

การพัฒนาฟิล์มละลายน้ำได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังหรือ สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อการบรรจุสารเคมี

Development of Water Soluble Film for Chemical Packaging from Cassava Starch or Modified Cassava Starch Blended with Polyvinyl Alcohol (PVOH)

คำนำ

ฟิล์มละลายน้ำได้ (water soluble film) เป็นวัสดุบรรจุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีสมบัติในการละลายน้ำ ในปัจจุบันได้รับความนิยมในการใช้บรรจุสารเคมีที่ขณะใช้งานต้องมีการละลายน้ำมีประโยชน์ในการลดอันตรายที่เกิดจากการสัมผัสกับสารเคมีโดยตรงเนื่องจากสารเคมีอันตรายได้เข้ามาสัมผัสกับชีวิตเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยเคมี สารเคมีกำจัดศัตรูพืช สารฟอกขาว ผงซักฟอก เป็นต้น มีผู้ป่วยจำนวนมากไม่น้อยที่ได้รับสารเคมีเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายจนทำให้เกิดอาการต่างๆ ทันที เช่น เกิดผดผื่นที่ผิวหนัง อาการวิงเวียนและมึนงงศีรษะ หรืออาจจะเกิดการสะสมในร่างกายจนเกิดการเจ็บป่วยที่รุนแรงเช่น การทำงานผิดปกติของระบบประสาท มะเร็ง เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าร้อยละ 90 ของสารเคมีจะเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังโดยตรง เช่น การสัมผัสสารเคมีด้วยมือเปล่า โดยอาการที่เกิดจะมีความรุนแรงเพียงใดขึ้นกับชนิด เวลาที่สัมผัส ปริมาณและความเป็นพิษของสารเคมีนั้น (ศักดิ์ดา, 2548) และนอกจากนี้ การใช้ฟิล์มละลายน้ำได้ยังเป็นการช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดจากภาชนะบรรจุอีกทางหนึ่งด้วยเช่นกัน

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผลิตเป็นฟิล์มละลายน้ำได้เนื่องจากมีสมบัติที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ละลายในน้ำได้ดี และยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradation) นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุ เช่น ความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) การยืดตัว (elongation) ความต้านทานแรงฉีกขาด (tear resistance) ความยืดหยุ่น (flexibility) แต่เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่ราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งหาได้ง่ายในประเทศไทยและมีราคาต่ำ สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและมีสมบัติละลายน้ำได้เช่นกัน แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มที่ได้จากสตาร์ชนั้นยังมีสมบัติเชิงกลหลายประการที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

การผสมสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และยังเป็นการช่วยปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มสตาร์ชหรือสตาร์ชดัดแปรโดยการผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อผลิตเป็นฟิล์มละลายน้ำได้ที่เหมาะสมด้านการใช้งานและด้านต้นทุน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสภาวะเหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มละลายน้ำได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
2. ศึกษาชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นฟิล์มละลายน้ำได้เพื่อการบรรจุสารเคมี
3. ทดสอบสมบัติและประสิทธิภาพในการใช้งานของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สำหรับการบรรจุสารเคมี

ขอบเขตงานวิจัย

1. สตาร์ชที่ใช้ในการทดลอง
 - 1.1 สตาร์ชมันสำปะหลัง
 - 1.2 สตาร์ชดัดแปร คือ โพรพ็อกเซนตสตาร์ช หมายถึง สตาร์ชมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยโพรพ็อกซิเจนไฮโดรเจนร้อยละ 10 และออกซิไคส์สตาร์ช
2. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองบรรจุ และทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของฟิล์มสตาร์ช
 - 2.1 ปุ๋ยเกล็ดเคมีละลายน้ำ
 - 2.2 เมล็ดพันธุ์พืชกลุ่กสารเคมี

การตรวจเอกสาร

1. แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้วจะสะสมอาหารในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ สตาร์ชไว้ในราก ความสามารถในการสร้างและสะสมสตาร์ชในรากขึ้นกับพันธุ์ อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนที่จะมีการเก็บเกี่ยว และอื่นๆ ทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจจะแตกต่างกัน องค์ประกอบส่วนใหญ่ในราก คือ แป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 ประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังปริมาณมาก เช่น บราซิล ไนจีเรีย อินโดนีเซีย และประเทศไทย พบว่าประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุด โดยมีกำลังการผลิตมากกว่า 2 ล้านตันมันสำปะหลังต่อปี ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลกและสามารถผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพสูงและราคาถูก (กล้าณรงค์และคณะ, 2542)

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง (มอก. 274-2521)

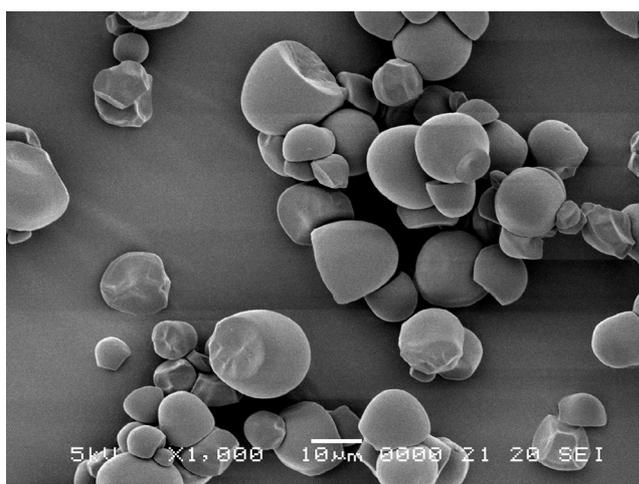
คุณภาพ		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3
ความชื้น (ร้อยละ)	ไม่เกิน	13	14	14
สตาร์ช*	ไม่น้อยกว่า	97.5	96	94
เถ้า*	ไม่เกิน	0.15	0.3	0.5
เถ้าที่ไม่ละลายในกรด*	ไม่เกิน	0.05	0.10	0.15
โปรตีน*	ไม่เกิน	0.3	0.3	0.3
เยื่อ (ลบ.ชม./50 กรัม ก่อนอบแห้ง)	ไม่เกิน	0.2	0.5	1.0
ความเป็นกรด-เบส		4.5-7	3.5-7	3.0-7
ความละเอียด (ร้อยละ)				
แป้งที่ค้างบนตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร	ไม่เกิน	1	3	5

