

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 วัสดุเชิงประกอบ [1,2]

วัสดุเชิงประกอบ (composite materials) เป็นวัสดุซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่แตกต่างตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมารวมกัน ซึ่งสามารถสังเกตเห็นองค์ประกอบเหล่านี้ได้ด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปองค์ประกอบหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcing agent) ให้กับองค์ประกอบที่สองซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดหรือเมทริกซ์ (matrix)

##### 2.1.1 ชนิดของเมทริกซ์

เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในวัสดุเชิงประกอบ ทำหน้าที่ยึดเกาะหรือเชื่อมประสานกับสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยหรืออนุภาค ปกป้องสารเสริมแรงจากรอยขีดข่วน ส่องผ่านแรงหรือความเค้นระหว่างสารเสริมแรง โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

##### 2.1.1.1 พอลิเมอร์

วัสดุเชิงประกอบที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (polymer matrix composites, PMCs) นี้ มีการพัฒนาเป็นอย่างมากในกลุ่มของวัสดุเชิงประกอบทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากสามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ มีรูปทรงซับซ้อน นำไปใช้งานง่าย การบำรุงรักษามีราคาไม่แพง พอลิเมอร์ที่แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เช่น อะคริลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ (ABS) ไนลอน พอลิอะซิเตด (polyacetals) พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) เป็นต้น และเทอร์โมเซต เช่น พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิมิตัว อัลคิเดเรซิน อีพอกซีเรซิน ฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

##### 2.1.1.2 โลหะ

วัสดุเชิงประกอบที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ (metal matrix composites, MMCs) ชนิดนี้ มักใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า PMCs แต่มีน้ำหนักมากและราคาแพง จึงมีการใช้งานไม่กว้าง

ขวางนัก วัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้จะประกอบด้วยโลหะอัลลอยด์เป็นเมทริกซ์เสริมแรงด้วยเส้นใยหรืออนุภาค เช่น ทังสเตน โลหะอัลลอยด์ที่ใช้ได้แก่ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ แมกนีเซียมอัลลอยด์ ทองแดง เป็นต้น

### 2.1.1.3 เซรามิก

วัสดุเชิงประกอบที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramic matrix composites, CMCs) ชนิดนี้ ประกอบด้วยเซรามิกเป็นเมทริกซ์เสริมแรงด้วยเส้นใยหรืออนุภาค เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ เซรามิกที่ใช้ได้แก่ ลิเทียมอะลูมิโนซิลิเกต อะลูมินา ซิลิกอนไนไตรต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น สำหรับการใช้งานจะคล้ายกับระบบของ MMCs มักใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก โดยทั่วไปเซรามิกมีความเปราะแตกหักง่าย แต่เมื่อนำมาทำเป็น CMCs แล้ว วัสดุที่ได้มีความทนทานมากขึ้น

### 2.1.2 ชนิดของสารเสริมแรง

สารเสริมแรงทำหน้าที่เสริมแรงหรือรับแรงจากเมทริกซ์ เมื่อวัสดุเชิงประกอบถูกแรงกระทำ ไม่ว่าจะเป็นแรงดึง แรงอัดหรือแรงเฉือน ทำให้วัสดุดังกล่าวสามารถทนทานต่อแรงเหล่านั้นได้ดีกว่าวัสดุที่ไม่มีสารเสริมแรง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสารเสริมแรงที่ใช้ใน PMCs ซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมใช้กันมากที่สุด สารเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

#### 2.1.2.1 เส้นใย

เส้นใย หมายถึง วัสดุซึ่งมีความยาวมากกว่าพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก มีทั้งเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ฝ้าย ไหม และเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิเอสเตอร์ ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ความแกร่ง และความเหนียวของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งเส้นใยอนินทรีย์ เช่น แอสเบสทอส เส้นใยแก้ว ซึ่งใช้ได้กับเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ที่ต้องการสมบัติความทนความร้อนและความแข็งแรง

### 2.1.2.2 อนุภาค

อนุภาค หมายถึง วัสดุซึ่งมีมิติของรูปทรงที่แตกต่างกันไม่มากนัก โดยสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการใช้อนุภาคเป็นสารเสริมแรง จะขึ้นกับสมบัติที่สำคัญของอนุภาค ได้แก่

- ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายขนาดของอนุภาค (particle size and particle size distribution) โดยอนุภาคที่ละเอียดกว่าในเมทริกซ์ชนิดเดียวกัน จะให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรงสูงขึ้น ส่วนอนุภาคที่หยาบกลับจะทำให้ความแข็งแรงต่ำลง
- รูปร่างของอนุภาค (shape) โดยรูปร่างของอนุภาคมีผลกับสมบัติต่างๆ ตัวอย่าง เช่น อนุภาคของเกล็ดชนิดที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีแนวโน้มของการจัดเรียงตัวในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเป็นแอนไอโซโทรปี (anisotropy) นอกจากอนุภาคที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นแล้ว ยังมีอนุภาคที่มีรูปร่างแบบอื่นๆอีก ได้แก่ อนุภาคทรงกลม เป็นแท่ง เป็นต้น
- ธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิว (chemical nature of the surface) สำหรับอนุภาคของแร่ (mineral particle) มักมีหมู่ที่มีขั้วอยู่บนพื้นผิว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้เปียกน้ำได้ง่าย แต่ไม่เกาะติดกับพอลิเมอร์ การปรับปรุงให้อนุภาคสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จำเป็นต้องมีการปรับแต่ง (treat) พื้นผิวเสียก่อน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อาจถูกปรับแต่งด้วยกรดสเตียริก (stearic acid) เพื่อให้หมู่ของกรดยึดติดกับอนุภาค ขณะที่สายโซ่อะลิฟาติกเข้าร่วมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์

### 2.1.3 ข้อดีของวัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์

จากชนิดของสารเสริมแรง และเมทริกซ์ที่มีมากมายหลายแบบในกลุ่ม PMCs ทำให้สามารถนำมาผลิตวัสดุเชิงประกอบได้มากมาย ทั้งยังปรับปรุงสมบัติต่างๆให้ดีขึ้นอีกด้วย เช่น ในบางกรณีการใช้สารเสริมแรงเพียงชนิดเดียว ไม่สามารถทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ ก็สามารถเพิ่มชนิดของสารดังกล่าวได้ หรือในบางกรณีต้องการสมบัติของวัสดุที่ดี ทั้งยังต้องการกรรมวิธีการผลิตและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม ผู้ผลิตสามารถเลือกใช้วิธีการที่ใกล้เคียงกับผลทางทฤษฎี การออกแบบและกระบวนการผลิต เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ข้อดีของวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ ได้แก่

1. สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายอย่าง
2. สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 25 – 50% เมื่อเทียบกับโลหะ
3. สามารถทนแรงบิดได้สูง
4. มีช่วงความถี่สูง
5. ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหักได้ดีเยี่ยม
6. พื้นผิวที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบมีความทนทานสูง
7. ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ เพื่อผลทางด้านสุนทรียภาพ
8. วงจรการผลิตวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสั้น ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้คราวละมากๆ
9. วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกมีอายุการใช้งานนาน
10. การขยายทางความร้อนต่ำ ทำให้มีตัวเลือกในการเลือกใช้ส่วนที่เป็นเมทริกซ์และสารเสริมแรงได้มาก
11. การใช้เครื่องมือในการผลิตถูกกว่า เมื่อเทียบกับโลหะ
12. ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

#### 2.1.4 ข้อจำกัดและปัญหาของวัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ สามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อน และแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นทางวิศวกรรม แต่ก็พบข้อบกพร่องและปัญหาที่บางครั้งอาจทำให้วัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ไม่เป็นที่ยอมรับ อันได้แก่

1. ในบางกรณี ราคาของวัสดุที่สูงทำให้ไม่นิยมใช้กันแพร่หลาย
2. ข้อบกพร่องที่เกิดจากเสถียรภาพหรือความคงทนของพอลิเมอร์ยังมี
3. การลุกไหม้และควันที่เกิดจากวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เป็นอันตราย
4. จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการผลิต เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น
5. เทคนิคและวิธีการใหม่ๆมักถูกจำกัดในวงแคบ
6. ขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนต้องอยู่ภายใต้ภาวะที่เฉพาะตัว
7. ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษในการผลิต

ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นข้อดีและข้อจำกัดของ PMCs ที่ใช้เมทริกซ์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทั้งนี้กลุ่มวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว เป็นกลุ่มที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาอย่างมากตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 แต่ในปัจจุบันได้มีการให้ความสนใจในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เมทริกซ์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะปัญหาขยะพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากความคงทนต่อการสลายตัวโดยธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาเป็นร้อยๆ ปีของพอลิเมอร์สังเคราะห์ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตพลาสติกนั่นเอง แนวทางหนึ่งของการลดปริมาณขยะพลาสติกลง คือ การทำให้พลาสติกเหล่านั้นย่อยสลายตัวไปในระยะเวลาที่รวดเร็วด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติร่วมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติแต่เพียงอย่างเดียวในการผลิตพลาสติก พอลิเมอร์ธรรมชาติที่เข้ามามีบทบาทมาก ได้แก่ แป้ง เนื่องจากแป้งมีราคาถูก ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ หาได้ง่ายและเป็นวัสดุที่สามารถเกิดทดแทนได้ไม่มีวันหมด (renewable resources) อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมักมีสมบัติหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวด้วยการเติมสารเสริมแรงลงไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นวัสดุเชิงประกอบ

## 2.2 แป้ง [3-9]

แป้ง (starch) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสและเป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช ซึ่งได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชจะเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่างๆ เช่น หัว ราก เมล็ด และผล โดยรวมตัวกันอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (starch granule) ที่อาจมีหรือไม่มีเยื่อหุ้ม เรียกว่า อะไมโลพลาสต์ (amyloplast) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง บางชนิดได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกัน และเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง รวมทั้งสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย

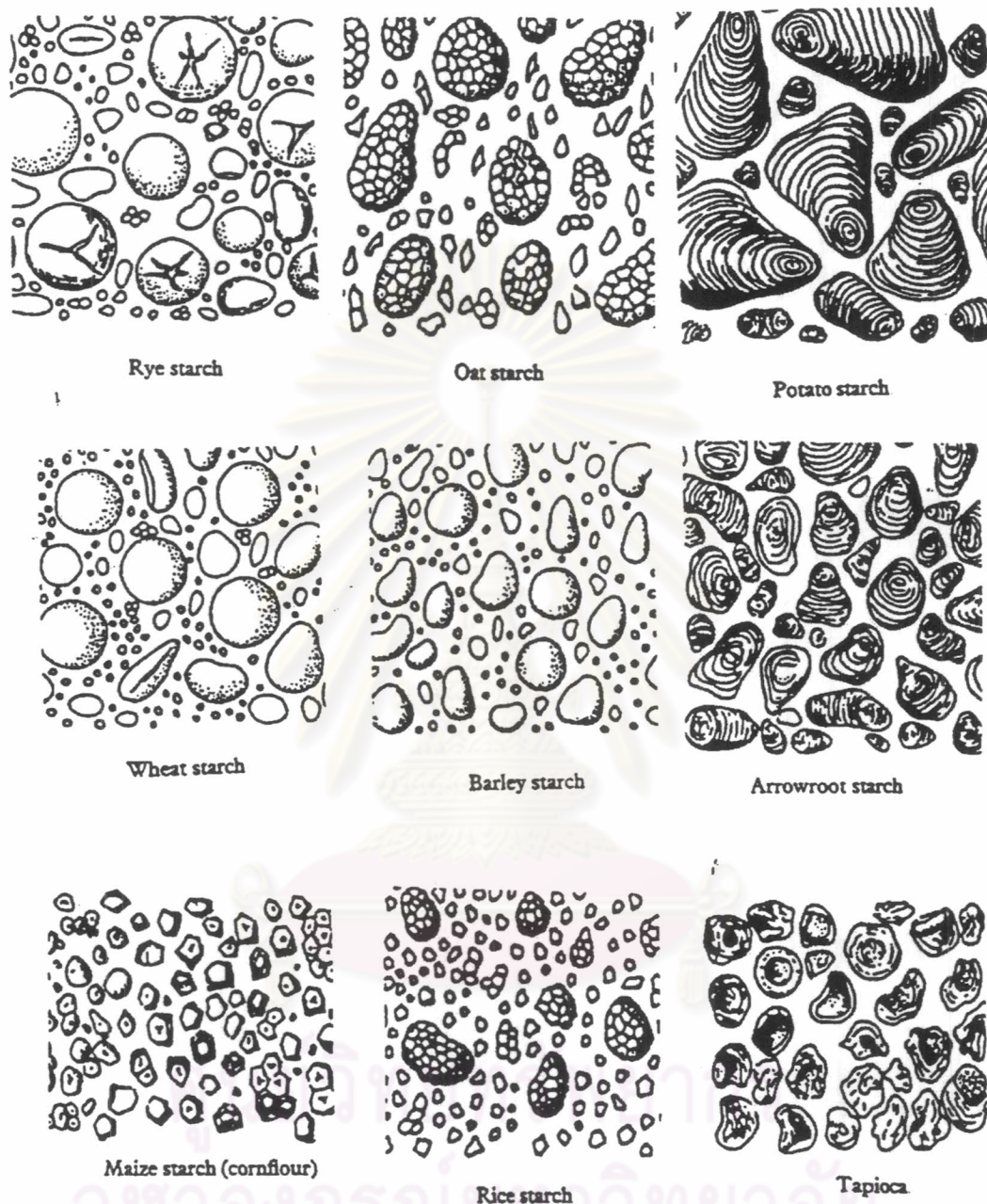
### 2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

รูปร่างของเม็ดแป้งมาจากพืชแต่ละชนิดกันจะแตกต่างกัน จึงเป็นตัวบ่งชี้ชนิดของแป้งได้ ตัวอย่างเช่น เม็ดแป้งมันฝรั่ง มีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายไข่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-100 ไมครอน เม็ดแป้งข้าวโพดมีขนาดเล็ก มีรูปร่างทั้งกลมและเหลี่ยมรวมกัน แม้จะมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกันก็ตาม ส่วนเม็ดแป้งสาลีมีรูปร่างแบนกลมคล้ายเลนส์ มีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางผันแปรอยู่ในช่วง 2-35 ไมครอน สำหรับเม็ดแป้งข้าวเจ้ามีขนาดค่อนข้างเล็ก ตรงกันข้ามกับเม็ดแป้งมันฝรั่งที่มีขนาดใหญ่กว่ามาก มีความหนาแน่นน้อยกว่าทำให้สุ่ง่าย ในเม็ดแป้งยังมีแร่ธาตุ ไขมัน และโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่บ้างเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อนำเม็ดแป้งไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งที่ปรากฏจะสามารถบ่งชี้ได้ว่าเป็นแป้งที่มาจากพืชชนิดใด ดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รูปร่าง ขนาด องค์ประกอบและสมบัติบางประการของเม็ดแป้งที่ได้จากพืชชนิดต่างๆ [6]

พืช	รูปร่าง	ขนาด ( $\mu\text{m}$ )	อะไมโลส		อะไมโลเพกติน	
			เปอร์เซ็นต์	Degree of polymerization	เปอร์เซ็นต์	Degree of polymerization
ข้าวโอ๊ต	ไม่มีข้อมูล	5 - 15	27	1,300	73	20
ข้าวสาลี	กลมแบน และทรง หลายเหลี่ยม	2 - 38	16 - 31	2,100	69 - 84	19 - 20
ข้าวโพด	ทรงหลาย เหลี่ยม	5 - 25	28	940	75 - 95	25 - 26
อะไมโลเมซ (amylomaize)	ไม่มีข้อมูล	52 - 80	1,300	0.110	20 - 48	
แวกซีเมซ (waxy maize)	ทรงหลาย เหลี่ยม		0 - 1		99 - 100	20 - 22
ข้าวฟ่าง	ทรงกลมและ ทรงหลาย เหลี่ยม	4 - 12				
ข้าวบาร์เลย์	กลมแบน	2 - 5	22 - 29	1,850	71 - 78	26
ข้าวเจ้า	ทรงหลาย เหลี่ยม	3 - 8	14 - 32		68 - 86	
ข้าวไรย์	กลมแบน	12 - 40	28		72	26
ชอร์กัม	ทรงกลมและ ทรงหลาย เหลี่ยม	4 - 21	21 - 34		66 - 79	
มันฝรั่ง	กลมรีคล้าย ไข่	15 - 100	23	3,200	77	24



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งจากพืชบางชนิด [5]

### 2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์สายยาวเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นสายแขนงที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-

ไกลโคซิดิก เป็นสายตรงและมีพันธะแอลฟา-1,6-ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage) เป็นสายแขนง อะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่น้ำหนักโมเลกุลของแต่ละสายตำแหน่งที่อยู่ในเม็ดแป้ง และด้วยปริมาณที่แตกต่างกันขององค์ประกอบทั้งสองนี้ จึงทำให้สมบัติของแป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดแตกต่างกันไปดังตารางที่ 2.2

เม็ดแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ในเม็ดแป้งประมาณ 20–39 เปอร์เซ็นต์ และมีอะไมโลเพกตินประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ แต่แป้งถั่วและแป้งข้าวโพดบางสายพันธุ์มีอะไมโลสสูงถึง 50-80 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า อะไมโลเมซ (amylomaize) และข้าวโพดบางสายพันธุ์อาจมีอะไมโลเพกติน 100 เปอร์เซ็นต์ หรือไม่มีอะไมโลสเลย เรียกว่า แวกซีเมซ (waxy maize) เป็นต้น

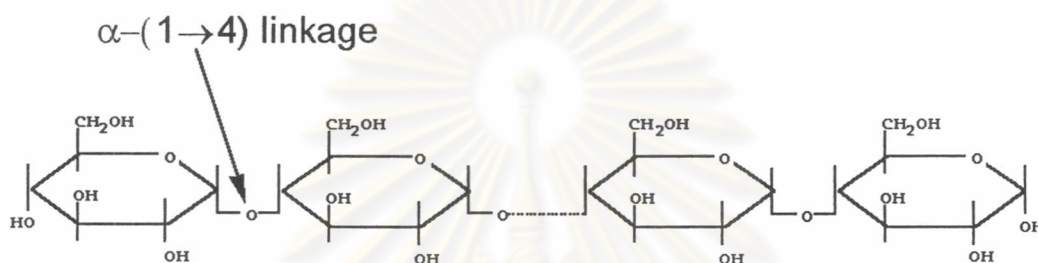
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของเม็ดแป้งจากพืชบางชนิด [7]

สมบัติทั่วไป	แป้งข้าวโพด (ปกติ)	แป้งข้าวโพด (แวกซีเมซ)	แป้งข้าวโพด (อะไมโลสสูง)	แป้งมันฝรั่ง	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวสาลี
ขนาดของอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )	2 – 30	2 – 30	2 – 24	5 – 100	4 – 35	2 – 55
%อะไมโลส	28	< 2	50 – 70	21	17	28
ช่วงอุณหภูมิที่เกิดเจลในน้ำ (°C)	62 – 80	63 – 72	66 – 170	58 – 65	52 – 65	52 – 85
ความหนืดสัมพัทธ์	ปานกลาง	สูงปานกลาง	ต่ำมาก	สูงมาก	สูง	ต่ำ
ความขุ่น-ใสของสารละลาย	ขุ่น	ขุ่นเล็กน้อย	ขุ่น	ใส	ใส	ขุ่น
ความสามารถในการเกิดเจลและรีโทรเกรดชัน	สูง	ต่ำมาก	สูงมาก	ปานกลางถึงต่ำ	ปานกลาง	สูง
ไขมัน (%แป้งที่แห้ง)	0.8	0.2	–	0.1	0.1	0.9
โปรตีน (%แป้งแห้ง)	0.35	0.25	0.5	0.1	0.1	0.4
ฟอสฟอรัส	0	0	0	0.08	0	0



### 2.2.2.1 อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกลูโคส ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสหรือหน่วยแอลฟา-ดี-กลูโคไพราโนซิด ประมาณ 250-2,000 หน่วยเรียงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-ไกลโคซิดิก ดังรูปที่ 2.2 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ  $10^6$  ดาลตัน อะไมโลสในแป้งบางชนิดอาจมีพันธะแอลฟา-1,6-ไกลโคซิดิก บ้างเล็กน้อย ประมาณ 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์ของพันธะทั้งหมด

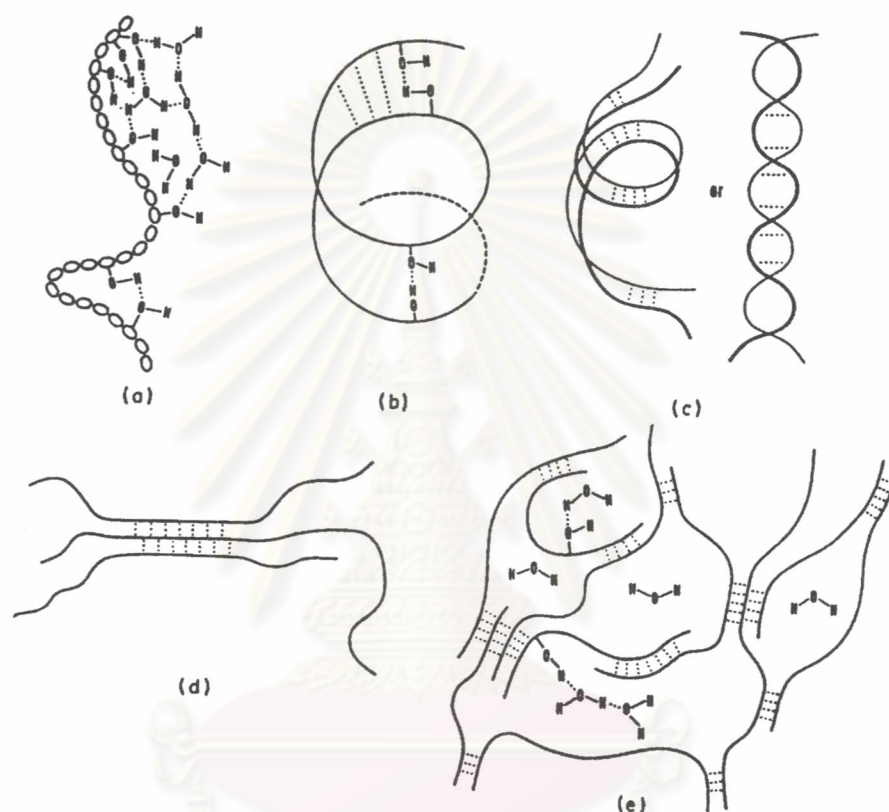


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส [8]

