminoethyl chloride (DEC) ในสภาวะเบส ดังปฏิกิริยา

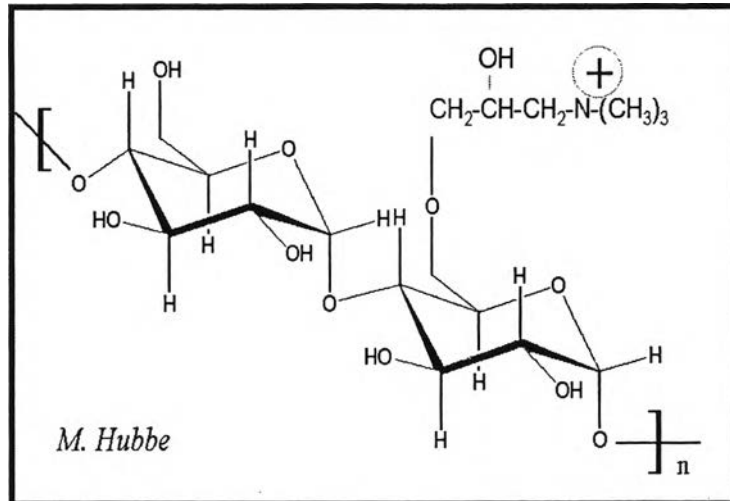


#### 2. ควอเทอเนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ (Quaternary Amonium Starch Ether)

ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ (3-chloro-2-hydroxypropyl)trimethyl ammonium ในสภาวะเบส ดังปฏิกิริยา



การดัดแปรแป้งประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีในสภาวะเบส ที่อุณหภูมิ 20-50 องศาเซลเซียส ที่ pH 10.5-12 เป็นเวลา 8-16 ชั่วโมง ในระหว่างปฏิกิริยาจะมีการเติมโซเดียมซัลเฟตหรือเกลืออื่นๆ เพื่อป้องกันการพองตัวของเม็ดแป้ง ปฏิกิริยาการแทนที่ส่วนใหญ่เกิดตรงหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 2.12 [8]



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของแป้งประจุบวกที่ดัดแปรด้วยสาร CHPT [21]

#### 2.1.4.2.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

แป้งประจุบวกจะมีความเสถียรมากขึ้น มีอัตราการคืนตัวลดลง สามารถละลายน้ำได้สูง พองตัวได้ในน้ำเย็น จึงมีการนำไปใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยนิยมใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Dry-Strength Additive) ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับกระดาษ หรือใช้เคลือบกระดาษ ทำให้กระดาษทนต่อการขูดหรือถลอก ด้านทานการแทรกซึมของหมึกหรือของเหลว ป้องกันฝุ่นละออง และทำให้ค่า BOD และ COD ของน้ำทิ้งมีค่าลดลง เป็นผลต่อสภาพแวดล้อม

นอกจากนี้ปริมาณในการเติมแป้งลงในกระดาษมีผลต่อความแข็งแรงของกระดาษเช่นกัน คือ ถ้าหากเติมในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้กระดาษมีการกักเก็บ (Retention) ลดลง เนื่องจากถ้ามีแป้งมากเกินไปเมื่อโดนความร้อนขณะทำการขึ้นแผ่น แป้งจะเกิดการละลายและไหลติดกับลูกโรลทำให้เส้นใยติดค้างอยู่บริเวณลูกโรลได้

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอใช้ในการเคลือบผ้า และผสมในน้ำยาซักแห้งเพื่อเพิ่มความเหนียวนุ่มและความเรียบให้แก่เส้นใยผ้าหลังจากซักแห้ง

ในอุตสาหกรรมกาวใช้ผลิตกาวสำหรับฉลากติดขวด กาวแถบของจดหมาย กาวสำหรับบอร์ด

ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ใช้เป็นสารตกตะกอน (Flocculants) สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีประจุลบ และใช้กำจัดโลหะที่มีประจุลบต่างๆ จากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