* คำนวณจากน้ำหนักแห้ง (เป็นร้อยละ)

ที่มา: กล้าณรงค์และคณะ (2542)

มันสำปะหลังมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ได้จากการนำหัวมันสำปะหลังสดไปผ่านกระบวนการสกัด แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในอุตสาหกรรมจะมีองค์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยจะพบว่ามีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะเม็ดสตาร์ชของมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดลำแสง ดังแสดงในภาพที่ 1 พบว่า ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก ผิวตรงส่วนที่ถูกตัดออกเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้งอีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ ก้น พบรอยบุ๋ม (hilum) อย่างชัดเจน สตาร์ชแต่ละเม็ดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร และมีความยาวตั้งแต่ 5 ถึง 35 ไมโครเมตร (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2521)



ภาพที่ 1 เม็ดสตาร์ชของมันสำปะหลังจากกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราดลำแสงที่มา: สุดารัตน์ (2548)

1.1 สตาร์ช (starch)

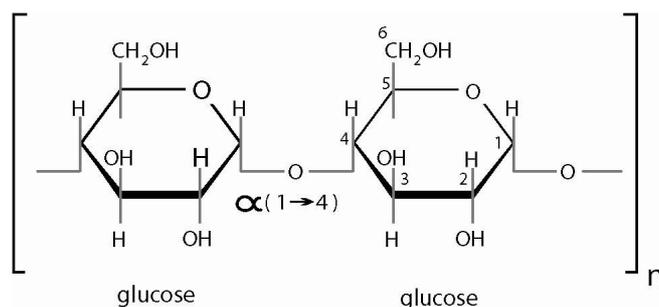
แป้งที่ผลิตได้ทั่วไปและยังมีส่วนประกอบอื่นๆ เจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวร์ (flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็น สตาร์ช และเนื่องจากสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง จึงนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของ

สารเคมีในการทำปฏิกิริยาต่างๆ มากมาย สตาร์ชที่ยังไม่ได้ตัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่า native starch ซึ่งจะตรงกันข้ามกับสตาร์ชที่ถูกตัดแปรหรือแปรรูปแล้วที่เรียกว่า modified starch หรือ สตาร์ชตัดแปร (กล้าณรงค์, 2546)

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) ที่ต่อกันเป็นสายและเป็นกิ่งก้านที่เรียกว่า แอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกทิน (amylopectin) ตามลำดับ แหล่งของสตาร์ชในธรรมชาติพบได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด ราก ลำต้น ใบ และ หัว เป็นต้น สตาร์ชเป็นส่วนสะสมอาหารในพืชที่เกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัวของน้ำตาลกลูโคส โดยสูญเสียน้ำ 1 โมเลกุลต่อพันธะระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล (Smith, 1982)

1.1.1 แอมิโลส

เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เรียงต่อกันเป็นสายด้วยพันธะแอลฟา-1-4 เพียงชนิดเดียว มีขนาดแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของพืช โดยในแอมิโลสหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสตั้งแต่ 200 ถึง 2,000 หน่วย (Smith, 1982) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 150,000 ถึง 1,000,000 (ดังภาพที่ 2)

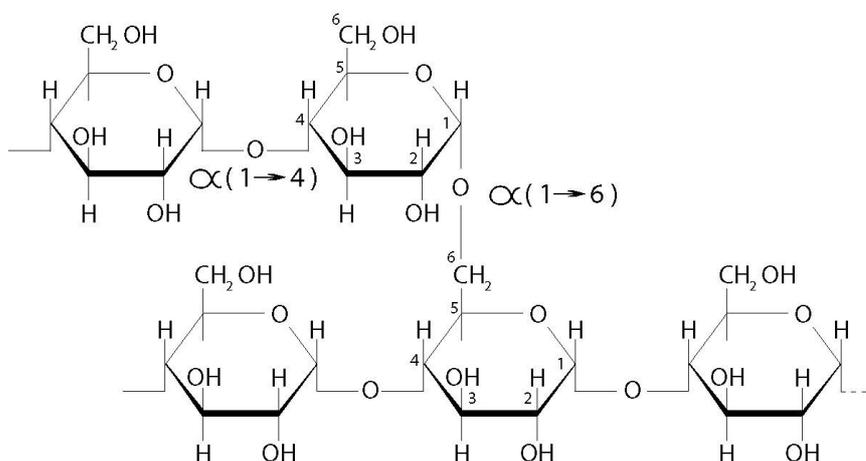


ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลส

ที่มา: Reis *et al.* (2002)

1.1.2 แอมิโลเพกทิน

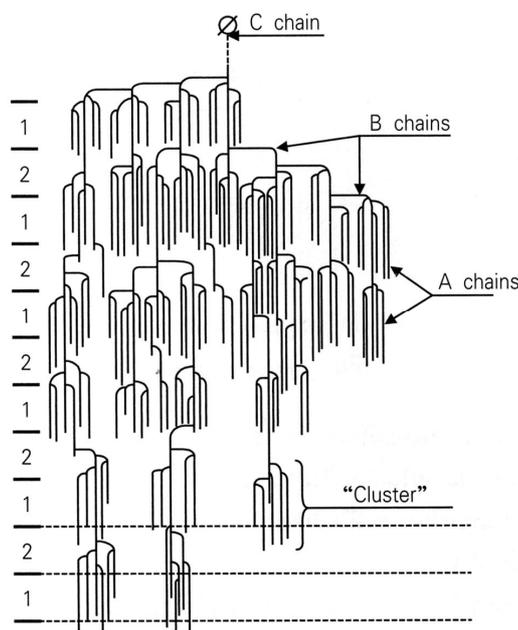
แอมิโลเพกทิน คือ พอลิเมอร์ที่เกิดจากพันธะแอลฟา-1-4 เป็นส่วนใหญ่ และมีพันธะแอลฟา-1-6 แทรกอยู่ประมาณร้อยละ 4 ถึง 6 จึงมีรูปร่างเป็นกิ่งก้านที่แต่ละกิ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสตั้งแต่ 25 หน่วย ถึง 30 หน่วย เรียงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1-4 (Smith, 1982) พอลิเมอร์หนึ่งของแอมิโลเพกทินจะมีขนาดใหญ่กว่าแอมิโลสมาก โดยโมเลกุลของแอมิโลเพกทินจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสมากกว่า 200,000 หน่วยขึ้นไป (Wurzburg and Szymanski, 1970) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Reis *et al* (2002)