แป้งที่ได้จากข้าวโพด ข้าวสาลีและมันฝรั่ง จะมีอะไมโลสประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแป้งที่ได้จากข้าวโพด ข้าวฟ่างและข้าวเจ้าบางสายพันธุ์ที่ไม่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบจะเรียกว่า แวกซีเมธ นอกจากนี้ แป้งจากข้าวโพดบางสายพันธุ์มีอะไมโลสสูงประมาณ 52-75 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า แป้งข้าวโพดชนิดที่มีอะไมโลสสูง และบางสายพันธุ์อาจมีมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า อะไมโลเมธ โมเลกุลของอะไมโลสในแป้งที่ได้จากข้าวสาลี ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 1,000-2,000 หน่วย ในขณะที่แป้งจากมันฝรั่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสประมาณ 4,500 หน่วย

อะไมโลสไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อเติมน้ำลงไป อะไมโลสจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย และเนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสเป็นสายยาว จึงมีโอกาที่จะจับคู่กับอะไมโลสอีกโมเลกุลหนึ่ง เป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 2.3 ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) และตะกอนที่ได้เรียกว่า รีโทรเกรดสตาร์ช แต่ในแวกซีสตาร์ช ซึ่งไม่มีอะไมโลสเลยหรือมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบน้อยมาก จะไม่เกิดรีโทรเกรเดชัน

อะไมโลสสามารถจับตัวกับไอโอดีน โดยจะพันเป็นเกลียวรอบๆ ไอโอดีน ได้เป็น สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไอโอดีนมีสีน้ำเงิน สีที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความยาวและ จำนวนเกลียวรอบของสายอะไมโลส นอกจากนี้อะไมโลสยังรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้อีก เช่น กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว และสารมีขั้วอื่นๆ โดยเฉพาะการรวมตัวกับ ไนโตรพาราฟิน ใช้เป็นวิธีการแยกอะไมโลสออกจากอะไมโลเพกตินได้

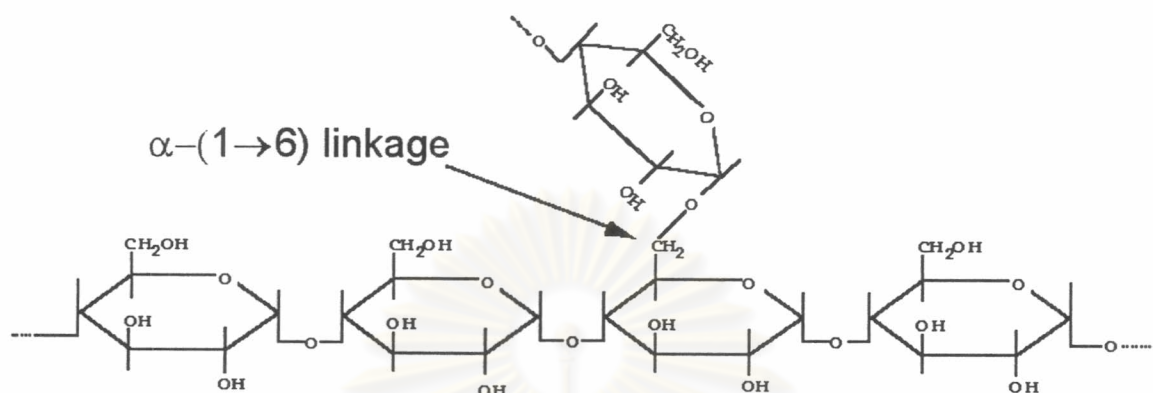


รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับอะไมโลส [9].

#### 2.2.2.2 อะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินเป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเม็ดแป้ง ประมาณ 70-100 เปอร์เซ็นต์หรือเฉลี่ยประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็น พอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีสายแขนงแยกออกมา ซึ่งแต่ละสายแขนงที่แยกออกมาจะมีน้ำตาล กลูโคสประมาณ 20-35 หน่วย ดังนั้นในโมเลกุลของอะไมโลเพกตินจึงมีทั้งพันธะแอลฟา-1,4 และ แอลฟา-1,6-ไกลโคซิดิก โดยจุดที่แยกของสายแขนงมีประมาณ 4-5 เปอร์เซ็นต์ของพันธะทั้งหมด

ดังรูปที่ 2.4 โดยปกติอะไมโลเพกตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลสมาก มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ  $10^6$ - $10^8$  ดาลตัน และทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกติน [8]

ความแตกต่างของสมบัติระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดแป้งแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [10]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
โครงสร้างโมเลกุล	สายยาว	สายแขนง
การเกิดสีกับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดง
การดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนไอโอดีน	650 ไมโครเมตร	540 ไมโครเมตร
ไอโอดีน อัฟฟินิตี (iodine affinity)	19 – 20 %	< 1%
องศาการเกิดพอลิเมอร์เชชัน (Degree of polymerization) (จำนวนน้ำตาลกลูโคสในโมเลกุล)	100 – 10,000	10,000 – 100,000
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ	ละลายน้ำ
ความคงตัวในสารละลาย	เกิดรีโทรเกรดชัน	คงตัว
การเปลี่ยนเป็นน้ำตาลมอลโทสโดยเอนไซม์บีตา - อะไมเลส	70 %	55%

## 2.3 แป้งดัดแปร [9,11]

เนื่องจากการนำแป้งที่ได้จากธรรมชาติมาใช้โดยตรงในอุตสาหกรรมอาหารและไม่ใช่อาหารยังมีข้อจำกัดต่อภาวะในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งในบางครั้งจะเกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิและแรงเฉือน นอกจากนี้แป้งธรรมชาติยังไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไม่ดีเท่าที่ควร และสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติบางประการของแป้งด้วยการดัดแปร (modification) ให้เป็นแป้งดัดแปร (modified starch) ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น เช่น ทำให้มีลักษณะของผิวสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลลาติไนซ์ และการคืนตัวลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น เป็นต้น ซึ่งวิธีการดัดแปรที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 3 วิธี ได้แก่

### 2.3.1 วิธีการดัดแปรทางกายภาพ

เป็นวิธีการดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อน ความดัน แรงเฉือน และความชื้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ 2 ลักษณะ คือ

1. มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของแป้ง เช่น เกิด disorganization ของเม็ดแป้ง
2. ทำลายโมเลกุลของแป้ง เช่น การลดขนาดโมเลกุลของแป้ง

การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะมีผลทำให้แป้งดัดแปรเกิดสมบัติเฉพาะตัว และจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น

#### แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch)

เป็นการนำเอาแป้งซึ่งอาจมาจากแป้งธรรมชาติหรือผ่านการดัดแปรมาแล้วมาต้มกับน้ำสุก หลังจากนั้นนำไปทำให้แห้งใหม่ ข้อดีของแป้งพรีเจลาติไนซ์ คือ กระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น เหมาะที่จะนำไปผสมกับอาหารปรุงสำเร็จประเภทที่ละลายทันที

การดัดแปรแป้งโดยวิธีทางกายภาพนี้ ภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้อุณหภูมิประมาณ 95-110 องศาเซลเซียส ความชื้น 18-27 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลานาน 12-16 ชั่วโมง ผลของความ

ร้อนและความชื้นจะทำให้โครงสร้างทางกายภาพของเม็ดแป้งเปลี่ยนไป รวมทั้งสมบัติของเม็ดแป้งที่เปลี่ยนไป เช่น พฤติกรรมการเกิดเจลของแป้ง

### แป้งที่ละลายในน้ำเย็น

แป้งที่ละลายในน้ำเย็นผลิตได้จากการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์และด่าง มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแป้งพรีเจล จะทำให้แป้งพรีเจลเสียรูปร่างของเม็ดแป้งไป และความแข็งแรงจะน้อยลงเมื่อนำไปอบ แป้งละลายในน้ำเย็นยังคงสภาพของเม็ดแป้งอยู่

กระบวนการผลิตแป้งที่ละลายในน้ำเย็น ทำโดยปรับสภาพเม็ดแป้งด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลทำให้เข้ากัน ตกตะกอน ล้าง ปรับความเป็นกรดต่างด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วล้างด้วยเอทานอลอีกครั้ง ทำให้แห้ง

### 2.3.2 วิธีการตัดแปรทางเคมี

การตัดแปรแป้งด้วยวิธีนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเพียงบางส่วนเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การใช้กรด หรือสารออกซิไดซ์ จะทำลายโครงสร้างธรรมชาติของแป้งให้เปลี่ยนแปลงไป เพื่อลดความหนืดของสารละลายแป้งเมื่อได้รับความร้อน ปฏิบัติการที่เกิดขึ้นมีหลายแบบ เช่น อีเทอร์ิฟิเคชัน เอสเทอร์ิฟิเคชัน แป้งตัดแปรที่ได้จากปฏิกริยาอีเทอร์ิฟิเคชันและเอสเทอร์ิฟิเคชันกับสารที่มีหมู่ฟังก์ชันเดียว เช่น พรอพิลีนออกไซด์ เอทิลีนออกไซด์ อะซิติกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น จะลดการเกิดปฏิสัมพันธ์ของโมเลกุล ทำให้แป้งที่ได้คงตัว เรียกว่า สเตบิลไดส์ตาร์ช หากทำปฏิกริยากับสารที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ เช่น ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ อีพิคลอโรไฮดริน เป็นต้น จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางของแป้งได้ ตัวอย่างการตัดแปรแป้งโดยวิธีการทางเคมี มีดังนี้

#### การผลิตไดสตา์ชอะดิเปต (distarch adipate)

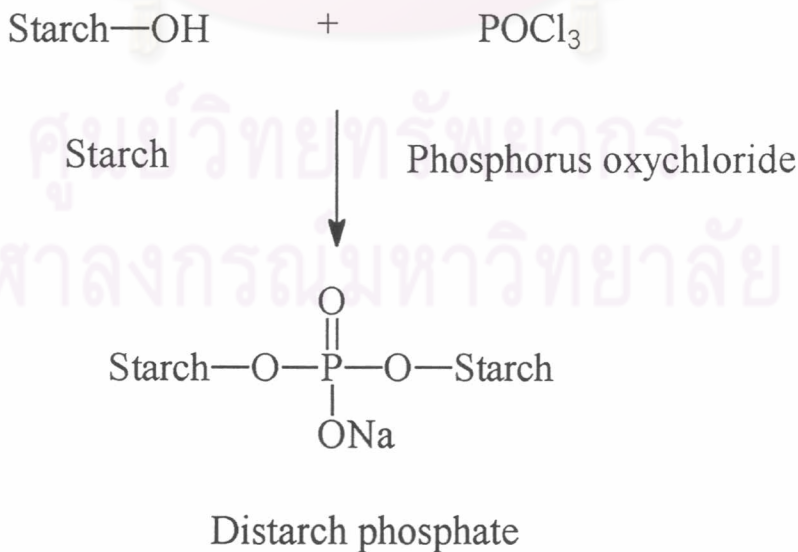
การผลิตไดสตา์ชอะดิเปตนั้น ใช้อะซิติกแอนไฮไดรด์ผสมกับกรดอะดิปิก ทำปฏิกริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันกับสารแขวนลอยของเม็ดแป้งในภาวะเบสอ่อน อัตราการเกิดปฏิกริยาจะ

เป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางภายในโมเลกุลแป้ง ได้แป้งที่ทนต่อความเป็นกรด แต่จะถูกล่อยได้ง่ายในภาวะที่เป็นด่างอ่อน