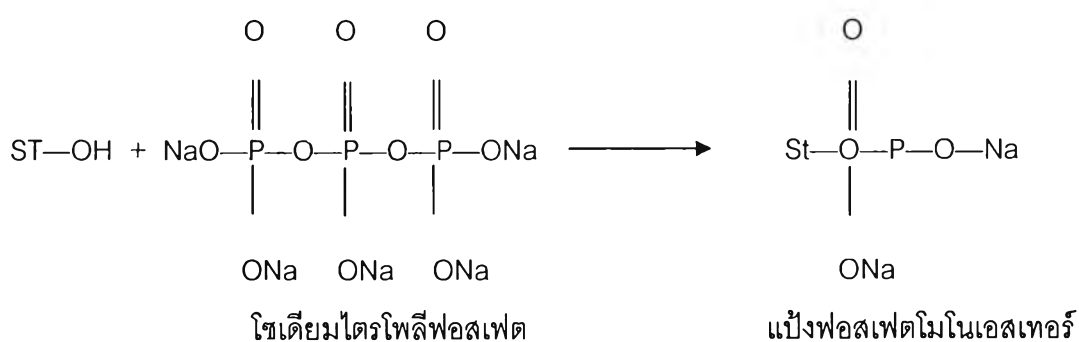
นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตฟิล์มถ่ายรูป ใช้ผสมกับสารเคมีสำหรับผลิตน้ำยาสระผม สเปรย์แต่งผม น้ำยาล้างจาน เป็นต้น [8]

### 2.1.4.3 แป้งแอมโฟเทอริก (Amphoteric Starch)

แป้งแอมโฟเทอริก (Amphoteric Starch) เป็นแป้งดัดแปรที่เกิดจากปฏิกิริยาการแทนที่ มีทั้งประจุบวกและลบ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยที่ประจุบวกของแป้งเตรียมได้จากจากเทอร์เทียรี อะมิโนเอทิล อีเทอร์ (Tertiary Aminoethyl Ether) และ กลุ่มฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate Ester Group)

ในการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโฟเทอริกจะเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชันระหว่างแป้งกับ(3-chloro-2-hydroxypropyl) trimethyl ammonium ในสภาวะเบส จะได้แป้งที่มีประจุบวก

ส่วนการดัดแปรประจุลบเกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างแป้งกับสารโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium Tripolyphosphate;  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ , STPP) ในสภาวะกึ่งแห้ง (Semi Reaction) หมู่ฟอสเฟตในแป้งได้มาจากกรดฟอสฟอริกหรือเกลือละลายน้ำของ ออร์โท- ไพโร- หรือไตรโพลีฟอสเฟต โดยส่วนใหญ่หมู่ฟอสเฟต ( $\text{P}=\text{O}(\text{OH})_2$ ) จะเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชันจะดำเนินในสภาวะเบสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประจุลบเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

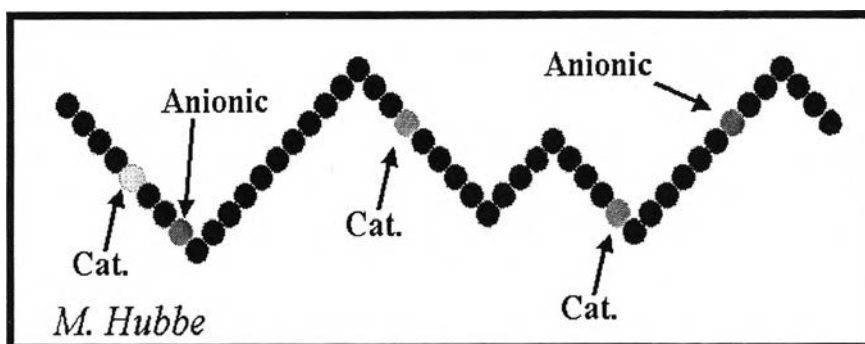


#### 2.1.4.3.1 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

ในอุตสาหกรรมกระดาษนิยมใช้แป้งแอมโฟเทอริกในช่วงชื้นแฉะ (Wet End) เพื่อช่วยควบคุมการกักเก็บ (Retention) และการระบายน้ำ (Drainage) ซึ่งทำให้ผลผลิต (Yield) เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดค่า BOD ของน้ำทิ้ง ทำให้เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แป้งแอมโฟเทอริก ในระดับอุตสาหกรรมสามารถผลิตได้ทั้งจากแป้งข้าวโพด ข้าวโพดข้าวเหนียว และมัน



ฝรั่ง โดยเฉพาะในแป้งมันฝรั่งซึ่งมีประจุลบจากฟอสเฟตถึงร้อยละ 0.08 สามารถผลิตแป้งแอมโฟเทอริกได้โดยการเติมเฉพาะกลุ่มประจุบวกเข้าไปในโมเลกุลเท่านั้น ส่วนแป้งชนิดอื่นนั้นจำเป็นต้องมีการเติมทั้งสองประจุเข้าไปในโมเลกุล แป้งแอมโฟเทอริกโดยส่วนใหญ่มีปริมาณกลุ่มประจุบวกมากกว่ากลุ่มของประจุลบ โดยกลุ่มประจุบวกในแป้งแอมโฟเทอริกนั้นมีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.20-0.33 [22] ส่วนกลุ่มประจุลบมีปริมาณเพียง 0.07-0.18 มิลต่อโมลของกลุ่มประจุบวก [23]



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของแป้งแอมโฟเทอริก [24]

### 2.1.5 การใช้แป้งในอุตสาหกรรมกระดาษ

ในอุตสาหกรรมกระดาษ แป้งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเป็นอันดับ 3 ในการผลิตกระดาษ [13] โดยส่วนใหญ่จะแป้งใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ และทำให้กระดาษมีความเหนียวเพิ่มขึ้น โดยสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนการผลิตกระดาษได้หลายขั้นตอน ดังนี้

1. ส่วนเปียก (Wet End) เป็นการเติมแป้งผสมกับน้ำเยื่อในช่วงการเตรียมเยื่อจนกระทั่งก่อนการขึ้นแผ่นกระดาษ โดยจะใช้เป็นสารตกตะกอน (Flocculating agent) สารช่วยกักเก็บ (Retention aid) สารช่วยการระบายน้ำ (Drainage aid) และเพื่อช่วยให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น (Dry Strength Agent) ซึ่งแป้งที่นิยมใช้ คือแป้งประจุบวก เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีความแข็งแรง และตัวแป้งมีลักษณะเป็นประจุบวก สามารถเกิดพันธะไฮออนิกกับประจุลบของเซลลูโลสที่ใช้ในการผลิตกระดาษ มีผลทำให้เส้นใยแนบติดกันได้มากขึ้น ส่งผลทำให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น

2. หน่วยเคลือบสารกันซึมน้ำ (Size Press) เป็นการเติมแป้งเข้าไปหลังจากที่กระดาษมีการฟอร์มตัวเป็นรูปและแห้งตัวในระดับหนึ่ง ซึ่งแป้งจะทำหน้าที่อุดรูพรุนของผิวกระดาษ และทำให้กระดาษมีผิวหน้าแข็งแรงขึ้น

3. หน่วยเคลือบผิว (Coating) เป็นการใช้แป้งเป็นตัวยึดในสารเคลือบผิวหน้า ส่งผลให้กระดาษมีความเรียบและมีความมันเงาเหมาะสำหรับการพิมพ์คุณภาพสูง

4. ใช้แป้งเป็นกาวเชื่อมลอนลูกฟูกกับกระดาษผิวกล่องในกระบวนการผลิตกระดาษกล่องลูกฟูก

#### 2.1.5.1 สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้ง

สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ (Dry Strength Agent) เป็นสารเติมแต่งหลักที่ช่วยให้เส้นใยสร้างพันธะกันระหว่างการแห้งตัวของกระดาษ โดยจะเติมลงในน้ำเยื่อก่อนการขึ้นแผ่น (Wet End) [25, 26] ซึ่งคุณสมบัติส่วนใหญ่ของสารเพิ่มความแข็งแรง คือสามารถละลายน้ำได้ ตัวอย่างสารเพิ่มความแข็งแรงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ได้แก่

- แป้งประจุบวก (Cationic Starch)
- กัมจากพืช (Natural Vegetable Gums)
- พอลิเมอร์อะคริลาไมด์ (Acrylamide Polymers)

ในการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงในขั้นตอน Wet End พบว่าเมื่อใช้ พอลิเมอร์อะคริลาไมด์ร้อยละ 0.5 หรือ แป้งประจุบวกร้อยละ 1-2 จะสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษได้ [23] ซึ่งแป้งประจุบวกที่ผลิตโดยส่วนใหญ่จะมีค่าระดับการแทนที่ประมาณ 0.01-0.05

และการใช้แป้ง 2 ประจุ หรือแป้งแอมโฟเทอริกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง จะพบว่า จะมีประสิทธิภาพในการสร้างพันธะกับเส้นใยได้ดีกว่าแป้งประจุเดียวหรือแป้งประจุบวก

ในการเติมแป้งในบางกรณีอาจจะทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง เนื่องจากการเติมแป้งมากเกินไปจะให้เส้นใยเกิด Flocculation จึงส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของกระดาษลดลงได้ [27] นอกจากนี้การเติมแป้งประจุบวกที่มากเกินไปทำให้ประจุบวกของแป้งที่เกิดพันธะกับประจุลบของเยื่อกระดาษที่เหลืออยู่ จึงทำให้สารละลายเยื่อกระดาษส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นประจุบวกด้วย ส่งผลให้การเกิดพันธะได้ต่ำกับสารเติมแต่งประจุบวก (Cationic Additive) เช่น สี สารเคลือบผิว สารคงรูปต่างๆ และเรซิน นอกจากนี้พบว่าสารละลายเยื่อกระดาษที่มีสมบัติเป็นประจุบวกยังทำให้เกิดฟองระหว่างกระบวนการผลิตส่งผลให้ผิวหน้ากระดาษไม่เรียบ ดังนั้นการใช้แป้งประจุบวกจึงต้องใช้ปริมาณจำกัด โดยทั่วไปปริมาณแป้งประจุบวกที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษประมาณร้อยละ 0.5-2.5 โดยน้ำหนักแห้งของเยื่อกระดาษ ซึ่งปริมาณการใช้

แป้งนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเยื่อกระดาษและความเป็นประจุบวกของแป้งประจุบวก จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการใช้แป้งแอมโฟเทอริก (Amphoteric Starch) แทนแป้งประจุบวก

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xu และคณะ [28] ได้เตรียมแป้งเชื่อมขวาง (Crosslink) แอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซิล เพื่อใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยใช้การแทนที่ของประจุบวกร้อยละ 0.3 ต่อ 0.12-0.33 ของกลุ่มคาร์บอกซิล พบว่าระดับการแทนที่ของคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น

Lim, Liang และ Seib [29] ทำการศึกษาผลของการเตรียมแป้งข้าวโอ๊ตประจุบวก ที่มีต่อความแข็งแรงของกระดาษ โดยการดัดแปรแป้งประจุบวกด้วย 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride ที่สภาวะต่าง พบว่า แป้งที่มีระดับการแทนที่ประมาณ 0.013 จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ คือ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ได้สูงขึ้น

Burnfield และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาการใช้แป้งประจุบวกและกัมกอลลอกโทแมนแนนประจุบวก เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและสารช่วยการระบายน้ำ (Drainage Aid) ในการผลิตกระดาษ พบว่า แป้งดัดแปรที่ใช้จะส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น (ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น) และพบว่าการเติมแป้งทั้ง 2 ชนิดร่วมกันจะส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากกว่าการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงเพียงชนิดเดียว

Tsai และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาการใช้แป้งข้าวโพดประจุบวก โดยใช้ 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride เป็นตัวดัดแปรให้มีร้อยละของไนโตรเจนเท่ากับ 0.3 เพื่อเป็นสารเติมแต่งในช่วงเปียก (Wet End) ของกระบวนการผลิตกระดาษ โดยใส่ในปริมาณร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเยื่อ พบว่า การใช้แป้งข้าวโพดประจุบวกช่วยให้การกักเก็บเส้นใย (Retention) และการระบายน้ำของเยื่อ (Drainage) มีประสิทธิภาพสูงขึ้น