เราสามารถแบ่งโครงสร้างกิ่งก้านของแอมิโลเพกทิน ได้เป็น 3 ประเภท คือ A-Chain B-Chain และ C-Chain โดยแบ่งตามลักษณะของการเชื่อมต่อกับโครงสร้างของกิ่งอื่น โครงสร้างของแอมิโลเพกทินนั้นแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนผลึก เป็นส่วนที่สายของโครงสร้างเหล่านี้อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (cluster) ประมาณ 22-25 สายมีการพันกันแบบเกลียวคู่ (double helix) ด้วยพันธะไฮโดรเจน และเชื่อมต่อกันเกิดเป็นไมเซลล์ (micelle) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ทำให้การพองตัวเป็นไปอย่างจำกัด เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ไม่ดีและไม่ละลายน้ำ ส่วนบริเวณที่เป็นแบบอสัณฐานนั้นเป็นบริเวณที่ต่อเนื่องมีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ จึงส่งผลให้สามารถเกิด ปฏิกิริยาเคมีและดูดซับน้ำได้ดีกว่าส่วนโครงสร้างที่เป็นผลึก (Radley, 1968; Swinkels, 1985; Zobel and Stephen, 1995)



ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน
1 คือ ส่วนผลึก, 2 คือ ส่วนอสัณฐาน

ที่มา: Robin *et al.* (1974)

อัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ประกอบอยู่ในสตาร์ชจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของพืช สตาร์ชมันสำปะหลังมีแอมิโลส ร้อยละ 17 และแอมิโลเพกทินประมาณร้อยละ 83 สตาร์ชมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุย่อยสลายเนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่ายจากเกษตรกรรมและมีความสามารถในการทนความร้อนสูงจากเครื่องมือได้ (หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง, 2540)

แต่การใช้สตาร์ชยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับอิทธิพลของน้ำในกระบวนการผลิต และความคงทนของผลิตภัณฑ์หลังจากการผลิต เนื่องจากน้ำจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ของพอลิเมอร์ ปริมาณความชื้นในสตาร์ชสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ เมื่ออยู่ในน้ำเม็ดสตาร์ชที่แห้งสามารถดูดซึมความชื้นแต่จะยังคงรักษาโครงสร้างพื้นฐานของมันได้ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบผลึกและพันธะไฮโดรเจนอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช (หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง, 2540)

1.2 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่สำคัญของสตาร์ช

1.2.1 การเกิดเจลลิตินในเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่ยึดเกาะกันเป็นจำนวนมาก เมื่ออยู่ในน้ำเย็นเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำทำให้พองตัวได้เพียงเล็กน้อย (Leach *et al.*, 1959) แต่เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกจากกันทำให้การจับกันระหว่างโมเลกุลสตาร์ชในส่วนผลึกคลายตัวลง น้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ชได้ (Osman, 1967) เนื่องจากโมเลกุลในเม็ดสตาร์ชมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากรวมทั้งมีความสามารถรวมกับน้ำได้ดีจึงทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำและเกิดการพองตัวซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลิตินในเซชัน (Leach, 1965) สตาร์ชที่เกิดการเจลลิตินในเซชันจะมีความหนืดและใสขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นจึงทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้น (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2546) การเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ด้วย

ระดับอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสตาร์ชและองค์ประกอบที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของแอมิโลสกับแอมิโลเพกทิน ปริมาณไขมัน รวมทั้งการจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในสตาร์ชหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งขนาดของเม็ดสตาร์ชไม่สม่ำเสมอ (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2546) สตาร์ชมันสำปะหลังโดยปกติจะเกิดการเจลลิตินในเซชันที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส (Schoch, 1964) ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชสามารถตรวจวัดได้โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยจะแสดงผลเป็นค่าพลังงาน เรียกว่า เอนทัลปี (enthalpy) (Zobel, 1984) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงภายในโมเลกุลสตาร์ชได้ การคัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงภายในเม็ดสตาร์ชจะมีผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันด้วย

1.2.2 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อเม็ดสตาร์ชที่เกิดเจลลาทีนเซชันได้รับความร้อนต่อไป การพองตัวจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่แล้วแตกออกทำให้ความหนืดลดลง โมเลกุลเอมิโลส สามารถจับตัวใหม่หรือจับกับเอมิโลเพกทินด้วยพันธะไฮโดรเจนนอกเม็ดสตาร์ช (Radley, 1968) เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำได้และกลับมีความหนืดที่คงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเป็นเจลและเมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีกโดยตั้งทิ้งไว้ให้นาน ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกจากเจล (syneresis) ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือที่เรียกว่า การคืนตัว (setback) (Smtih, 1979) ปัจจัยที่มีผลต่อการคืนตัว ได้แก่ ความเข้มข้นของสตาร์ช ชนิดของสตาร์ช อุณหภูมิ ระดับกรด-เบส (Radley, 1968) และการมีสารประกอบบางชนิดอยู่ร่วมกับสตาร์ช เช่น การเติมเกลือประเภท มอนอวาเลนต์ (monovalent) แคทไอออนของแคลเซียมไนเตรท และยูเรียจะมีผลชะลอการคืนตัวของสตาร์ช เป็นต้น (อรพิน, 2533)

1.2.3 การตกตะกอน (precipitation)