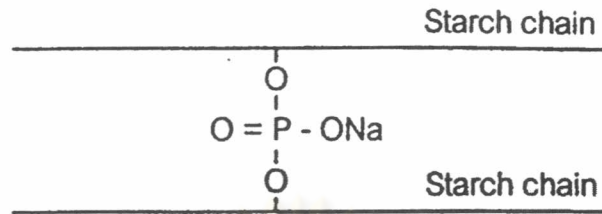
การผลิตไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate)

การผลิตไดสตาร์ชฟอสเฟต ทำได้โดยการปรับสมบัติของแป้งแขวนลอยด้วย ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในภาวะที่เป็นเบส ดังรูปที่ 2.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะเป็นไปอย่างช้าๆ สามารถเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น โดยทำปฏิกิริยาในภาวะที่อุณหภูมิสูง ไดสตาร์ชฟอสเฟตมีพันธะเชื่อมขวางที่ดีกว่าไดสตาร์ชอะดิเปต ดังรูปที่ 2.6 จึงทำให้มีความสามารถต้านทานความเป็นกรดอ่อนและด่างอ่อนได้ แต่สามารถถูกล่อยสลายในภาวะที่เป็นด่างปานกลางได้

แป้งดัดแปรที่ได้ทั้ง 2 ชนิดนี้ จัดเป็นแป้งครอสลิงค์ ผลของการเชื่อมขวางทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้งโดยเพิ่มความต้านทานต่อภาวะที่เป็นกรดหรือสภาพที่มีแรงเฉือน เป็นต้น ซึ่งพันธะเชื่อมขวางในแป้งเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแป้งและปริมาณหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่มีภายในเม็ดแป้งมีน้อยมาก โดยส่วนใหญ่แป้งครอสลิงค์จะมีการเชื่อมขวาง 1 ตำแหน่งต่อกลูโคส 100-3,000 หน่วย



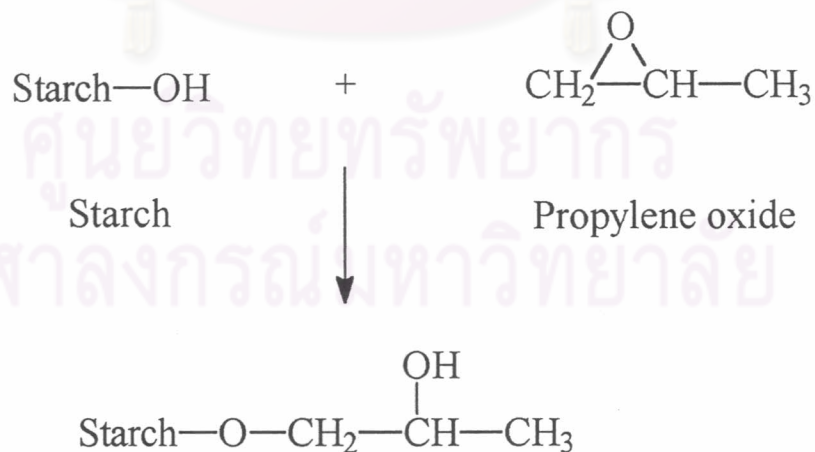
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แป้งไดสตาร์ชฟอสเฟต



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแป้งครอสลิงค์

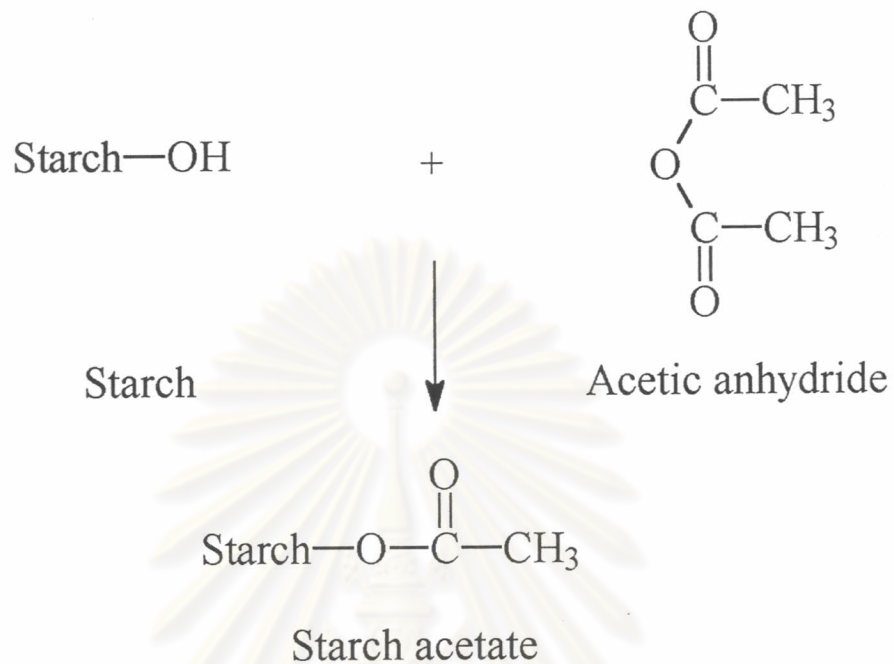
การผลิตแป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์

ทั้งแป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์เป็นแป้งที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและอีเทอร์ฟิเคชัน ในภาวะที่เป็นต่าง โดยทำปฏิกิริยากับสารที่มีความเป็นนิวคลีโอฟิลิกสูง เช่น พรอพิลีนออกไซด์หรือไตรพอลิฟอสเฟต และอะซิติกแอนไฮไดรด์หรือซัคซินิกแอนไฮไดรด์ จะได้แป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์ ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



Hydroxypropyl starch

รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แป้งอีเทอร์



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แป้งอะซิเตท

การตัดแปรงแป้งด้วยวิธีนี้ ระดับของการตัดแปรงจะสูงกว่าวิธีการเชื่อมขวาง โดยทั่วไปหมู่ฟังก์ชันต่างๆจะเข้าแทนที่ภายในกลูโคสที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 3 หรือ 6 การแทนที่นี้จะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เลือกใช้ การเข้าแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลกลูโคสของแป้งอีเทอร์และแป้งอะซิเตท ทำให้โครงสร้างแป้งเปลี่ยนไป มีผลให้เกิดการยับยั้งการคั่นตัวของเม็ดแป้งและทำให้แป้งมีความหนืดคงตัว แสดงลักษณะสแตบิไลซ์สตาร์ช (stabilized starch)

โดยปกติ การตัดแปรงทางเคมีด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น จะส่งผลให้แป้งที่ได้มีสมบัติดังนี้

1. มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ
2. มีการพองตัว การละลายและความชื้นมากกว่าแป้งดิบ
3. ความหนืดมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณการเข้าแทนที่ของสารเคมีและขนาดโมเลกุล แต่ทั้งนี้จะไม่แปรผันในทางเดียวกัน
4. ให้สมบัติการคงทนต่อการคั่นตัว ณ อุณหภูมิต่ำ



นอกจากการตัดแปรรูปด้วยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลของแป้งแล้ว ยังมี การตัดแปรรูปทางเคมีด้วยวิธีอื่นๆอีก ได้แก่

#### การตัดแปรรูปแป้งด้วยกรด

วิธีนี้เป็นการนำเอาเม็ดแป้งมาให้ความร้อน ณ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ เจลาติไนเซชันในสารละลายกรดเจือจาง ซึ่งทำให้บางส่วนของโมเลกุลแป้งเกิดการไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ความหนืดลดลง แต่ให้ความแข็งแรงของเจลดีขึ้น และสารละลายที่ได้มีความใสมากขึ้น

#### การทำแป้งออกซิไดซ์

วิธีการคล้ายกับการตัดแปรรูปแป้งด้วยกรด เพียงแต่ใช้อัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ แทน กรดไปทำลายโมเลกุลของแป้ง ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันแป้งชนิดนี้จะให้เจลที่มีลักษณะนิ่มกว่าวิธี ข้างต้น

### 2.3.3 วิธีการตัดแปรรูปทางเทคโนโลยีชีวภาพ

การตัดแปรรูปทางเทคโนโลยีชีวภาพเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญของแป้ง คือ อะไมโลสและอะไมโลเพกติน โดยทั่วไป แป้งมีอะไมโลสประมาณ 20-30% สำหรับแป้งบางชนิด อาจมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าปกติหรือไม่มีเลย จึงทำให้แป้งดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับ การใช้งานแตกต่างกันไป ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงพันธุ์พืชที่นำมาผลิตแป้ง 2 ชนิด ดังนี้

#### แป้งอะไมโลสสูง (high amylose starch)

แป้งอะไมโลสสูง เป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงซึ่งพบในพืชบางชนิด เช่น อะไมโลเมท ซึ่งเป็นข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 50-80% อันเป็นผลมาจากการ เปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ทำให้ข้าวโพดสายพันธุ์นี้ต่างจากข้าวโพดสายพันธุ์เดิม ดังนั้นจึงทำให้ สมบัติต่างๆของแป้งที่ได้จากอะไมโลเมท แตกต่างจากเม็ดแป้งข้าวโพดสายพันธุ์เดิม โดยรูปร่าง ของเม็ดแป้งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นวงรี มีขนาดเล็ก พองตัวได้ยาก และมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูง กว่าแป้งข้าวโพดพันธุ์ดั้งเดิม เนื่องจากปริมาณอะไมโลสในส่วนโครงสร้างผลึกสูงกว่า และผลึกมี ความคงทนต่อการถูกทำลายในน้ำร้อนมากกว่าแป้งข้าวโพดพันธุ์ดั้งเดิม สามารถผลิตแผ่นฟิล์มที่

มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดี นอกจากนี้ ความยาวสายเฉลี่ยของอะไมโลเพกตินจะยาวกว่าและน้ำหนักโมเลกุลจะน้อยกว่าในแป้งข้าวโพดพันธุ์ดั้งเดิม

#### แวกซีสตาร์ช (waxy starch)

แวกซีสตาร์ช เป็นแป้งที่ประกอบด้วยอะไมโลเพกตินเพียงอย่างเดียว พบในธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ซึ่งเกิดการกลายพันธุ์ เป็นผลให้ธัญพืชดังกล่าวสามารถสังเคราะห์แป้งได้เฉพาะส่วนที่เป็นอะไมโลเพกตินเท่านั้น สมบัติโดยทั่วไปของแป้งชนิดนี้ ได้แก่ ไม่เกิดการคั่วหรือเกิดการคั่วเพียงเล็กน้อย มีความเงามันสูง สามารถชุมน้ำได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น

โดยทั่วไปได้มีการนำแป้งและแป้งดัดแปรมาใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกนั้นได้เริ่มมีการพัฒนาตั้งแต่ปี 1970 โดย Griffin [12-14] เป็นผู้เริ่มใช้แป้งข้าวโพดเป็นสารตัวเติมในฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พบว่า สามารถเติมแป้งลงในพลาสติกได้ไม่เกิน 10% โดยน้ำหนัก และต้องควบคุมความชื้นของเม็ดแป้งให้น้อยกว่า 1% ถ้ามากกว่านี้จะทำให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกเสียไป หรือ ในกรณีของ Ismail และคณะ [15-16] ได้นำแป้งสาคุมมาผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวพบว่า ความแข็งแรงและความสามารถทนแรงดึง ณ จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่มอดูลัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อนำไปย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ยังพบว่า สมบัติเชิงกลต่างๆลดลง สำหรับกรณีของสุดา เกียรติกำจรวงศ์ และคณะ [17] ได้ทดลองเติมโซยาออยล์และเพอร์ริกสเตียเรตลงในพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีแป้งมันสำปะหลังผสมอยู่ ซึ่งพบว่า สารทั้งสองชนิดช่วยทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกดังกล่าวเป็นไปได้ดีขึ้น

ต่อมาความพยายามทำให้แป้งสามารถเข้ากันได้กับพลาสติกมากขึ้น ด้วยการดัดแปรโครงสร้างของแป้ง เช่น การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแป้งมันฝรั่งด้วยฟทาลิกแอนไฮไดรด์ได้เป็นแป้งฟทาลेट แล้วนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [18] พบว่า การแทนที่แป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยแป้งดัดแปรดังกล่าวที่มากกว่า 30% ทำให้ความแข็งแรงและความทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่ามอดูลัสลดลง เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรผสมอยู่หรือการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแป้งมันฝรั่งด้วยกรดไขมัน ได้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันของแป้งมันฝรั่งผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเช่นกัน [19] พบว่า

แบ่งตัดแปรชนิดนี้แสดงพฤติกรรมการเป็นพลาสติกไซเซอร์ภายใน ผลคือ ผลิตภัณฑ์ที่มีความทนแรงดึงและค่าความยืดดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบผลิตภัณฑ์ของแบ่งที่ไม่ผ่านการตัดแปร และยังสามารถเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หรือการใส่สารช่วยผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของพลาสติกกับแบ่ง เช่น การเติมโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับกรดอะคริลิก ในของผสมแบ่งกับพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ช่วยทำให้แบ่งกับพลาสติกสามารถเข้ากันได้มากขึ้น [20]

สืบเนื่องจากที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนากราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างแบ่งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้งานในหลายๆด้าน เช่น สูดา เกียรติกำจรวงศ์ และคณะ ได้พัฒนาแบ่งมันสำปะหลังที่กราฟต์ด้วยพอลิอะคริลาไมด์ [21-26] และแบ่งมันสำปะหลังที่กราฟต์ด้วยโคพอลิเมอร์ของพอลิอะคริลาไมด์กับกรดมาเลอิก [27] ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพอลิเมอร์ดูดน้ำสำหรับการเกษตร เป็นต้น สูดา เกียรติกำจรวงศ์ และคณะ จึงได้นำแบ่งมันสำปะหลังที่กราฟต์ด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่างๆมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง และได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีสมบัติต่างๆดีเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่เพียงอย่างเดียว ตัวอย่างเช่น การเติมแบ่งมันสำปะหลังที่กราฟต์ด้วยพอลิไทรินลงในพอลิไทริน [28] หรือการเติมแบ่งมันสำปะหลังที่กราฟต์ด้วยพอลิอะคริลิกแอซิด แล้วนำมาตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิเอทิลีนออกไซด์ลงในพอลิเอทิลีน [29] เป็นต้น

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าเม็ดแบ่งมีแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์และมารวมตัวกันได้ง่ายกว่าการกระจายตัวในพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทั้งนี้เป็นเพราะแบ่งมีความเป็นไฮโดรฟิลิก ในขณะที่พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นิยมใช้นั้นมักเป็นไฮโดรโฟบิก จึงต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการเติมสารช่วยผสม หรือการตัดแปรโครงสร้างของแบ่งด้วยวิธีการต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า พลาสติกที่ได้มีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพเพียงบางส่วน (partially biodegradable) จึงได้เกิดแนวคิดซึ่งนำไปสู่การพัฒนาพลาสติกซึ่งใช้แบ่งแต่เพียงอย่างเดียวเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด (fully biodegradable) [30] อาทิเช่น

Glenn และ Hsu [31] ได้ศึกษาโฟมแบ่งสาธิตจากกระบวนการอัด พบว่า โฟมแบ่งที่ได้มีค่าความแข็งแรงที่สูง และลดลงเมื่อนำมาเก็บภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อนำไปอบ โดยมีการสัมผัสอาหารที่มีความมัน ความชื้นต่ำและความชื้นสูง พบว่า ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นจะสูญเสียไป และยังเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของโฟมแบ่ง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อาจเนื่องมา

จากความชื้นที่มีอยู่ในแป้ง จึงมีการเติมมอลโทสลงไป ผลคือสามารถลดการดูดความชื้นของโพลิแป้งได้ แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาปมที่เกิดขึ้นได้

Zhiqiang และคณะ [32] ได้ศึกษาแป้งเทอร์โมพลาสติกจากแป้งสาลีผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [แป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch) หมายถึง แป้งหลอมเหลวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปที่มีพอลิแซ็กคาไรด์เป็นพอลิเมอร์เฟส] พบว่า ที่ปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 15% และมีน้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าการใช้เอทิลีนไกลคอล พรอพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าสมบัติเชิงกลไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามที่คาดไว้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากรอยเชื่อมประสานระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับแป้งยังไม่ดีพอ

งานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากแป้งหรือแป้งดัดแปรที่มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติดังกล่าวด้วยการเติมสารเสริมแรงลงไป เช่น ในกรณีของ Angles และ Dufresne [33,34] ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งเวกซีและผลึกเซลลูโลสขนาดเล็กที่ได้จากการสกัดสัตว์ทะเลชนิดหนึ่ง เรียกว่า Tunicin Whiskers พบว่าการมีผลึกเซลลูโลสขนาดเล็กในเนื้อฟิล์มแป้ง ทำให้การบวมตัวของฟิล์มแป้งลดลง ความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณผลึกเซลลูโลสขนาดเล็กมากขึ้น ความสามารถในการยึดดึงจะลดลง

นอกจากนี้ Curvelo และคณะ [35] ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวโพด ในที่นี้ Curvelo และคณะได้เตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกจากการผสมแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอล 30% จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 8 นาที พร้อมทั้งผสมเส้นใยเซลลูโลส พบว่า การมีเส้นใยเซลลูโลส 16% โดยน้ำหนัก ให้ความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก  $5 \pm 1$  เป็น  $11 \pm 2$  และ  $125 \pm 4$  เป็น  $320 \pm 70$  MPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแป้งเทอร์โมพลาสติกผสมกลีเซอรอล นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวโพดและเส้นใยเซลลูโลสแล้ว Curvelo และคณะ [36] ได้ศึกษาผลของการเติมเกลาลินลงในแป้งเทอร์โมพลาสติกอีกด้วย พบว่า การเพิ่มปริมาณเกลาลิน ให้ความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และเพิ่มมากที่สุดที่ปริมาณเกลาลิน 50 phr จากนั้นค่าเหล่านี้จะลดลงเมื่อปริมาณเกลาลินเพิ่มขึ้น ส่วน

ความสามารถในการยึดติดลดลงจาก  $31 \pm 11$  เป็น  $12 \pm 3$  เมื่อเพิ่มปริมาณเกล็ดเป็น 60 phr นอก  
จากนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำจะลดลงเมื่อปริมาณเกล็ดมีมากขึ้น

จากตัวอย่างที่ผ่านมาการเตรียมแบงเทอร์โมพลาสติกจำเป็นต้องเตรียมที่อุณหภูมิสูง  
ประมาณ 170 องศาเซลเซียส และมีการใช้กลีเซอรอลช่วยให้แบงเกิดการบวมตัวและหลอมรวม  
กันได้ง่าย ซึ่งอุณหภูมิที่สูงเสี่ยงต่อการสลายตัวของแบง ดังนั้น การทำให้แบงเกิดการบวมตัวและ  
ละลายได้ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า  
การเตรียมแบงมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [37,38] โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์  
เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ทำให้แบงสามารถบวมตัวและละลายได้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ  
การมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในโครงสร้างของแบง ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้จากแบงมีลักษณะ  
ทางกายภาพที่ดีขึ้น แต่มีสมบัติเชิงกลที่ยังไม่ดีนัก

ด้วยเหตุดังกล่าว การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยการเติมสารเสริมแรง  
เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบ จึงเป็นแนวทางหนึ่ง que เพิ่มโอกาสการใช้งานของแบงดัดแปรด้วย  
มาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยกรรมวิธีข้างต้น

สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงในการเตรียมฟิล์มแบงหรือวัสดุเชิงประกอบจากแบง คือ  
การควบคุมสภาวะแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ให้คงที่ เนื่องจากโครงสร้างของแบงมีหมู่  
ไฮดรอกซิล สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำในบรรยากาศได้ ทำให้สมบัติต่างๆของ  
ฟิล์มแบงหรือวัสดุเชิงประกอบจากแบงเปลี่ยนแปลงไป ดังเห็นได้จากตัวอย่างที่ผ่านมา [34] พบว่า  
ฟิล์มแบงที่ปริมาณ Tunicin Whiskers ต่างๆกัน ตั้งแต่ 0 จนถึง 25% โดยน้ำหนัก ปริมาณ  
ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 35% จะให้ค่าความแข็งแรง ความทนแรงดึง ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสยืดหยุ่น  
ที่มากที่สุดเกือบทุกกรณี เมื่อเทียบกับฟิล์มแบง ณ เงื่อนไขเดียวกัน แต่มีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์  
ที่มากกว่า

นอกจากความชื้นแล้ว องค์ประกอบอีกอย่างที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มแบงหรือวัสดุ  
เชิงประกอบจากแบงคือ พลาสติกไฮเซออร์ที่เติมลงไป ชนิดของพลาสติกไฮเซออร์ที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำมัน  
หรือสารโมเลกุลเล็ก เช่น กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และน้ำ เป็นต้น Stading และคณะ [39] ได้ศึกษา  
ผลของความชื้นต่อการเหนียวทำให้โครงสร้างของฟิล์มอะไมโลสและฟิล์มอะไมโลเพกตินเปลี่ยน  
ไป และมีการเปรียบเทียบผลของฟิล์มที่มีการเติมและไม่มีการเติมกลีเซอรอล พบว่า ฟิล์ม

อะไมโลสที่มีการเติมกลีเซอรอล จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและโครงสร้างของส่วนที่เป็นอสัณฐานให้มีความพรุนมากขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้เกาลินเป็นสารเสริมแรง เนื่องจากเป็นสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ หาได้ง่าย ราคาไม่แพง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซอรอลลงในผลิตภัณฑ์ที่ได้อีกด้วย ทั้งนี้ พลาสติกไซเซอรอลที่ใช้คือ กลีเซอรอล