ถ้าส่วนผสมแป้งหรือสตาร์ชกับน้ำ มีปริมาณน้ำมากให้ความร้อนจนเกิดเจลลาทีนเซชัน ความหนืดสูงสุดของส่วนผสมจะมีค่าต่ำเพราะมีปริมาณน้ำมาก เมื่อทำให้เย็นตัวลงจะมีลักษณะตกตะกอน เนื่องจากการรวมตัวกันของส่วนเอมิโลสและเอมิโลเพกทิน โดยเกิดจากส่วนเอมิโลสก่อนเพราะมีสายโมเลกุลสั้น และมีลักษณะเป็นสายตรงที่สามารถกลับมาจับตัวกันได้ง่ายกว่าสายโมเลกุลของเอมิโลเพกทิน (Hoseney, 1986; Whistler and Bemiller, 1999)

2. การดัดแปรสตาร์ชทางเคมี (chemical modification of starch)

สตาร์ชดัดแปรตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ช (starch) เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชสาทิ มาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ชี้บ่งต่างๆ ของสตาร์ชดัดแปรแต่ละประเภทต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2535) เนื่องจากสตาร์ชมันสำปะหลังมีความ

บริสุทธิ์สูงมาก (มีสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ฯลฯ น้อย) จึงทำให้ปริมาณการใช้สตาร์ชเพื่ออุตสาหกรรมสตาร์ชดัดแปรมีมากกว่า 3 แสนตันต่อปี (กล้าณรงค์ และคณะ, 2542)

การนำสตาร์ชมาผ่านกระบวนการดัดแปรเพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานนั้นสามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ วิธีทางเคมี (chemical modification) วิธีทางกายภาพ (physical modification) และวิธีทางชีวภาพ (biological modification) สตาร์ชดัดแปรที่ผลิตได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งที่เป็นอาหารและที่มีใช้อาหารได้อย่างหลากหลาย (สุพะไชย์, 2545)

การดัดแปรสตาร์ชทางเคมีเป็นการดัดแปรสตาร์ชโดยใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและขนาดของโมเลกุลสตาร์ชทำให้มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาและสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปร

2.1 สตาร์ชเอสเทอร์ (starch ester)

สตาร์ชเอสเทอร์ หมายถึง สตาร์ชที่ได้จากการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) โดยมีการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอสเทอร์ของสารเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช โดยเป็นการเติมหมู่ฟังก์ชัน R เข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของสตาร์ช การทำปฏิกิริยาดังแสดงในภาพที่ 5 สตาร์ชดัดแปรที่ได้จะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) และสมบัติของหมู่ R ที่มาทำปฏิกิริยา (Fleche, 1985; Light, 1990; Peltonen and Harju, 1996)

สามารถแบ่งสตาร์ชเอสเทอร์ตามระดับการเกิดปฏิกิริยา ได้ดังนี้ สตาร์ชเอสเทอร์ที่มีระดับการแทนที่สูง (DS = 3) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดคาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์ (carboxylic acid anhydride) ใช้ไพริดีน (pyridine) เป็นตัวทำละลาย (Tessler and Billmers, 1996) และสตาร์ชเอสเทอร์ที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (DS 0.1-0.2) นิยมใช้ทางการค้าซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดคาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์ มีน้ำเป็นตัวกลางในสถานะเบส (Whistler and BeMiller, 1999) ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแอลคาไลน์สตาร์ช (alkaline starch) แล้วทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์ได้เป็นสตาร์ชเอสเทอร์ที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (Radley, 1968)

ต่อมาปีถัดมา (2540) ได้ปรับปรุงฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลังให้มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน โดยเตรียมฟิล์มจากสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 5 และ ซอร์บิทอลร้อยละ 30 ได้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะผิวเรียบใส ขึ้นรูปเป็นซองสามารถพนักของได้ด้วย ความร้อน แต่ฟิล์มที่ได้มีความไวต่อความชื้นและสามารถดูดซับน้ำได้มากทำให้อาจเป็นข้อจำกัดต่อการนำไปใช้งาน

3.1.2 โฟมสตาร์ช

โฟมสตาร์ชเป็นการนำสตาร์ชมาให้ความร้อนภายใต้ความดันโดยมีอุณหภูมิเหมาะสม โดยที่สภาวะนี้จะทำให้ผลึกของสตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ด้วยแรงเฉือนหรือการหลอม แต่ยังคงความเป็นเม็ดสตาร์ชอยู่และสตาร์ชจะเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำในสตาร์ช ที่กลายเป็นไอเมื่อถูกความร้อนสูงขณะผ่านแรงอัดจากเครื่องอัดรีด (extruder) ผลิตภัณฑ์จากสตาร์ช ที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้มีหลายลักษณะเช่น โฟมสตาร์ชที่ใช้ประโยชน์เพื่อรองรับกันกระแทก (สุพะไชย์, 2548) และภาชนะบรรจุคงรูปย่อยสลายทางชีวภาพต่างๆ อีกมากมาย (สายสนมและงามทิพย์, 2540; Poovarodom and Praditdung, 2006)

3.2 ผลิตภัณฑ์จากสตาร์ชผสมพลาสติก

ฟิล์มที่มีการผลิตจากสตาร์ชโดยตรงนั้นมักมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการนำไปใช้งาน เนื่องจากสตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าอุณหภูมิการกลายเป็นแก้ว (glass transition temperature) สูง ดังนั้นการใช้สตาร์ชเพียงอย่างเดียวจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงแม้ว่าจะมีการเติมพลาสติกไซเซอร์แล้วก็ตามจึงทำให้ได้มีงานวิจัยใหม่ๆ ที่มีการนำสตาร์ชมาผสมกับพลาสติกเพื่อช่วยแก้ไขและปรับปรุงข้อจำกัดนี้

3.2.1 สตาร์ชผสมพลาสติกที่ไม่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ

มีการศึกษาการผสมสตาร์ชกับพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายทางธรรมชาติไว้อย่างมากมาย แม้ว่าพลาสติกจะสามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติให้เป็นไปได้ตามต้องการแต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น ถ้าพลาสติกที่เลือกใช้มีความเป็นขี้ดหรือเลือกใช้

สารช่วยปรับสภาพให้เข้ากัน (compatibilizer) ได้ไม่เหมาะสมก็อาจทำให้เกิดการแยกชั้นกัน ได้ถ้ามีการเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน ข้อเสียอีกประการก็คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังไม่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมดอีกด้วย