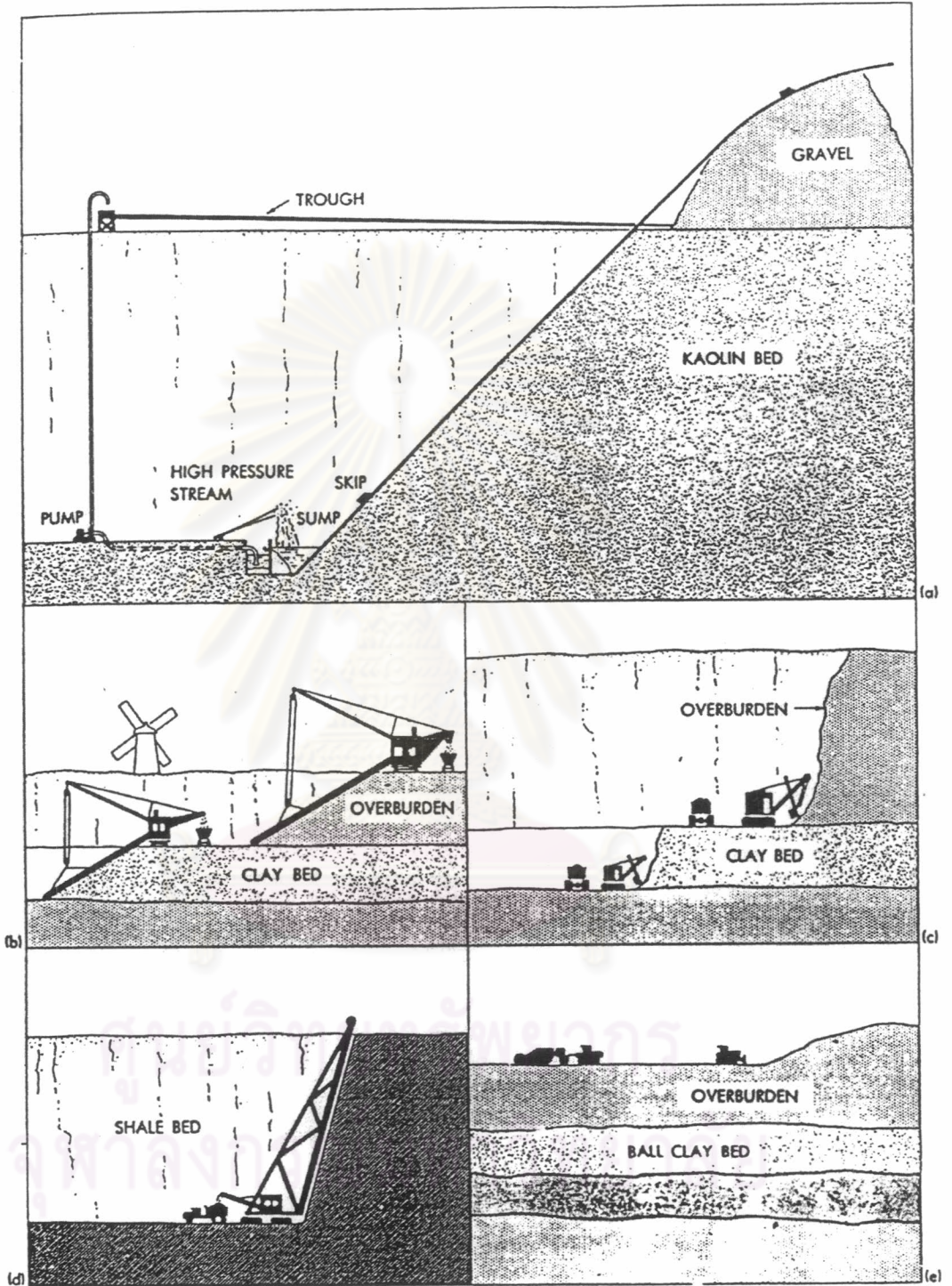
## 2.4. เกาลิน [40]

คำว่า เกาลิน (kaolin) หรือดินขาว มาจากภาษาจีนแปลว่าภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งเกิดของดินขาวในประเทศจีน เกาลินหรือดินขาวมีอยู่หลายชนิดแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดที่อยู่บนผิวโลก เกาลินส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งฝังของหินเดิม (residual clay) หรือหินแกรนิตที่อยู่ภายใต้ภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยแหล่งของเกาลินนอกจากจะขุดพบตามเทือกเขาแล้ว ยังมีบางส่วนที่อยู่ตามที่ราบลุ่ม

เกาลินมีสูตรโครงสร้างเป็น  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาที่มีน้ำอยู่ โดยทั่วไปเกาลินที่ขุดขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมีอยู่ 3 ชนิด คือ

1. ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์และมีความหนไฟสูง สามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้
2. ดินขาวอีกชนิดหนึ่งเป็นเกรดที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำสี ยาง ยาน้ำแมลง ปุ๋ยและอื่นๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี แต่ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต
3. ดินขาวที่เป็นดินสอพองซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวชอล์ก (chalk) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) เกิดจากผลึกของหินปูนตามธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียด สีขาว บางครั้งเป็นสีชมพูและสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งใช้เป็นเนื้อดินปั้นขึ้นรูปไม่ได้ ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์

เมื่อขุดสำรวจจนทราบบริเวณของแหล่งดินแล้ว จะขุดผิวหน้าซึ่งปกคลุมแหล่งดินออกแล้วจึงขุดดินขาวส่งไปยังโรงงานแยกดินต่อไป ซึ่งภาพการทำเหมืองดินแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพการทำเหมืองกาอลิน [41]

## 2.4.1 ชนิดของดินเหนียว

### 2.4.1.1 กลุ่มกาโอลินไนท์ (kaolinite)

แร่ดินกลุ่มนี้มีโครงสร้างของผลึกดินเป็นแผ่นบางๆ เรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ เปียดอัดกันแน่น โครงสร้างของผลึกประสานกันแข็งแรง แร่อื่นไม่สามารถที่จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกได้ ดังนั้นกาโอลินไนท์จึงมีความบริสุทธิ์มาก

### 2.4.1.2 กลุ่มฮอลลอยไซต์ (holloysite)

แร่ดินกลุ่มนี้มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากแร่กาโอลินไนท์ โดยผลึกที่เป็นแผ่นเกิดการม้วนตัวเป็นหลอดหรือกลายเป็นผลึกรูปแท่ง โครงสร้างของผลึกเกิดจากการเรียงตัวไม่เป็นระบบแตกต่างจากโครงสร้างกาโอลินเดิม ฮอลลอยไซต์ คือ ดินขาวที่มีความเหนียวและความบริสุทธิ์น้อยกว่ากาโอลินไนท์

### 2.4.1.3 กลุ่มอิลไลต์ (illite)

แร่ดินกลุ่มนี้มีอีกชื่อหนึ่งว่า กลุ่มแร่ไมกา ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากกาโอลินไนท์ โดยสิ้นเชิง ผลึกของดินไม่ได้เรียงตัวซ้อนกันด้วยแร่ชนิดเดียวกัน แต่มีผลึกของแร่อื่นเข้ามาแทรกอยู่ในระหว่างผลึกด้วย แร่อิลไลต์เป็นแร่ดินขาวที่มีไมกาอยู่สูง จึงมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าดินขาวบริสุทธิ์ และมีผลึกที่หยาบกว่าแร่เซอร์ไซท์

### 2.4.1.4 กลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์ (montmorillonite)

แร่ดินกลุ่มนี้มีโครงสร้างผลึกไม่แน่นอน เม็ดของผลึกดินมีความละเอียดมาก โครงสร้างของผลึกแตกกันอยู่หลวมๆ ดังนั้น น้ำ อินทรีย์สาร และแร่ธาตุจึงแทรกเข้าไปตามชั้นของผลึกดินได้ และมีปริมาณของแร่ธาตุอื่นๆ เข้ามาปะปนอยู่ในดินมาก ทำให้ดินไม่บริสุทธิ์ แต่มีความเหนียวสูงและมีเนื้อดินละเอียดมาก ตัวอย่างของแร่ดินกลุ่มนี้ได้แก่ ดินเบนโทไนท์ (bentonite)



## 2.4.2 กระบวนการเตรียมดิน

### 2.4.2.1 การแยกอนุภาคดินโดยใช้ลม

เป็นการแยกหรือคัดขนาดของอนุภาคโดยใช้ลมเป่าผ่านอนุภาคดิน อนุภาคที่เล็กกว่าจะถูกเป่ามาเก็บในถังเก็บ ส่วนอนุภาคที่ใหญ่จะตกลงสู่ถังเก็บด้านล่าง ส่วนสิ่งเจือปนก็จะถูกเป่าทิ้งไป การแยกโดยวิธีนี้คงความเป็นธรรมชาติของดินไว้สูง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือผันแปรไป เป็นวิธีที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความบริสุทธิ์หรือลักษณะเฉพาะตัวมากนัก โดยพบว่า อนุภาคดินที่ผ่านการแยกแล้ว ยังคงมีแร่ชนิดอื่นเจือปนอยู่ เช่น ซิลิกา ไมกา มอนท์มอริลโลไนท์ และอื่นๆ

### 2.4.2.2 การแยกอนุภาคดินโดยใช้น้ำ

เป็นการนำดินมากระจายตัวในน้ำหรือใช้น้ำเป็นตัวกลางในการพัดพาอนุภาคที่มีขนาดต่างกันออกจากกัน โดยอนุภาคที่ละเอียดจะถูกกระแสน้ำพาไป ส่วนอนุภาคที่ใหญ่กว่าจะจมลง การเตรียมดินโดยวิธีนี้มีการกำจัดซิลิกาและสิ่งเจือปนอื่นๆออก จากนั้นอนุภาคดินจะถูกดูดไปตกตะกอนในถังพัก ณ จุดนี้ ได้มีการนำขั้นตอนการสกัดมาใช้ เพื่อสกัดให้ได้ดินเกาลินที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยมีการเติมโซเดียมไทโอซัลไฟด์และสังกะสี เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออกหรือการล้างดินนั่นเอง จากนั้นนำดินไปปั่น อบไล่น้ำและสารเคมีออก เหลือส่วนของอนุภาคดินที่หยาบและละเอียดอยู่ ส่วนที่หยาบซึ่งถูกคัดแยกออกมาเรียกว่า ฟิลเตอร์เค้ก (filter cakes) และส่วนที่ละเอียดถูกทำให้แห้งด้วยวิธีการพ่นเป็นฝอยและอบแห้ง

### 2.4.2.3 การสกัดดิน

หลังจากที่ทำการคัดแยกดินโดยใช้น้ำแล้ว ขั้นตอนนี้เป็นการทำงานให้อนุภาคดินที่ได้มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีความพิถีพิถันมากขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ด้วยการกำจัดเหล็กไททาเนียมออกไซด์ที่ติดกับอนุภาคดินออก โดยอาศัยค่าความแตกต่างทางแม่เหล็กของสารทั้งสองชนิด ทั้งนี้เหล็กไททาเนียมออกไซด์เป็นบ่อเกิดของสีแดงไปจนถึงสีดำของดิน

#### 2.4.2.4 การเผาดิน

การเผาเป็นการเตรียมเกลดินอีกรูปวิธีหนึ่ง ด้วยการให้ความร้อนกับอนุภาคเกลดินไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำที่อยู่ในโครงสร้าง เป็นผลให้ความเป็นผลึกลดลง และอนุภาคหดเล็กลง ซึ่งการเตรียมโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับการนำเกลดินดังกล่าวไปใช้ในงานที่ต้องการสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

#### 2.4.2.5 การตัดแปรพื้นผิวดิน

การตัดแปรพื้นผิวของเกลดินจะใช้เมื่อต้องการปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การทำให้อนุภาคเกลดินชอบน้ำมากขึ้น โดยอาศัยสารเคมีบางอย่างทำปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคเกลดินสามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์หรือของผสมได้ดีขึ้น แต่การตัดแปรดังกล่าวต้องคำนึงถึงผลทางด้านอื่นๆที่ตามมาด้วย เช่น สมบัติทางไฟฟ้า ความต้านทานน้ำ ความสามารถในการกระจายตัวที่ลดลง เป็นต้น

#### 2.4.2.6 การแยกแผ่นอนุภาคดิน

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อนุภาคของเกลดินอยู่เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ในวิธีการนี้เป็นการแยกแผ่นของเกลดินดังกล่าวออกจากกัน โดยอาศัยเม็ดพลาสติกเล็กๆขัดสีกับอนุภาค ทำให้แผ่นดังกล่าวหลุดออก

### 2.4.3 สมบัติของเกลดิน

#### 2.4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของเกลดิน นอกจากจะขึ้นกับชนิดของแร่ดินแล้ว ยังขึ้นกับกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมดินด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติโดยทั่วไปของเกล็ดหินชนิดต่างๆ

สมบัติ	การแยกอนุภาคดินโดยใช้ลม		การแยกอนุภาคดินโดยใช้น้ำ		
	หยาบ	ละเอียด	หยาบ	ปานกลาง	ละเอียด
ความถ่วงจำเพาะ	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58
ความเป็นกรด/ด่าง (20 % ในน้ำ)	3.8 – 5.5	3.8 – 5.5	3.8 – 7.5	3.8 – 7.5	3.8 – 7.5
ความแข็ง (Mohs)	2	2	2	2	2
ดัชนีหักเหเฉลี่ย	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )	12 – 18	22 – 26	6 – 10	12 – 16	18 – 26
การดูดซับน้ำมัน ASTM D-281	30 – 35	35 – 40	25 – 30	32 – 45	40 – 50
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $\mu m$ )	1.1 – 1.8	0.3 – 0.5	4 – 9	0.7 – 2.0	0.2 – 0.7
ความสว่าง (%)	70 – 84	74 – 84	79 – 85	85 – 88	87 – 92

ตารางที่ 2.4 สมบัติโดยทั่วไปของเกล็ดหินชนิดต่างๆ (ต่อ)

สมบัติ	การแยกแผ่นอนุภาคดิน		การเผาดิน		การดัดแปรพื้นผิวดิน	
	หยาบ	ละเอียด	หยาบ	ละเอียด	หยาบ	ละเอียด
ความถ่วง จำเพาะ	2.58	2.58	2.50	2.63	2.58 – 2.63	2.58
ความเป็นกรด/ ด่าง (20 % ใน น้ำ)	4.5 – 7.5	4.0 – 7.5	4.0 – 6.0	4.0 – 6.0	4.0 – 9.0	-
ความแข็ง (Mohs)	2	2	4 – 6	6 – 8	2 – 8	2
ดัชนีหักเหเฉลี่ย	1.56	1.56	1.62	1.62	1.56 – 1.62	1.56
พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )	10 – 14	18 – 22	5 – 12	5 – 19	8 – 24	-
การดูดซับน้ำ น้ำมัน ASTM D-281	40 – 55	40 – 50	45 – 70	45 – 90	28 – 90	-
ขนาดอนุภาค เฉลี่ย ( $\mu m$ )	1 – 2.5	0.7	1.5 – 2	0.9 – 3	0.2 – 3	0.5 – 4.8
ความสว่าง (%)	84 – 88	88 – 92	82 – 86	90 – 96	74 – 92	70 – 87

#### 2.4.3.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ในการพิจารณาขนาดอนุภาคของเกาลินไม่สามารถให้ค่าที่เฉพาะเจาะจงได้ อันเป็นผลมาจากการเตรียมเกาลินดังวิธีที่ดังกล่าวมาในข้างต้น ดังนั้น โดยทั่วไปจะรายงานเป็นค่าเฉลี่ยของอนุภาค เช่น เกาลินที่มีขนาดเฉลี่ย 7 ไมครอน หมายความว่า ในเกาลิน 100% จะมีขนาดอนุภาคน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 ไมครอนอยู่มากกว่า 50%

#### 2.4.3.1.2 รูปร่างของอนุภาค

รูปร่างของอนุภาคเกาลินส่วนใหญ่ขึ้นกับการเตรียมเกาลิน โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่น มีบ้างที่เป็นหลอดหรือแท่ง ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานต่างๆกัน

#### 2.4.3.1.3 พื้นที่ผิว

ในแร่ที่ใช้เป็นสารตัวเติมโดยเฉพาะไมกา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกาลินแล้ว เกาลินมีพื้นที่ผิวสูงสุด ซึ่งการมีพื้นที่ผิวมากจะส่งผลกับสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เช่น การเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรง ความสามารถในการรับแรง เป็นต้น

#### 2.4.2.1.4 ความแข็ง

เกาลินที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมีลักษณะที่นิ่มกว่าเกาลินที่ถูกดัดแปรไป เช่น พวกแคลซีเนตที่เตรียมได้จากการเผาเกาลินที่อุณหภูมิสูง น้ำในโมเลกุลบางส่วนหลุดออกมา ทำให้ความแข็งของเกาลินประเภทนี้สูง ซึ่งค่าความแข็งของเกาลินมีหน่วยเป็นมอร์ (Mohs)

#### 2.4.3.2 สมบัติทางเคมี

เกาลินให้ความต้านทานการสึกกร่อนที่ดีกว่ากับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ เมื่อเทียบกับไม่ใส่เกาลิน ความเป็นกรดที่หลงเหลือในเกาลินที่ผ่านกระบวนการดัดแปรส่งผลให้เกิดกระบวนการแตกสลายของสารจำพวกอีพอกซีและไวนิล ดังนั้นในการนำเกาลินมาใช้งานควรมีการ

ปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วย นอกจากนี้ ยังยอมรับว่าเกาลินปลอดภัยในผลิตภัณฑ์ที่มีการสัมผัสกับอาหาร

### 2.4.3.3 สมบัติทางความร้อน

ปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน (dehydroxylation) ของเกาลินเกิดขึ้น เมื่อมีการนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส (1022 องศาฟาเรนไฮต์) ผลคือ เกาลินจะสูญเสียน้ำในโมเลกุล เกิดการหลอมรวมตัวใหม่ของผลึกเป็นเมตาเกาลิน ซึ่งการที่เกาลินเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงส่งผลที่ดีกับการนำมาใช้กับวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเนื้อ เนื่องจากกระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า การรบกวนของอุณหภูมิจึงมีน้อย

### 2.4.4 การใช้งานของเกาลิน

เกาลินเป็นสารอนินทรีย์ชนิดหนึ่งในหลายๆชนิดที่มีการใช้ในงานพลาสติก นอกเหนือจากงานเซรามิก ทั้งเพื่อเป็นสารตัวเติมหรือสารเสริมแรง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน มีการเติมเกาลินในพอลิเมอร์สังเคราะห์หลายชนิด ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก เช่น การใช้เกาลินแทนแอสเบสทอสในพีนอลิกคอมปาว์น เพื่อผลิตสันรองเท้าและเบาะ เนื่องจากเกาลินมีความคงตัวดี เป็นสารเสริมแรงและลดการสึกกร่อน มีการใช้เกาลินผสมใยแก้วและเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1700 องศาฟาเรนไฮต์ เกิดเป็นใยแก้วที่ทนความร้อนสูง สำหรับใช้ในผ้าเปดานทนไฟ และยังสามารถผสมลงในพอลิยูรีเทนและอีพอกซีเรซินได้อีกด้วย

นอกจากนี้ ยังมีการเติมเกาลินในไนลอน 6/6 ทำให้มอดูลัสเพิ่มขึ้น การดูดความชื้นลดลง และยังคงมีความคงตัวสูงภายใต้อุณหภูมิสูง ในขณะที่การเติมเกาลินในพอลิพรอพิลีน ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ทั้งนี้ยังต้องขึ้นกับขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคอีกด้วย

Dubois และคณะ [42] ได้ศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม ได้แก่ พอลิเอทิลีนกราฟต์ ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อการประสานระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเกาลิน พบว่าปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้นทำให้มอดูลัสสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ความทนแรงดึงและความสามารถในการยืดดึง ณ จุดขาดลดลง สำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดที่มีดัชนีการไหลสูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กลับทำให้มอดูลัสและความทนแรงดึง

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดที่มีดัชนีการไหลต่ำกว่า การเติมเกาליนลงไป มอดุลัสและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมพอลิเอทิลีนกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงไปไม่ได้ทำให้มอดุลัสและความทนแรงดึงเปลี่ยนแปลงมากนัก

Pivako และคณะ [43] ได้ศึกษาของศาการเกิดผลึกและพฤติกรรมการหลอมของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ไม่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคเกาליน และการมีอนุภาคเกาליนในเนื้อของพลาสติก ทำให้ของศาการเกิดผลึกเพิ่มสูงขึ้น แต่ลดลงเมื่อเติมสารเชื่อมโยง (coupling agent)

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการเติมเกาליนในแป้งมันสำปะหลังที่ตัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งใช้ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์และเกาליนต่างๆกัน โดยศึกษาผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ตัดแปรในแป้ง ปริมาณเกาליนที่เติมลงไป และการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความสามารถในการยืดดึง ณ จุดขาด และมอดุลัสยืดหยุ่น เป็นต้น รวมทั้งลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และการดูดซึมความชื้นอีกด้วย ทั้งนี้การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะใช้วิธีการหล่อในแม่แบบ

## 2.5 กระบวนการหล่อพลาสติก [44]

การหล่อ (casting) เป็นกระบวนการขึ้นรูปเพื่อทำการผลิตชิ้นงานพลาสติก โดยมีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมพลาสติกหลอม หรือเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของเทอร์โมเซตหลอมในขณะที่ทำการขึ้นรูป การขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ ชิ้นงานพลาสติกได้รับอิทธิพลจากความคั่นน้อยมาก กล่าวคือ ชิ้นรูปที่ความดันบรรยากาศหรือที่ความดันต่ำ การไหลส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำและทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีการขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธีอื่นๆ เช่น การฉีดเข้าเบ้า หรือการอัดรีด ซึ่งต้องทำที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อผลักดันให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าเบ้าหรือผ่านหัวตาย เนื่องจากการใช้ภาวะการผลิตที่ค่อนข้างรุนแรง จึงทำให้ความคั่นที่ตกค้างมีผลต่อสมบัติต่างๆของชิ้นงาน

การหล่อพลาสติกเป็นเทคนิคที่ใช้กันแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกหลายชนิด เช่น ฟิล์มและแผ่นพลาสติกชนิดต่างๆ การหล่อชิ้นงานพวกเฟืองและเกียร์พลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตชิ้นส่วนบางประเภทไม่สามารถใช้เทคนิคการขึ้นรูป

ชนิดอื่นๆได้ นอกจากการหล่อ กล่าวคือ การห่อวัสดุกึ่งตัวนำด้วยพลาสติก (encapsulation coating) และการใช้พลาสติกเข้าไปอุดในช่องว่างของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (potting)

การหล่อเป็นที่รู้จักกันมากที่สุดได้แก่ การหล่อแผ่นอะคริลิก ส่วนการหล่อพลาสติกชนิดอื่นๆที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรม เช่น การหล่อไนลอน พอลิยูรีเทน และฟีนอลิก เป็นต้น

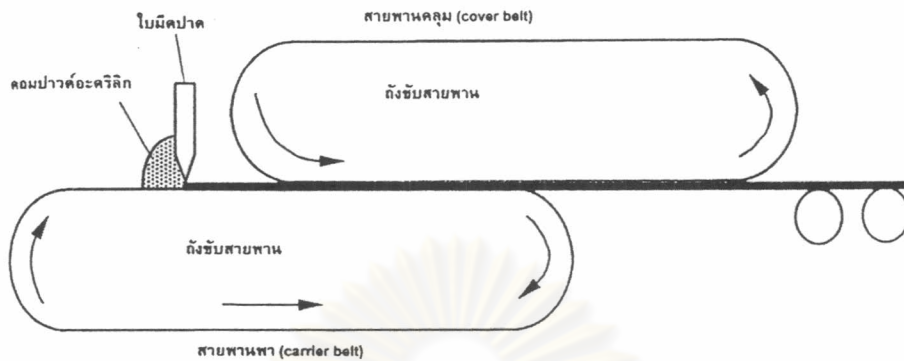
โดยทั่วไปกระบวนการหล่อสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (continuous casting process) โดยทำในสายพานลำเลียงสองเส้นที่กำลังเคลื่อนที่ และกระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่อง (batch casting process) หรือที่นิยมเรียกว่า กระบวนการหล่อแบบเซลล์ (cell casting process) โดยทำในบ้ำหล่อหรือในเซลล์