3.2.2 สตาร์ผสมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ

เป็นการนำสตาร์มาผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากนั้นนำมาขึ้นรูปหรือผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการแต่ราคาของพลาสติกที่ย่อยสลายได้นั้นสูงกว่าพลาสติกทั่วๆ ไปหลายเท่าตัว ปริมาณการใช้สตาร์ที่ผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ขึ้นอยู่กับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ถ้าต้องการให้มีความยืดหยุ่น (สมบัติของพอลิเมอร์) มากก็ควรมีสัดส่วนของพลาสติกที่ย่อยสลายได้อันอยู่มาก ถ้าใส่สตาร์มากขึ้นความแข็งของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มมากขึ้นแต่ความยืดหยุ่นจะลดลง (สุพะไชย์, 2545)

ตัวอย่างของพลาสติกสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ ได้แก่ พอลิคาโพรแลกโตน (polycaprolactone, PCL) กรดพอลิแลคติก (polylactic acid, PLA) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVOH) พอลิเอสเทอร์อื่นๆ เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) พอลิเอสเทอร์คาร์บอเนต (polyester carbonate, PEC) (สุพะไชย์, 2545)

สตาร์ผสมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ในกลุ่มนี้ ได้มีตัวอย่างงานวิจัยและพัฒนา เช่น Lim *et al.* (1999) ได้มีการศึกษาสมบัติของฟิล์มที่ได้จากการผสมของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) กับสตาร์ของข้าวสาลีพบว่าสมบัติของฟิล์มที่ได้มีอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature) ใกล้เคียงกับพอลิเอสเทอร์ และเมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปพบว่าทำให้ฟิล์มนั้นมีความยืดหยุ่นและการขึ้นรูปง่ายขึ้น ทั้งยังทำให้ค่าการยึดตัว ความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้นแม้ว่าอัตราส่วนของสตาร์จะสูงก็ตาม ทางด้านความสามารถในการย่อยสลายนั้นสามารถย่อยสลายได้ภายในเวลา 8 สัปดาห์

Rotto *et al.* (1999) ได้ทำการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแอดิเพต (polybutylene succinate adipate, PBSA) ผสมกับสตาร์ข้าวโพด เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน จากผลการทดลอง พบว่า ฟิล์มที่ผสม PBSA 5 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ข้าวโพดนั้น มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าฟิล์มพอลิเอสเทอร์และเมื่อ

อัตราส่วนของสตาร์ชในฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง อุณหภูมิการหลอมเหลว และสมบัติการขึ้นรูปลดลง

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพลาสติกสังเคราะห์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถละลายน้ำได้ดีและย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ เมื่อมีการนำมาผสมกับสตาร์ชซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงมีความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) สูง (Nwufu and Griffin, 1985; Kondo *et al.*, 1994)

Tudorachi *et al.* (2000) ได้ทดลองผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับสตาร์ชข้าวโพดเต็มกลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซออร์ จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ผลการทดลองที่ได้พบว่าสมบัติของฟิล์มสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสมคือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สตาร์ชและพลาสติกไซเซออร์ เช่น เมื่อปริมาณสตาร์ชในฟิล์มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มส่วนผสมที่เป็นสาร โมเลกุลใหญ่เข้าไปจะทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ (chain mobility) ลดลงพันธะไฮโดรเจนจึงจับกันได้ดีขึ้น (strong molecular H-bond) แต่ค่าการยืดตัวจะลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่ยากขึ้น

Jayasekara *et al.* (2004) ได้นำสตาร์ชข้าวสาลี : พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ : กลีเซอรอล มาผสมกันในอัตราส่วน 60 : 20 : 20 โดยน้ำหนักแห้ง เตรียมโดยนำสตาร์ชข้าวสาลีมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากนั้นเติมน้ำกลั่น 175 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์คนให้เข้ากันจนสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนเซชัน แล้วนำไปเทลงบนจานพอลิสไตรีน นำไปไล่ฟองด้วยเปลวไฟ ก่อนที่นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ลักษณะของฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นและมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) จากการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มด้วยเครื่อง AFM (atomic force microscopy) พบว่ามีลักษณะขรุขระ โดยความขรุขระของฟิล์มที่ได้อยู่ระหว่างฟิล์มสตาร์ชและฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วย FTIR (fourier transform infra-red spectroscopy) และ C-NMR (nuclear magnetic resonance) ปรากฏว่าไม่พบการเกิดพันธะใหม่ระหว่างสตาร์ชและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

4. การขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ช

ฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยสตาร์ชมักมีกระบวนการเริ่มต้น โดยการทำให้สตาร์ชละลาย หรือกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในตัวทำละลาย จากนั้นจึงเติมสารปรับปรุงสมบัติของฟิล์มซึ่งจะต้องมีสมบัติสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้กับตัวทำละลายแล้วจึงนำไปผ่านวิธีการต่างๆ เพื่อแยกตัวทำละลายออกไป เช่น การทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไป

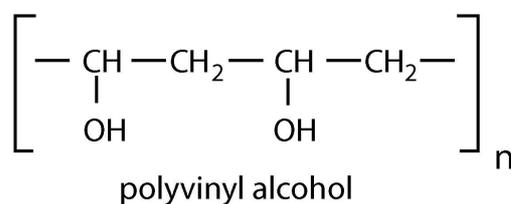
ในการขึ้นรูปฟิล์มนั้นจะมีความเกี่ยวข้องกับแรง 2 ชนิด ในการเกิดพันธะ คือ แรงโคฮีชัน (cohesion) เป็นแรงที่เกิดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเกิดฟิล์มเป็นพันธะที่แข็งแรงป้องกันการแยกจากกัน โดยปัจจัยที่มีต่อแรงโคฮีชันได้แก่ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความสม่ำเสมอของโครงสร้าง การกระจายของกลุ่มขั้วบนสายของพอลิเมอร์ ปัจจัยต่อมา คือ การละลายโดยพอลิเมอร์ละลายหรือขยายตัวได้มากก็จะสามารถเชื่อมกันด้วยแรงที่มาก และปัจจัยสุดท้าย คือ สภาพการเตรียมฟิล์ม อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้ฟิล์มแห้ง และอัตราในการระเหยตัวทำละลาย ซึ่งถ้าเร็วเกินไปโมเลกุลของพอลิเมอร์จะถูกตรึงก่อนที่จะเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์ทำให้ฟิล์มอาจเกิดรูเข็มหรือความหนาไม่สม่ำเสมอได้ ส่วนแรงอีกชนิดหนึ่ง คือ แรงแอดฮีชัน (adhesion) เป็นแรงที่เกิดระหว่างพอลิเมอร์กับสารอื่น เช่น พลาสติกไซเซอร์ ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติของฟิล์ม (Banker, 1966)

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของวัตถุดิบ และองค์ประกอบต่างๆ วิธีการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มมีด้วยกันหลายวิธี คือ วิธีเทสารละลายลงบนวัสดุต่างๆ (solvent casting) วิธีอัดรีด (extrusion) วิธีการทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (drum drier)

มณฑาทิพย์ (2534) ได้เตรียมฟิล์มอบเลต จากสตาร์ชมันเทศ แอมิโลส และวุ้น โดยการเทส่วนผสมลงในถาดโลหะปลอดสนิมซึ่งทาด้วยน้ำมันพืช อุ่นให้ร้อนพอประมาณจากนั้นเอียงและเขย่า ถาดเบาๆ ทิ้งไว้ให้แผ่นฟิล์มคงรูป ทำให้แห้งด้วยไอน้ำเดือด และต่อมาในปี 2540 ปันดดา ได้เตรียมฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลังขึ้นรูปโดยปรับปรุงจากวิธีการโครมาโตกราฟีแบบแผ่นบาง คือ เทน้ำแป้งเปียกที่เตรียมไว้ในรางของเครื่องปาดที่วางแผ่นกระจกซึ่งด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแผ่นฟิล์มแห้งแล้วลอกแผ่นฟิล์มแป้งออก

5. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีลักษณะเป็นผงสีขาวที่ได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลเอซีเตต (polyvinyl acetate) ลักษณะโครงสร้างโดยส่วนใหญ่ (ดังในภาพที่ 6) จะเป็นสายโซ่แบบเส้นตรงที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติที่พร้อมละลายน้ำได้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ และการเคลือบต่างๆ (ปรีชา, 2530; Modi, 1980)



ภาพที่ 6 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
ที่มา: Modi (1980)

5.1 การผลิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เนื่องจากไวนิลแอลกอฮอล์ไม่เสถียรในสภาวะปกติ (ดังภาพที่ 7) การผลิตจึงต้องเตรียมผ่านพอลิไวนิลเอซีเตต โดยในกระบวนการผลิตจะเริ่มจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของไวนิลเอซีเตต จากนั้นนำพอลิไวนิลเอซีเตตไปผ่านปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิสโดยทำปฏิกิริยาในสภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นด่าง จะได้ผลผลิตเป็นตะกอนสีขาวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยปฏิกิริยาได้แสดงในภาพที่ 8

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเตรียมได้จากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายหรือแบบแขวนลอย โดยเฉพาะจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายเป็นวิธีการผลิตที่สะดวกและนิยมใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายซึ่งสามารถแยกตะกอนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ออกมาได้โดยตรง

5.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติต่างๆ ที่สำคัญต่อการใช้งานในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สมบัติ	ค่าอธิบาย
รูปร่าง	เม็ด - ผง
สี	สีขาว - สีครีม
ความถ่วงจำเพาะ	1.26-1.31
ปริมาตรจำเพาะ, m^3/kg (in^3/lb)	$7.95-7.62 \times 10^{-4}$ (22.0-21.1)
ดัชนีหักเหของแสง	1.49-1.53
ร้อยละของการยึดตัว(เติมพลาสติกไซเซออร์)	มากกว่า 600
แรงต้านทานการยึดตัว(ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์), MPa (lb/in^2)	มากกว่า 152 (22,000)
ความแข็ง (ฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์)	10-100
อุณหภูมิที่ใช้ในการปิดผนึก(ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์), °C	165-210
อุณหภูมิในการขึ้นรูปแบบอัดด้วยความดันและความร้อนสูง (เติมพลาสติกไซเซออร์), °C	100-150
ความคงตัวในการเก็บ	ดี
ความร้อนจำเพาะ, $cal/(g \cdot ^\circ C)$	0.4
ผลที่เกิดเนื่องจากแสง	เล็กน้อย
ผลที่เกิดเนื่องจากกรดแก่	ละลาย หรือสลายตัวได้
ผลที่เกิดเนื่องจากด่างแก่	อ่อนตัว หรือละลายได้
ผลที่เกิดจากกรดอ่อน	อ่อนตัว หรือละลายได้
ผลที่เกิดเนื่องจากด่างอ่อน	อ่อนตัว หรือละลายได้
ผลที่เกิดเนื่องจากตัวทำละลายอินทรีย์	คงตัวต่อตัวทำละลายส่วนใหญ่

ที่มา: คัดแปลงจาก Modi (1980)

สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับระดับของแอลกอฮอล์ซิส คือ ถ้าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถูกไฮโดรไลซ์สมบูรณ์ จะมีค่าความทนต่อแรงดึงขาดสูงขึ้น ทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไฮโดรไลซ์เพียงบางส่วนเนื่องจากมีความเป็นผลึก และพันธะไฮโดรเจนมากกว่า นอกจากนี้สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังได้รับอิทธิพลจากความชื้นของสภาพแวดล้อมด้วย เนื่องจากน้ำจะเป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และส่งผลต่อสมบัติต่างๆ เช่น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะมีความทนต่อแรงดึงขาดลดลงแต่จะไปเพิ่มความสามารถในการยืดตัวออกมากขึ้น นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลก็ยังมีผลต่อสมบัติทางกายภาพเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำความสามารถในการทนต่อแรงดึงขาดก็จะต่ำและทนต่อแรงฉีกขาดได้ต่ำกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง (ปรีชา, 2530)

5.2.1 สมบัติทางเคมี

สมบัติทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ดังภาพที่ 8) โดยจะประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเกาะบนสายโซ่หลักสลับกันระหว่างโมเลกุลของสายโซ่หลักที่เกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ย้อนกลับ (reesterification) ได้ด้วยกรด โดยจะถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นหมู่ไซยาโนเอทิล อีเทอร์ (cyanoethyl ether group) ด้วยอะคริโลไนไตรท์ (acrylonitrile) หรือ เปลี่ยนเป็นหมู่ไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyl ethyl) โดยเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเกิดพันธะไขว้ (cross linked) โดยสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ (bifunctional group) หรือหลายหมู่ (polyfunctional group) ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (ปรีชา, 2530)

5.2.2 สมบัติเชิงกล

ฟิล์มที่ได้จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีข้อดี คือ มีความเหนียว (tough) ทนต่อการเกิดรอยขีดข่วน หรือฉีกขาด มีความสามารถทนต่อการดึงขาดได้สูงใกล้เคียงกับวัสดุประเภทพลาสติกอีกด้วย สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงขาด การยืดตัว ความต้านทานการฉีกขาดของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นจะแปรผันตามปริมาณพลาสติกไซเซอร์ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และระดับการไฮโดรไลซ์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม (Modi, 1980)

5.2.3 การละลาย (solubility)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายได้ดีในน้ำหรือตัวทำละลายบางชนิด อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นก็ยังขึ้นกับระดับ หรือเปอร์เซ็นต์การเกิดไฮโดรไลซิสเป็นหลัก (Modi, 1980) โดยตัวอย่างความสามารถในการละลายของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส ดังนี้

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส 90-89	สามารถละลายได้ในน้ำร้อน
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส 89-87	สามารถละลายได้ทั้งน้ำร้อนและน้ำเย็น
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส 87-75	สามารถละลายได้ในน้ำเย็น

ความสามารถในการละลายน้ำพบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถละลายเพิ่มขึ้นเมื่อหมู่เอซิดิลในพอลิไวนิลเอซิติเตดถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น และเมื่อระดับการแทนที่สูงสุดของการเปลี่ยนเป็นหมู่ไฮดรอกซิลเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ณ จุดนี้การละลายจะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ (ปรีชา, 2530)

5.2.4 ความหนืด (viscosity)

ความหนืดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสารละลายจะแปรผันตามดีกรีหรือเปอร์เซ็นต์การเกิดไฮโดรไลซิส ความเข้มข้น และอุณหภูมิ เป็นต้น (Modi, 1980)

5.2.5 ความสามารถทนต่อตัวทำละลาย

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีความสามารถทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ได้หลายชนิด โดยความทนทานจะเพิ่มขึ้นตามระดับการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งถ้าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีระดับการแทนที่สูงจะทำให้ไม่ละลายในตัวทำละลายทั้งอะลิฟาติกและอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอนสูงๆ เอสเทอร์ อีเทอร์และคีโตน แต่ถ้าเป็นแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอนต่ำๆ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และทำให้ละลายได้ (ปรีชา, 2530)

5.2.6 การดูดความชื้น

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทุกระดับของการไฮโดรไลซิสนั้นสามารถดูดความชื้นในอากาศ โดยในตารางที่ 3 ได้แสดงค่าการดูดความชื้นของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วการเติมพลาสติกไซเซอร์ให้ฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้น มักจะมีผลทำให้การดูดความชื้นของฟิล์มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์) กับความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)
35	1 – 2
55	3 – 5
80	7 – 10
100	25 - 30

ที่มา: Modi (1980)

5.2.7 การป้องกันการซึมผ่าน

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติที่โดดเด่นในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซหลายชนิด เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ฮีเลียม แลไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น โดยการใช้งานมักพบในฟิล์มหรือกระดาษที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อต้องการสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านที่สูง (Modi, 1980)

5.2.8 ผลกระทบที่เกิดจากความร้อนและแสง

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถอ่อนตัวและปิดผนึกได้เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการปิดผนึกก็จะผันแปรตามระดับของการไฮโดรไลซิส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และถ้ามีการเติมพลาสติกไซเซอร์ก็จะทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ได้ (Modi, 1980)

การสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส การชะลอหรือป้องกันการเกิดการสลายตัวสามารถทำได้โดยการเติมกรดบอริก (H_3BO_3) ลงไปในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในปริมาณเล็กน้อย (Modi, 1980)

5.3 พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่มักเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้และมีจุดเดือดสูง โดยมักจะมีหมู่ไฮดรอกซิลเอไมด์ (amide) หรือหมู่แอมิโน (amino) เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างซึ่งนิยมใช้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Modi, 1980) ได้แก่

5.3.1 กลีเซอริน (glycerine)

กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้ร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากเป็นสารที่มีความคงตัวที่ดี คงทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ และนอกจากนั้นยังเป็นสารที่ไม่มีสีและกลิ่น

5.3.2 เอทิลีน ไกลคอล (ethylene glycol)

โดยทั่วไปไกลคอล (glycol) มักเข้ากับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้น้อยกว่ากลีเซอรินแต่ไกลคอลที่นิยมใช้ทั่วไป คือ tetra ethylene glycol, hexa ethylene glycol และ ethylene glycol

5.3.3 ฟอรัมาไมด์ (formamide)

ฟอรัมาไมด์สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แต่ด้วยข้อจำกัดที่ฟอรัมาไมด์สามารถระเหยจากฟิล์มได้ง่าย จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งาน

5.3.4 เกลือเอทานอลาไมด์ (ethanolamide salt)

สามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์กับฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่มีระดับการไฮโดรไลซ์สมบูรณ์หรือไฮโดรไลซ์เพียงบางส่วน

พลาสติกไซเซออร์ที่กล่าวข้างต้นเมื่อเติมในฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วจะมีผลทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศ ซึ่งความชื้นในอากาศจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฟิล์มมีความอ่อนตัว (softening) มากขึ้น (Modi, 1980)

5.4 การใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งเป็นสองลักษณะ คือ ลักษณะแรกเนื่องจากพอลิเมอร์นี้ละลายน้ำได้จึงใช้เป็นสารเพิ่มความข้น (thickening agent) สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชันและแขวนลอยนำไปใช้ทำแผ่นฟิล์มบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้ เช่น สีย้อมผ้า ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าเชื้อโรค ทำกาวย ทำน้ำยาถอดแบบในอุตสาหกรรมพลาสติกหล่อ เป็นต้น (ปรีชา, 2530; Modi, 1980)

การใช้ประโยชน์ในอีกลักษณะ คือ เมื่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผ่านปฏิกิริยาเคมีแล้ว จะทำให้สมบัติเปลี่ยนจากละลายน้ำเป็นไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยผ้าเป็นหลัก โดยนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปปั่นเปียก (wet spun) ในน้ำอุ่นแล้วผ่านเข้าไปในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นซึ่งมีกรดซัลฟิวริกผสมกับฟอรัมาไมด์ไฮโดรออกไซด์อยู่ด้วย เส้นใยที่ได้ออกมาจะไม่ละลายน้ำเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลประมาณ 1/3 ถูกทำปฏิกิริยา interchain acetalization ข้อดีของเส้นใยที่ได้จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์คือ สามารถดูดซึมน้ำได้ถึงร้อยละ 30 มากกว่าเส้นใยอื่นๆ จึงมีการนำมาใช้ทำเสื้อผ้าแทนฝ้ายซึ่งมีความทนทาน ซักง่าย แห้งเร็ว คงกليبได้ดี (ปรีชา, 2530)

5.5 ฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากวิธีการปาด (casting)

ฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีการปาดจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ จะมีลักษณะเหนียว ทนต่อการฉีกขาดได้ดี ทนต่อการที่มทะเล สามารถละลายในน้ำ ทนต่อตัวทำละลาย น้ำมัน และน้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ยังได้สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ ได้ดี (Modi, 1980)

6. พลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์ หมายถึง สารที่เข้าไปช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนต่อการใช้งาน (Bakker, 1986) และการยืดตัว สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์จะไปจับยึดกับพอลิเมอร์ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลงเกิดโครงสร้างที่อ่อนตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น (Mellan, 1961) พลาสติกไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วซึ่งทำหน้าที่เป็นสารร่วมซึ่งช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) (Billmeyer, 1962) สมบัติของพลาสติกไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์ม (compatible) มีจุดเดือดสูง ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ใช้ นอกจากนี้ควรไม่มีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟ ปริมาณการใช้พลาสติกไซเซอร์โดยทั่วไปประมาณร้อยละ 10-60 โดยน้ำหนักแห้ง พลาสติกไซเซอร์ที่มีการนำมาใช้ในฟิล์มส่วนใหญ่มีหลายประเภท ได้แก่ มอนอแซ็กคาไรด์ ไดแซ็กคาไรด์ โอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิแอลกอฮอล์ และลิพิด

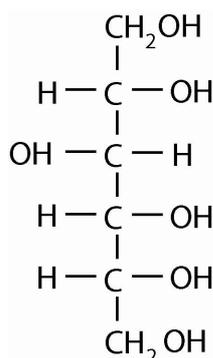
6.1 พอลิแอลกอฮอล์ (polyols)

เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งมีหมู่คีโตน หรืออัลดีไฮด์ ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล โดยเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับหมู่คาร์บอนิลของโมโนแซ็กคาไรด์ พอลิแอลกอฮอล์สามารถละลายน้ำได้และมีรสหวาน (Aurand and Woods, 1973; Le Bot and Gouy, 1995) พอลิแอลกอฮอล์ที่นิยมนำมาใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์กับฟิล์ม ได้แก่

6.1.1 ซอร์บิทอล (sorbitol)

เป็นพอลิออลที่มีสูตรโมเลกุล $C_6H_{14}O_6$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 182.17 โครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในภาพที่ 9 ซอร์บิทอลพบมากในผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล แพร์ เชอร์รี่ พลัม พีช สาหร่าย ผลนัท ไบยาสูบ โดยในปัจจุบันสามารถสังเคราะห์ซอร์บิทอลได้จากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนของเดกซ์โตรสโดยใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดัน 100-150 บรรยากาศ และ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ซอร์บิทอลมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน ละลายน้ำได้ ใช้เป็นพลาสติกไฮเซออร์ สารรักษาความชื้น (moisture conditioner) และสารให้ความหวานแทนน้ำตาล เป็นต้น (Aurand and Woods, 1973; Windholz *et al.*, 1976; Bilitz and Grosch, 1987)

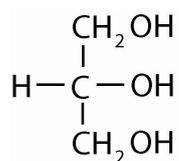


ภาพที่ 9 โครงสร้างของซอร์บิทอล

ที่มา: Le Bot and Gouy (1995)

6.1.2 กลิเซอรอล (glycerol)

มีสูตรทั่วไป คือ $C_3H_8O_3$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 โครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 10 กลิเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีลักษณะเป็นของเหลว มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ดูดความชื้นจากอากาศได้ นิยมใช้เป็นพลาสติกไฮเซออร์ สารให้ความหวาน และเป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอาง สบู่เหลว เป็นต้น (Windholz *et al.*, 1976)



ภาพที่ 10 โครงสร้างของกลีเซอรอล

ที่มา: Windholz *et al.* (1976)

6.1.3 พอลิเอทิลีน ไกลคอล (polyethylene glycol, PEG)

มีสูตรทั่วไป คือ $\text{H}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OH}$ โดยที่ n มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 4 พอลิเอทิลีน ไกลคอล มีลักษณะเป็นของเหลวใสหรือผลึกสีขาว ละลายน้ำได้ สำหรับพอลิเอทิลีน ไกลคอล-400 มี n เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.2 และ 9.1 มีมวลโมเลกุลระหว่าง 380-420 เป็นของเหลวที่ค่อนข้างหนืด มีกลิ่นเล็กน้อย สามารถดูดความชื้นได้บ้าง และมีความเป็นพิษต่ำ (Windholz *et al.*, 1976)