### 2.5.1 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (continuous casting process)

เป็นการหล่อโดยส่งของผสมเข้าเครื่องหล่อที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยมีสายพานเป็นตัวพาชิ้นงาน อาจมีการใช้สายพานสองชุด สายพานชุดล่าง เรียกว่า สายพานพา (carrier belt) ซึ่งมีหน้าที่ในการนำวัสดุเข้าสู่ช่องว่างที่อยู่ระหว่างสายพานชุดนี้กับสายพานคลุม (cover belt) ซึ่งอยู่ด้านบน ดังรูปที่ 2.10 โดยสายพานทั้งสองเส้นนี้ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวมัน ที่การให้ความร้อนแก่สายพาน โดยการใช้น้ำร้อนไหลผ่าน ใช้อากาศร้อน หรือตัวให้ความร้อนไฟฟ้า ส่วนการหล่อเย็น ทำได้โดยการใช้ไอน้ำเย็นหรืออากาศเย็น พลาสติกที่นิยมใช้วิธีนี้ในการขึ้นรูป คือ อะคริลิก

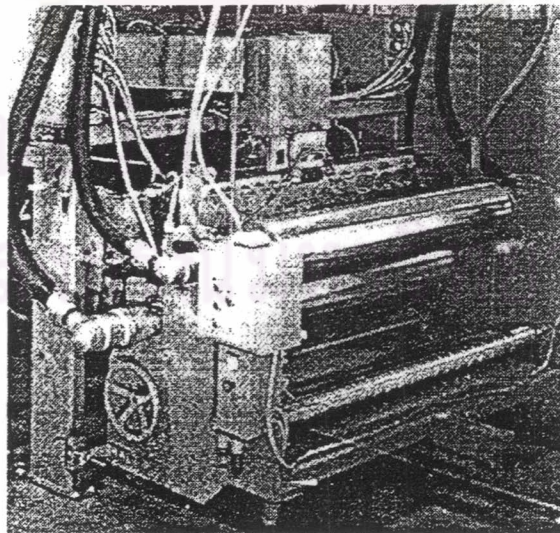
แผ่นพลาสติกจากการหล่อแบบนี้จะมีสมบัติด้านแสงไม่ดีเท่าแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากมีการดึงในขณะที่ทำการขึ้นรูป ทำให้เกิดความเค้นบนชิ้นงานเล็กน้อย

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 เครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง (continuous casting process) [44]

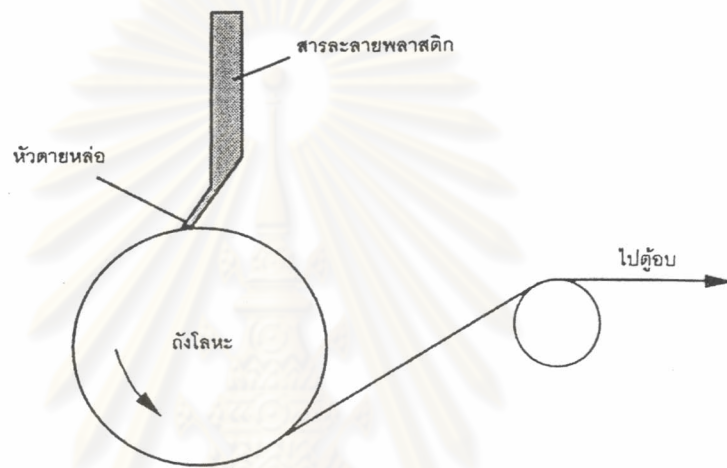
นอกจากการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยใช้กระบวนการดังกล่าวแล้ว การหล่อฟิล์มบางก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การใช้หัวตายที่มีลักษณะกว้างแต่มีความสูงน้อยมาก อัดรีดแผ่นพลาสติกหลอมลงบนลูกกลิ้งที่หล่อด้วยน้ำเย็น แล้วดึงแผ่นพลาสติกเพื่อให้เกิดฟิล์ม วิธีนี้สามารถผลิตฟิล์มได้บางมาก ดังรูปที่ 2.11 พลาสติกที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตด้วยวิธีนี้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีน



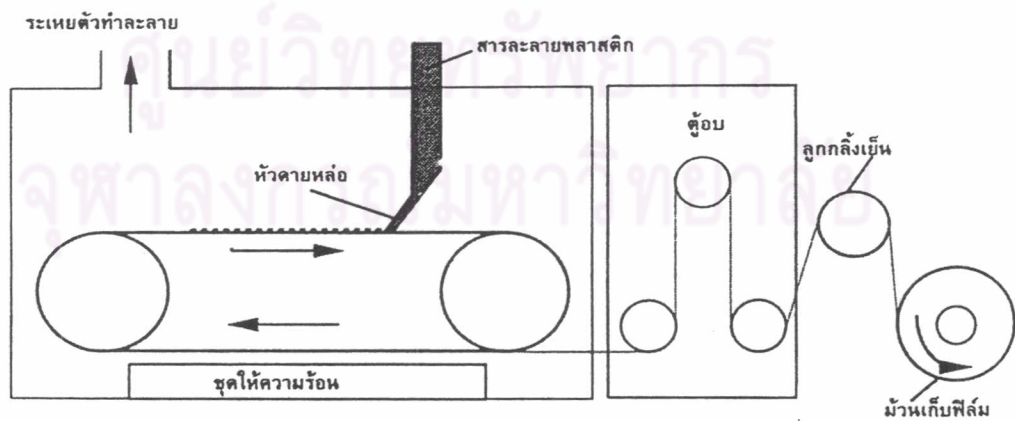
รูปที่ 2.11 การหล่อฟิล์มพอลิเอทิลีน [44]



อีกวิธีหนึ่งเป็นการหล่อฟิล์มโดยใช้พลาสติกที่อยู่ในรูปสารละลาย หรือพลาสติกหลอมที่ละลายในตัวทำละลาย หรือพลาสติกที่ผสมกับพลาสติกไฮเซอรินปริมาณสูง (plastisol) หรืออยู่ในรูปของสารละลาย (dispersion) ของพลาสติก การหล่อเริ่มจากการให้สารเหล่านี้ผ่านหัวตายหล่อ (casting die) ลงบนตัวนำ (carrier) แล้วตามด้วยการระเหยตัวทำละลายออก ตัวนำที่ใช้มีหลายลักษณะ แต่ที่นิยมใช้กันเป็นถึงโลหะ ดังรูปที่ 2.12 หรือเป็นสายพานเหล็กไร้สนิม ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งพลาสติกที่นิยมหล่อด้วยวิธีนี้ คือ เทฟลอน (PTFE) พอลิซัลโฟน (PSU) และพอลิคาร์บอเนต (PC)



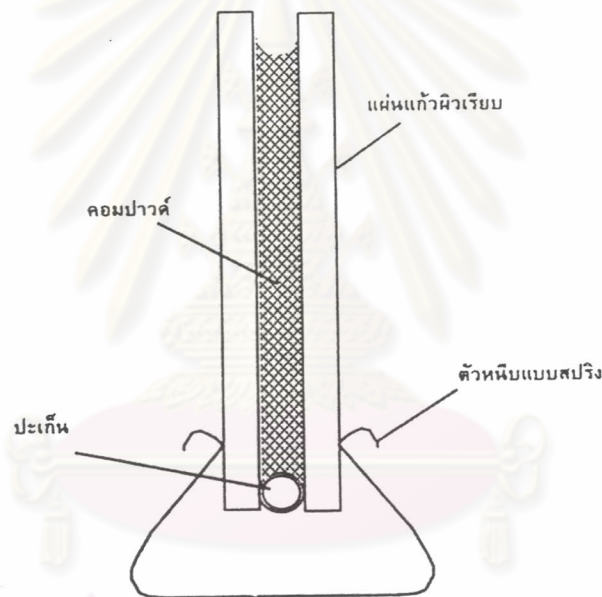
รูปที่ 2.12 การหล่อฟิล์มพลาสติกบนถังโลหะเย็น [44]



รูปที่ 2.13 การหล่อฟิล์มบนสายพานที่มีผิวมัน [44]

## 2.5.2 กระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่อง (batch casting process)

การหล่อวิธีนี้มีการเริ่มใช้งานมาก่อนการหล่อแบบต่อเนื่อง นิยมเรียกกระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่องว่า กระบวนการหล่อแบบเซลล์ (cell casting process) โดยทำในเบ้าหล่อหรือในเซลล์ โดยเบ้าหล่อหรือเซลล์ทำมาจากแผ่นแก้วเรียบและสะอาดประกบกันด้วยตัวหนีบแบบสปริง ดังรูปที่ 2.14 เพื่อให้สามารถเกิดการบีบตัวของแผ่นแก้ว เพื่อขจัดเศษการหดตัวของพลาสติก เนื่องจากการเกิดพอลิเมอไรซ์และการหล่อเย็น หลังจากการผสมสารเติมแต่งลงในโมโนเมอร์หรือพรีพอลิเมอร์แล้ว เติมน้ำของผสมลงในเซลล์ นำไปอบที่อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการบ่ม (cure) พลาสติกที่นิยมใช้วิธีนี้ คือ อะคริลิก



รูปที่ 2.14 การหล่อพลาสติกแบบเซลล์ (cell casting process) [44]

นอกจากแผ่นอะคริลิกแล้ว เฟืองหรือเกียร์ที่ทำจากไนลอนก็เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่นิยมผลิตโดยวิธีการหล่อในเบ้าหล่อ ทั้งนี้เนื่องจากการหล่อทำให้ความดันต่ำและมีการไหลเกิดขึ้นน้อยมาก และยังสามารถผลิตชิ้นงานไนลอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงและองศาของการมีผลึกสูงกว่ามาก จึงทำให้ชิ้นงานไนลอนที่ได้มีสมบัติเชิงกลและความคงตัวของรูปร่างชิ้นงานสูง เป็นต้น

จากวิธีการหล่อพลาสติกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีวิธีการหล่อพลาสติกชนิดอื่นๆ เช่น การหล่อพลาสติกโดยการห่อวัสดุด้วยพลาสติก (encapsulation) และการอุดช่องว่าง (potting) โดยเฉพาะการอุดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นการแปรรูปโดยการหล่อ นิยมใช้กับพลาสติกพวกฟีนอลิก อีพอกซี และพอลิยูรีเทน การห่อทำคล้ายๆกับการเคลือบพลาสติก กล่าวคือ ให้มีชั้นของพลาสติกห่อด้านนอกวัสดุชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารกึ่งตัวนำและตัวนำ ส่วนการอุดช่องว่าง ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ต้องการอุดและเข้าอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น แล้วเทพอลิเมอร์ลงในเบ้าที่สอดใส่ชิ้นวัสดุที่ต้องการอุดไว้ก่อนแล้ว ปล่อยให้เกิดการบ่มประมาณ 1 ชั่วโมง จะได้ชิ้นงานที่อุดด้วยพอลิเมอร์ เป็นต้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย