

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

ฟิล์มที่รับประทานได้

คำจำกัดความ

ฟิล์มที่รับประทานได้ หมายถึง วัตถุแผ่นบางที่บริโภคได้ และนำมาใช้กับอาหาร โดยเคลือบผิวของอาหารโดยตรงหรือเตรียมแผ่นฟิล์มขึ้นมาก่อนแล้วจึงนำมาใช้กับอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันหรือชะลอการผ่านเข้าออกของก๊าซ ไอน้ำ ไขมัน สารละลาย จุลินทรีย์ หรือสารอื่น ๆ จากอาหารฟิล์มที่เตรียมขึ้นอาจใช้สารชนิดเดียวหรือหลายชนิดรวมกัน โดยนำคุณลักษณะเด่นของสารแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ (Guilbert, 1986)

ชนิดของฟิล์มที่รับประทานได้

แบ่งเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ ฟิล์มโปรตีน ฟิล์มลิพิด และฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์

1. ฟิล์มโปรตีน (Protein Film) ในปัจจุบันการศึกษาฟิล์มที่รับประทานได้จากโปรตีนมีมากขึ้นเนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรง และมีคุณสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซ ได้ดี นอกจากนี้โปรตีนยังมีคุณค่าทางอาหารสูงอีกด้วย ฟิล์มโปรตีนที่มีการศึกษาได้แก่ ฟิล์มจากโปรตีนถั่วเหลือง และฟิล์มจากโปรตีนข้าวสาลี เป็นต้น

1.1 ฟิล์มจากโปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนในถั่วเหลืองส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ 7s และ 11s โกลบูลิน ซึ่งโมเลกุลของโปรตีนทั้งสองชนิดนี้สามารถเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเกิดฟิล์ม ฟิล์มชนิดนี้เตรียมได้จากวัตถุดิบหลัก คือ นํ้านมถั่วเหลือง หรือโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ซึ่งต่อมามีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เพื่อให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น และปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น (Chuah et al., 1983; Brandenberg et al., 1993) ฟิล์มชนิดนี้มีสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีแต่กันการซึมผ่านของน้ำได้น้อย เพราะมีความเป็นขั้วสูง ฟิล์มจากโปรตีนถั่วเหลืองนี้สามารถเป็นส่วนประกอบของซูพหรือทำเป็นเนื้อเทียม นอกจากนี้ยังนำมาใช้ห่อเนื้อบดหรือผักให้อยู่ในรูปร่างที่ต้องการ เช่น หมูตั้ง หอยจ้อ เป็นต้น

1.2 ฟิล์มจากโปรตีนข้าวสาลี โปรตีนข้าวสาลีหรือกลูเตน ประกอบไปด้วย โกลอะดินร้อยละ 7 ที่เหลือเป็นกลูเตนิน ส่วนประกอบทั้งสองนี้มีพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งมี

บทบาทสำคัญในการเกิดฟิล์ม โดยทำให้มีลักษณะการยึดเกาะกันของพอลิเมอร์ และให้ลักษณะยืดหยุ่นดี (Gennadios and Weller, 1990) Aydt et al. (1991) ได้ศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติในการซึมผ่านพบว่า ฟิล์มชนิดนี้เป็นฟิล์มที่ไวต่อความชื้น แต่มีความแข็งแรงและกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ต่อมา Gontard et al. (1993) ได้ศึกษาบทบาทของพลาสติกไซเซอร์ คือ กลีเซอรอล พบว่าการเติมกลีเซอรอลช่วยเสริมให้สมบัติทางกลและสมบัติการกันการซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น

นอกจากฟิล์มโปรตีนสองชนิดนี้ยังมีการศึกษาฟิล์มจากโปรตีนชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ฟิล์มจากโปรตีนข้าวโพด (Gennadios and Weller, 1990; Aydt et al., 1991) ฟิล์มจากโปรตีนเวย์ (Gontard et al., 1993; McHugh et al., 1994) ฟิล์มจากเคซีน (Avena-Bustillos and Krochta, 1993)

2. ฟิล์มลิพิด (lipid film) ลิพิดไม่นิยมขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแต่จะใช้เป็นสารเคลือบ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้ผลอย่างอื่นด้วย เช่น ลดการเสียดสีของผิวผลไม้ระหว่างการขนส่ง หรือป้องกันการเกิดสีน้ำตาล สารประกอบลิพิดหลายชนิดรวมทั้งแอซิติลเลตโมโนกลีเซอไรด์ ไบธรรมชาติ และสารตั้งผิวสามารถนำมาใช้เป็นสารเคลือบได้ ตัวอย่างของฟิล์มลิพิด ได้แก่ ฟิล์มไขมันที่รับประทานได้ ซึ่งมีสมบัติกันการซึมผ่านของความชื้นได้ดีมากโดยเฉพาะไขมันพาราฟินและไขมันอื่น นอกจากนี้ฟิล์มจากไขมันพาราฟินและไขมันคาร์บูรา ยังช่วยลดอัตราการแพร่ของแก๊สออกซิเจนเข้าสู่อาหารได้ดี จึงสามารถใช้รักษาความเข้มข้นของสารกันเสียที่ผิวของอาหารไว้ได้เป็นเวลานาน ฟิล์มลิพิดอีกชนิดหนึ่ง คือ สารตั้งผิว (surfactant) การเคลือบอาหารด้วยสารตั้งผิวจะช่วยลดค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) ที่ผิวหน้าของอาหาร และลดอัตราการระเหยของน้ำซึ่งจะทำให้การเสื่อมสภาพของอาหารช้าลง โดยสารที่ให้ผลดีที่สุด คือ แอลกอฮอล์ซึ่งมีกรดไขมันในโมเลกุล (fatty alcohol) ที่มีจำนวนคาร์บอน 16-18 อะตอม กลีเซอรอลโมโนพาลมิเตต และกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (Kester and Fennema, 1986)

3. ฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์ พอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดสามารถนำมาใช้ผลิตฟิล์มหรือสารเคลือบที่รับประทานได้ แต่เนื่องจากธรรมชาติของพอลิเมอร์เหล่านี้ชอบน้ำ (hydrophilic) จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ป้องกันการซึมผ่านของความชื้น อย่างไรก็ตาม พอลิแซ็กคาไรด์บางตัวที่ใช้เคลือบอาหารมีลักษณะเหมือนวุ้น จะชะลอการสูญเสียความชื้นของอาหารบางอย่างได้ในช่วงอายุการเก็บสั้น ๆ นอกจากนี้ฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์บางชนิดยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด และองค์ประกอบอื่น ๆ ในอาหารได้อีกด้วย ตัวอย่างฟิล์ม พอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ ฟิล์มจากแอลจินเนต (alginate) นิยมใช้ในรูปแบบแอลจินเนตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมคลอไรด์ การเคลือบด้วยฟิล์มชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้กับผลิตภัณฑ์เนื้อ โดยจะ

ช่วยลดการสูญเสีย น้ำ ลดปริมาณจุลินทรีย์บนผิวเนื้อ รักษาสีแดงของเนื้อ ป้องกันการออกซิเดชันของลิพิด และช่วยให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น (Kester and Fennema, 1986)

ฟิล์มจากอนุพันธ์ของเซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ใช้ในการผลิตฟิล์มบรีโอกได้ออยู่ในรูปของเซลลูโลสอีเทอร์ ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เมทิลเซลลูโลส ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส หรือ ไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส (Graham, 1977) ในการผลิตฟิล์มจากเซลลูโลสอีเทอร์นั้นมักใช้ร่วมกับลิพิดเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของความชื้นให้ดีขึ้น (Greener et al., 1989; Kester and Fennema, 1989; Rico-Pena et al., 1990)

ฟิล์มจากสตาร์ช ที่ผ่านการผลิตฟิล์มจากสตาร์ชโดยตรงมีเพียงฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ชข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงซึ่งผ่านการดัดแปร (Roth et al., 1967) และฟิล์มที่ผลิตจากอะมิโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสตาร์ชที่มีคุณลักษณะสามารถเกิดฟิล์มได้ แต่ต้องมีการแยกส่วนออกมาเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟิล์มแบบอบเลต (oblate) คือใช้ร่วมกับสตาร์ชและวุ้น หรือใช้ร่วมกับวุ้น ฟิล์มที่ได้ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นรส มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น เป็นมันวาว มีคุณสมบัติต้านทานไขมัน (grease) สูง และออกซิเจนซึมผ่านฟิล์มได้ต่ำ แต่ข้อเสียของฟิล์มชนิดนี้ คือปัญหาในการละลายอะมิโลสเพื่อเตรียมฟิล์มซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงภายใต้ความดัน (มณฑาทิพย์, 2534)

ลักษณะของฟิล์มที่รับประทานได้

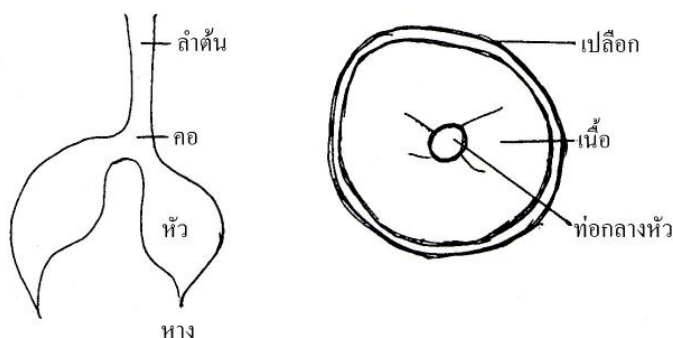
ลักษณะของฟิล์มจะมีลักษณะอย่างไรอย่างหนึ่งนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น อาหารที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงมาก จำเป็นต้องใช้ฟิล์มที่มีความต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจนสูง เป็นต้น ฉะนั้นจึงขอกล่าวข้อดีของฟิล์มที่รับประทานได้ที่เหนือกว่าฟิล์มพลาสติก ดังนี้

1. บรีโอกฟิล์มได้พร้อมกับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอันเป็นจุดเด่นที่เห็นได้โดยง่าย เป็นการช่วยลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม
2. ในกรณีที่ไม่มีบรีโอกฟิล์ม ฟิล์มที่ทิ้งไปสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้โดยง่าย เป็นการลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมเช่นกัน
3. เพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส ชวนให้น่ารับประทานผลิตภัณฑ์มากขึ้น และเข้าได้ดีกับสารประกอบที่ให้กลิ่นรส และความหวาน เป็นต้น
4. เสริมคุณค่าอาหาร
5. ใช้หุ้มอาหารโดยแยกเป็นแต่ละชิ้น

6. ใช้เป็นแผ่นกั้นระหว่างอาหารที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการถ่ายเทความชื้นและไขมันในเนื้ออาหารที่แตกต่างกัน เช่น พืชฯ พาย เป็นต้น
7. ทำหน้าที่เก็บสารป้องกันจุลินทรีย์ และยังควบคุมอัตราซึมของสารกันเสียจากฟิล์มเข้าสู่เนื้ออาหาร
8. สามารถทำฟิล์มให้เป็นเม็ดแคปซูล บรรจุสารให้กลิ่นรสและสารทำให้ขึ้นฟู (leavening agent) ได้ เพื่อควบคุมการเติมสารที่ใส่ในอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ
9. สามารถใช้ร่วมกับฟิล์มพลาสติกโดยใช้ฟิล์มที่รับประทานได้สัมผัสกับอาหารโดยตรง

องค์ประกอบของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) เป็นแป้งที่ผลิตจากหัวมันสำปะหลังสดซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. เป็นพืชหัวที่ได้จากพืชวงศ์ Euphorbiaceae เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่สะสมอาหารไว้ที่ราก ซึ่งใช้เป็นอาหารมนุษย์ประมาณร้อยละ 65 นอกจากนั้นใช้เป็นอาหารสัตว์และวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารอื่น ๆ มีโครงสร้างของหัวดังภาพ 1 ประกอบด้วย เปลือก เนื้อ และท่อน้ำตาลหัว

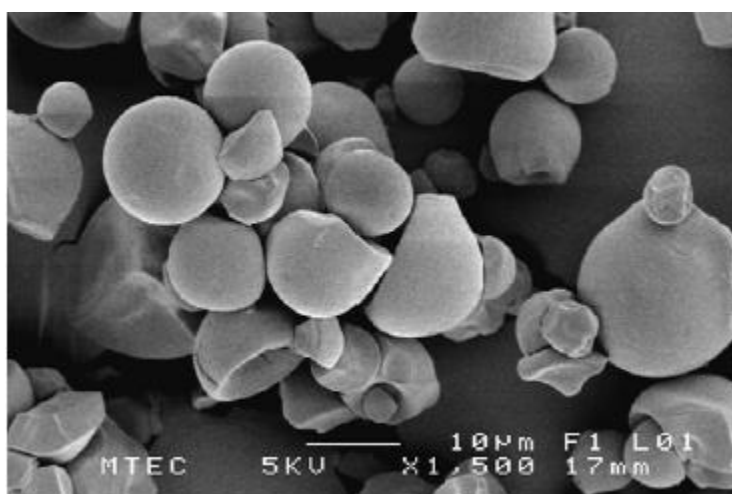


ภาพ 1 โครงสร้างของหัวมันสำปะหลัง
ที่มา : อรอนงค์ (2549)

องค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลัง ประกอบด้วยความชื้นร้อยละ 60-65 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 30-30 สารละลายในอีเทอร์ร้อยละ 0.2-0.6 โปรตีนร้อยละ 1-2 วิตามินและเกลือแร่เล็กน้อย อย่างไรก็ตามมันสำปะหลังจะมีแคลเซียมและวิตามินซีอยู่มาก นอกจากนั้นก็มี

วิตามินบีหลายชนิด ได้แก่ ไทอะมิน ไรโบฟลาวิน และกรดนิโคตินิก ในส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มีในมันสำปะหลังนั้นจะประกอบด้วยเส้นใยหยาบร้อยละ 3.2-4.5 คาร์โบไฮเดรตอื่นร้อยละ 20 และสารแอมิน โดยที่ปริมาณสตาร์ชในหัวมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกจนถึงอายุสูงสุด 8-12 เดือน ถ้าปลูกนานไปกว่านี้ ปริมาณสตาร์ชจะลดลงแต่เส้นใยจะเพิ่มขึ้น (อรอนงค์, 2549)

แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในอุตสาหกรรมมีองค์ประกอบดังนี้ ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 โปรตีนไม่เกินร้อยละ 0.3 สตาร์ชไม่น้อยกว่าร้อยละ 97.5 เยื่อใยไม่เกินร้อยละ 2.2 โดยน้ำหนักแห้ง องค์ประกอบที่มีมากที่สุด แป้งมันสำปะหลัง คือ สตาร์ช เมื่อพิจารณาลักษณะของเม็ดสตาร์ชแป้งมันสำปะหลังจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกราดลำแสงพบว่า โดยส่วนใหญ่เป็นรูปไข่ที่ปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก ผิวตรงส่วนตัดมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้งอีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ พบรอยบุ๋ม (eccentric Hilum) อย่างเห็นได้ชัด และแต่ละเม็ดมีความยาวตั้งแต่ 15-35 ไมโครเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2521)



ภาพ 2 เม็ดสตาร์ชของมันสำปะหลังจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกราดลำแสง
ที่มา : Loksuwan (2007)

โครงสร้างทางเคมีและสมบัติบางประการของแป้ง

โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

ความหมายของคำว่า “แป้ง” ในที่นี้หมายถึง สารประกอบอะมิโลส (amylose) และ อะมิโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งในบางครั้งเราอาจต้องใช้คำว่า “สตาร์ช” (starch) แทนเพื่อให้ได้ความเข้าใจที่ถูกต้อง คำว่าแป้งในภาษาไทย เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว นั้น มีความหมายแทน ผงสีขาว ที่ส่วนประกอบมีได้ทั้งโปรตีน ไขมัน เกลือแร่ และสตาร์ช หรือที่ภาษาอังกฤษเรียกว่า “ฟลาวัว” (flour)

โมเลกุลของสตาร์ชนั้นจะประกอบไปด้วย D (+) glucose unit ซึ่งอยู่ในรูปของ α -glucopyranosering แต่ละหน่วยของกลูโคสมีพันธะเชื่อมเข้าด้วยกัน โดยเชื่อมต่อกับอะตอมของออกซิเจนที่ตำแหน่ง 1,4 ทำให้โมเลกุลมีลักษณะคล้ายเส้นด้าย โดยทั่วไปสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ อะมิโลสและอะมิโลเพคติน อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เส้นตรงมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 1.5×10^5 - 10^6 มีค่าระดับของการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization = DP) ในช่วง 250-400 AGU (Anhydro-Glucose Unit) ต่อ 1 โมเลกุลของอะมิโลส (Hood, 1982) แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 24.0-26.3 (อรรณพ, 2529) อะมิโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีสมบัติในการเกิดฟิล์ม ส่วนอะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์กิ่งก้านที่ประกอบด้วยโมเลกุลส่วนเส้นตรงร้อยละ 64-69 มีค่า DP อยู่ในช่วง 12-50 AGU เชื่อมต่อกับส่วนกิ่งก้านของพอลิเมอร์สั้น ๆ ของกลูโคส 20-26 หน่วยซึ่งแทรกอยู่ประมาณร้อยละ 4-6 ที่ตำแหน่ง α -1,6 มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10^6 - 10^9 (Hood, 1982) แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลเพคตินร้อยละ 73.7-76.0 (อรรณพ, 2529) อะมิโลสและอะมิโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงใน ตาราง 1

ตาราง 1 ความแตกต่างระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน

Amylose	Amylopectin
1. ละลายน้ำได้ดีกว่า	1. ละลายน้ำได้น้อยกว่า
2. เมื่อต้มในน้ำหนืดข้นน้อยกว่าแต่ข้นกว่า	2. หนืดข้นมากกว่าและใส
3. ให้สีน้ำเงินกับไอโอดีน	3. ให้สีแดงม่วงหรือสีน้ำตาลกับไอโอดีน
4. ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรง	4. โมเลกุลต่อเนื่องกันคล้ายกิ่งไม้
5. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	5. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
6. ต้มแล้วทิ้งไว้ จับเป็นวุ้นได้	6. ไม่จับเป็นวุ้น

ที่มา : Beynum and Roels (1985)

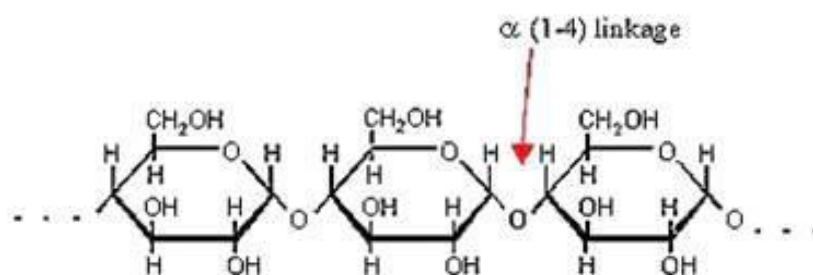
อะมิโลสและอะมิโลเพคตินจะเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบแบบแผนในเม็ดสตาร์ช ภายในเม็ดสตาร์ชประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. Crystalline region โมเลกุลเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม ๆ อย่างมีระเบียบเหมือนผลึกจะมีอะมิโลสประกอบอยู่มาก โดยประกอบตามความยาวกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลเพคตินด้วย พันธะไฮโดรเจนระหว่างภายในโมเลกุลเดียวกัน และต่างโมเลกุลอย่างมากมาย ทำให้โมเลกุลในบริเวณนั้นหนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวกันสูง การดูดน้ำและการพองตัวเกิดขึ้นอย่างจำกัด เนื้อค่อนข้างแข็งและไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น

2. Amorphous region โมเลกุลจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยอะมิโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้น้อย และเป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี ไวต่อปฏิกิริยา

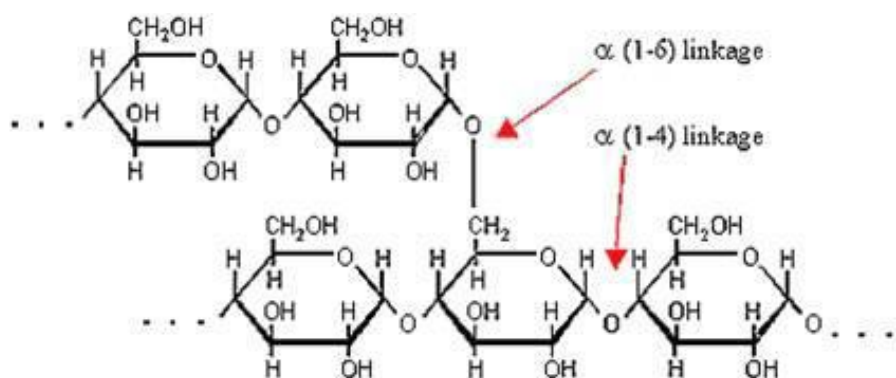
ส่วนที่เป็นผลึกกับส่วนที่ไม่เป็นผลึกนี้จึงเรียงตัวสลับกัน ทำให้เกิดการหักเหของแสงเป็นเงากากบาทเมื่อส่องผ่านแสงโพลาไรซ์ (polarized light) เรียกว่าไบฟรินเจนซ์ (birefringence) แบ่งต่างชนิดกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลส และอะมิโลเพคตินแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง ความหนืด ความใส และการคืนตัวของแป้งสุก (กล้าณรงค์, 2538)

โดยธรรมชาติแป้งจะไม่ละลายน้ำเมื่ออยู่ในสภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ใกล้กันในโมเลกุลสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนนี้อาจเชื่อมกับน้ำทำให้สามารถพองตัวได้เล็กน้อยและมีลักษณะผันกลับได้ เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง เม็ดสตาร์ชจะเริ่มพองตัว เมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้นระดับที่เม็ดสตาร์ชสูญเสียรอยกากบาทภายใต้แสงโพลาไรซ์ที่สภาวะนี้เรียกว่า สตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์ ซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ การพองตัวของเม็ดสตาร์ชจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณออสชันโดยมีโมเลกุลของน้ำมาเกาะมากขึ้น ขณะเดียวกันพันธะไฮโดรเจนบริเวณรอบผลึกเม็ดสตาร์ชจะเริ่มถูกทำลายส่วนที่เป็นโมเลกุลอะมิโลสถูกชะออกมาในน้ำ ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่ม ได้ลักษณะข้นเป็นแป้งเปียก ซึ่งจัดเป็นพวกโซล (sol) แป้งมันสำปะหลังมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ 65-70 องศาเซลเซียส สมบัติของแป้งเปียกมันสำปะหลังจะใส มีความหนืดสูง เนื้อสัมผัสหยาบ ความต้านทานต่อแรงเสียดสีต่ำและอัตราการกลับคืนตัวของแป้งต่ำ (Whistler et al., 1984)



ภาพ 3 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา : Hizukuri (1985)



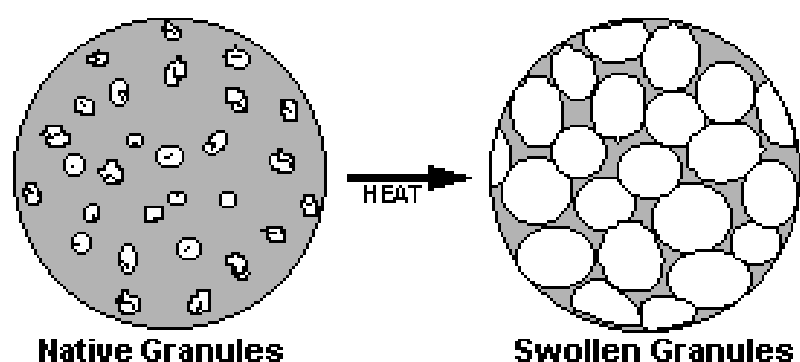
ภาพ 4 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน

ที่มา : Hizukuri (1985)

การพองตัวและการละลาย

โดยทั่วไปแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนสังเกตเห็นไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง สำหรับในส่วน Crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวม ๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำ แป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วน Crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลาย

ตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (ภาพ 5) โมเลกุลในส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพ คล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคล้ายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารถลายมากขึ้น

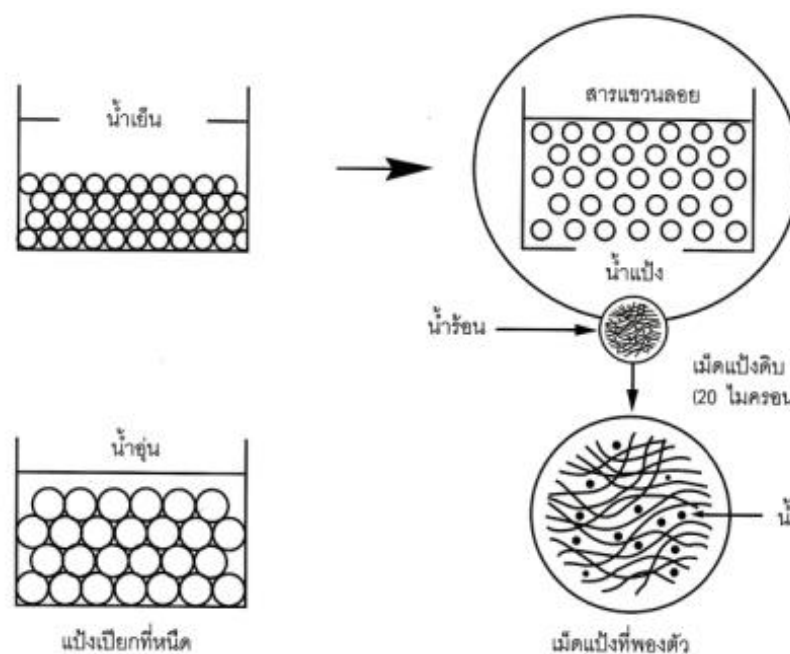


ภาพ 5 การพองตัวของเม็ดแป้ง

ที่มา : Collison (1968)

การเกิดเจลาติโนเซชันด้วยความร้อน

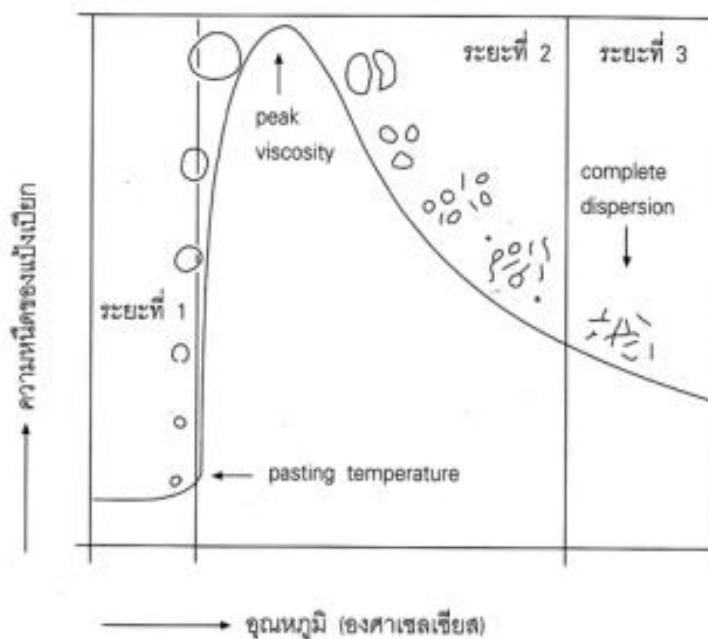
โดยทั่วไปแป้งจะไม่ละลายในน้ำเย็น เนื่องจากการจัดเรียงในส่วนที่เป็นผลึกของโมเลกุลเป็นไปอย่างมีระเบียบและซับซ้อนกัน โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันจะเกาะเกี่ยวด้วยแรงพอเหมาะซึ่งกันและกัน โอกาสที่น้ำจะซึมเข้าไปในส่วนที่เป็นอสัณฐานของเม็ดแป้งซึ่งไม่แข็งแรง จะมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนไว้บ้าง แต่เมื่อสารแขวนลอยแป้งในน้ำเย็นได้รับความร้อนอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เม็ดแป้งจะสูญเสียรอยกักบาท เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ก่อนที่จะเห็นการพองตัวของมัน ซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิเจลาติโนเซชัน แสดงว่าโมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นผลึกคลายตัวลงเกิดปฏิกิริยาการดูดน้ำ และเกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง ซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ ทำให้สารถลายของแป้งมีความหนืดและใสขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า เจลาติโนเซชัน (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



ภาพ 6 การเปลี่ยนแปลงของเมมเบรนในระหว่างการให้ความร้อน

ที่มา : กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล (2546)

การเปลี่ยนสถานะของเมมเบรนแบ่งได้ 3 ระยะ คือระยะแรกเมมเบรนจะดูดน้ำได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผลึกกันได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ ชิดหุ้มน้ำได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เมมเบรนยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อใส่สารเคมี หรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลาย น้ำเบ่งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของเบ่ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เมมเบรนจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเมมเบรนจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เมมเบรนจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน เมมเบรนมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำเบ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เบ่งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเมมเบรนจะไม่แน่นอน การละลายของเบ่งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาตินในเซชันของเบ่งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเบ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่าง ๆ ได้ดีกว่า (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



ภาพ 7 ระยะในการเกิดเจลในเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา : Sanders (1996)

พลาสติกไซเซอร์กับฟิล์ม

ความหมาย และสมบัติของพลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ตามนิยามของ IUPAC หมายถึง สารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติกหรือ elastomer แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนต่อการใช้งาน และการยืดตัว (Bakker, 1986) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) และพลาสติกไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) พลาสติกไซเซอร์ภายนอกเป็นสารที่เติมลงไปในการสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะเวเลนซีทุติยภูมิ (secondary valency) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลงเกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว (Mellan, 1961) ส่วนพลาสติกไซเซอร์ภายในเป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) (Billmeyer, 1962)

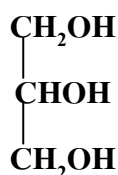
สมบัติของพลาสติกไซเซอรที่ดียังต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์ม (compatible) โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ควรจะมีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ (Beerler and Finney, 1983) ถ้าใช้พลาสติกไซเซอรที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันมิให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำฟิล์มให้แห้ง ฟิล์มที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถคงความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน (Guilbert, 1986)

ฟิล์มบริโกลได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับฟิล์มจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ คือ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงและสารทำละลายแล้วยังมีพลาสติกไซเซอรเป็นองค์ประกอบสำคัญ (Mahmoud and Savello, 1992) เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มให้มีความยืดหยุ่นเพียงพอ ไม่แตกหักระหว่างการนำไปใช้และเก็บรักษา พลาสติกไซเซอรที่นำมาใช้ต้องได้รับอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (Food and Drug Administration: FDA) โดยมีการพิสูจน์และยอมรับแล้วว่าไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคทั้งในระยะเฉียบพลันและระยะยาว พลาสติกไซเซอรที่นำมาใช้กับฟิล์มบริโกลได้มีหลายประเภท ได้แก่ โมโนไดแซ็กคาไรด์ และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออล และลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิด ปริมาณการใช้พลาสติกไซเซอรโดยทั่วไปประมาณร้อยละ 10-60 โดยน้ำหนักแห้ง (Guilbert, 1986)

ชนิดของพลาสติกไซเซอร

1. พอลิออล (polyols) หรือ พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งหมู่คีโตน หรือแอลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิออลบางชนิดพบในผลไม้โดยเฉพาะที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น ซอร์บิทอล หรือพวกที่ผลิตจากปฏิกิริยาไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (hydrogenation) พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล มีแคลอรีเพียง 2.4 กิโลแคลอรีต่อกรัม เนื่องจากถูกดูดซึมได้ช้ามากจึงสามารถใช้กับผู้ที่ป่วยโรคเบาหวานได้ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้ฟันผุ เพราะแบคทีเรียในปากไม่สามารถใช้ได้ JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) กำหนดปริมาณการบริโภคต่อวัน (ADI) ของพอลิออลเป็น “Not Specified” หมายถึง สามารถใช้ได้ในระดับที่จำเป็นต่อกระบวนการแปรรูปเพื่อให้ได้อาหารที่มีคุณลักษณะตามต้องการ อย่างไรก็ตามพอลิออลอาจมีผลทำให้ระคายเคือง ดังนั้นผู้ใหญ่ไม่ควรบริโภคเกิน 60-80 กรัมต่อวัน เด็กอายุ 5-16 ปี ไม่ควรบริโภคเกิน 30-40 กรัมต่อวัน (Le Bot and Gouy, 1995)

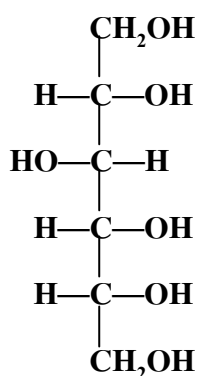
2. กลีเซอรอล (glycerol) หรือ กลีเซอริน (glycerin) เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโครงสร้าง $C_3H_8O_3$ โครงสร้างโมเลกุลดังภาพ 8 มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้ในการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด รสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารทำละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง (Windholz, 1976) ฟิล์มบริโกลได้หลายชนิดใช้ กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ (มณฑาทิพย์, 2534; Mahmoud and SaOvello, 1992; Gontard et al., 1993; Park et al., 1993; McHugh et al., 1994; Mark et al., 1996)



ภาพ 8 โครงสร้างของกลีเซอรอล

ที่มา : Windholz (1976)

3. ซอร์บิทอล (sorbitol) เป็นที่มีคาร์บอน 6 อะตอม น้ำหนักโมเลกุล 182 โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังภาพ 9



ภาพ 9 โครงสร้างของซอร์บิทอล

ที่มา : Le Bot and Gouy (1995)

ซอร์บิทอลพบในผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิล แพร์ เชอร์รี่ เป็นต้น ในทางการค้าจะผลิต D-sorbitol จากการเร่งปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนของ D-glucose ซึ่งได้จากการย่อยสลายที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยเอนไซม์ ซอร์บิทอลเป็นผลึกสีขาวอยู่ในรูปของ γ -sorbitol ซึ่งคงตัว (Gonze and Rapaille, 1992) มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาลครึ่งหนึ่ง ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำ เป็นสารทำให้น้ำมันที่ไม่ดี เมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 3-60 สามารถรักษาความชื้นและคงลักษณะของความยืดหยุ่นไว้ได้ (Le Bot และ Gouy, 1995)

4. พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) มีสูตรทั่วไปคือ $\text{H}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OH}$ โดยที่ n มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 ปกติแล้วจะบอกค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วย เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล-400 พอลิเอทิลีนไกลคอลมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวหรืออยู่ในรูปของเหลวใส มีความข้นหนืด ละลายน้ำได้ ให้สารละลายใส เสื่อมเสียยากเนื่องจากเชื้อราไม่สามารถเจริญได้ มีความเป็นพิษต่ำ สำหรับพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 มีค่า n อยู่ระหว่าง 8.2-9.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 380-420 อยู่ในรูปของเหลวข้นหนืด มีกลิ่นจาง ๆ ไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเล็กน้อย (Windholz et al., 1976)

บทบาทของพลาสติกไซเซอรในฟิล์มที่รับประทานได้

การเติมพลาสติกไซเซอรในระหว่างการเตรียมฟิล์มบริโภคนั้นใช้วิธีการละลายโดยทั้ง พลาสติกไซเซอรและพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกัน ระหว่างการละลายมีการกวนผสมพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาเหมาะสมแล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกไปในสภาวะที่ไม่รุนแรง การใช้พลาสติกไซเซอรลักษณะนี้เป็นแบบภายนอก (external) คือ เมื่อเติมพลาสติกไซเซอรลงไปแล้วจะไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะเวเลนซีทุติยภูมิ (secondary valency) (Mellan, 1961) เกิดพันธะมีขั้วหรือพันธะไฮโดรเจนอย่างหลวม ๆ ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลงซึ่งเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ อิทธิพลของความร้อนระหว่างการเตรียมสารละลายฟิล์มทำให้พลาสติกไซเซอรสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างสายพอลิเมอร์ง่ายขึ้น และพันธะไฮโดรเจนหรือแรงอื่น ๆ ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกหักล้างไป เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอร ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถจับกันเองได้ (Beerler and Finney, 1983) ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดความเปราะแตกง่าย การต้านทานแรงฉีกขาด (tear resistance) เพิ่มขึ้น แต่การต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) ลดลง นอกจากนี้พลังงานที่ใช้แยกสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันยังมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ไปกระตุ้นการแพร่กระจายของก๊าซและไอน้ำให้ผ่านฟิล์ม

(Energy of Activation for Diffusion = E_d) ดังนั้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ลดลงทำให้ค่า E_d ลดลง การซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น (Banker et al., 1966)

ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติของฟิล์ม

สมบัติของฟิล์มที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปจะเป็นอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับชนิด โครงสร้างทางเคมี ความเข้มข้นที่ใช้ และระดับการกระจายตัวของฟิล์มนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ รวมทั้งการเตรียมฟิล์มอีกด้วย (Kester และ Fennema, 1986) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์ อาทิ

Mark et al. (1966) ศึกษาการเตรียมฟิล์มจาก amylo maize starch ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 71 ขึ้นรูปบนแผ่นกระจกเคลือบซิลิโคนแล้วนำไปทำแห้งโดยใช้ลมร้อนพบว่าฟิล์มที่ได้ทั้งที่มีการใช้กลีเซอรอลร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก และฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลไม่พบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 5 และ 25 องศาเซลเซียสในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 100

Kim et al. (2002) ศึกษาสมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และการละลายของ highly carboxy methylated starch-based edible films (HCMS-based films) ที่มีพลาสติกไซเซอร์ คือ ซอร์บิทอล (sorbitol, S) ไซลิทอล (xylitol, X) แมนนิทอล (mannitol, M) และ กลีเซอรอล (glycerol, G) พบว่าการต้านแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ S, M และ X เพิ่มขึ้น ส่วนการยืดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ S, M, X และ G เพิ่มขึ้น แสดงว่าคุณสมบัติของ biopolymers และชนิดของพลาสติกไซเซอร์มีผลต่อความยืดหยุ่นของฟิล์ม

Gilleland et al. (2003) ศึกษา highly flexible starch-based films ที่มีแป้งดัดแปรร้อยละ 25-75 (น้ำหนักแห้ง) ของแป้งที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000-2,000,000 สามารถปรับเปลี่ยนทางเคมีโดยการเติมพลาสติกไซเซอร์จะทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น และต้านทานน้ำและไขมันได้มากขึ้น

เกศศิณี และคณะ (2539) ศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า หรือแป้งมันสำปะหลังผสม glycerol หรือ glycerin monostearate ในปริมาณร้อยละ 0.2, 5 และ 10 ซึ่งผ่านการดัดแปรโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันพบว่า ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มมีความเรียบขึ้น แต่ความคงทนต่อการแตกเมื่อพับลดลง การผสม glycerin monostearate ในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ไม่ทำให้ฟิล์มมีคุณลักษณะดีขึ้น ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรอลมีลักษณะใสและยืดหยุ่นดี ส่วนฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลมีสีขาวขุ่น ยืดหยุ่นน้อยกว่า

ธารทิพย์ (2544) ได้พัฒนาฟิล์มบริโกลได้จากแป้งบุก ซึ่งมีสารสำคัญคือ กลูโคแมนแนน (glucomannan) โดยมีพลาสติกไฮเซอรคือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล โพลีเอธิลีน-ไกลคอล และคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลส เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแป้งบุก ค่าการต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของแป้งบุกจับตัวกันมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไฮเซอรจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง เป็นเพราะพลาสติกไฮเซอรเข้าไปแทรกในโครงสร้างภายในของแป้งบุกทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง ความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกไฮเซอรเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อความเข้มข้นของแป้งบุกเพิ่มขึ้น

กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบท

สมบัติทางเคมี

1. กรดซอร์บิก

กรดซอร์บิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวสายตรง ชื่อทางเคมีคือ 2,4-Hexadienoic acid สูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOH}$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 112.13 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีอื่น ๆ ของกรดซอร์บิก แสดงในตาราง 2 ผลึกของกรดซอร์บิกมีลักษณะเป็นเกล็ด ไม่มีสี สามารถพบในลักษณะเป็นผงหรือเม็ดสีขาว อ่อนนุ่มแตกหักง่าย มีกลิ่นและรสชาติของกรดอย่างเด่นชัด กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) ของกรดซอร์บิกสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะได้ดีเกิดเป็นสารประกอบประเภทเกลือหรือเอสเทอร์ มีผลในการยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ (antimicrobial activity) เป็นอย่างดี (sofos and Busta, 1993)

โดยทั่วไปแล้วกรดซอร์บิกจะมีประสิทธิภาพที่ pH น้อยกว่า 6.5 ประสิทธิภาพในการยับยั้งจะสูงขึ้นหากค่า pH ลดลง จากตาราง 3 จะเห็นว่าความสามารถในการแตกตัวของกรดซอร์บิกจะขึ้นอยู่กัค่า pH กล่าวคือยิ่งค่า pH ต่ำลง กรดซอร์บิกก็ยิ่งแตกตัวได้ในปริมาณน้อยลงด้วย กล่าวคือ กรดซอร์บิกในรูปไม่แตกตัว (undissociated from) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีกว่ากรดซอร์บิกในรูปแตกตัว (dissociated form) (Lindsay, 1985)

กรดซอร์บิกละลายในน้ำได้น้อย จากตาราง 4 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส กรดซอร์บิกละลายได้เพียง 0.15 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร การละลายจะเพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิและ/หรือค่า pH สูง กรดซอร์บิกละลายได้มากขึ้นในกรดน้ำส้ม (glacial acetic acid) ในแอลกอฮอล์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอทานอล และในไขมันโดยกรดซอร์บิกละลายในไขมันได้มากกว่าในน้ำประมาณสามเท่า เกลือของกรดซอร์บิกละลายน้ำได้ดีกว่ากรดซอร์บิก ในอุตสาหกรรมอาหาร

จึงนิยมใช้เกลือซอร์เบทมากกว่ากรดซอร์บิก เกลือซอร์เบทที่มีจำหน่ายในทางการค้า ได้แก่ แคลเซียมซอร์เบท โซเดียมซอร์เบท และ โพแทสเซียมซอร์เบท ทั้งนี้จะนิยมใช้เกลือโพแทสเซียมซอร์เบทมากที่สุด เพราะละลายน้ำได้ดีที่สุดประกอบกับสมบัติที่ดีด้านอื่น ๆ กล่าวคือมีความคงตัวสูงและวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก (sofos and Busta, 1993)

ตาราง 2 สมบัติกายภาพและทางเคมีของกรดซอร์บิกและ โพแทสเซียมซอร์เบท

สมบัติ	กรดซอร์บิก	โพแทสเซียมซอร์เบท
ชื่อทางเคมี	2,4-Hexadienoic acid	2,4-Hexadinoic acid potassium salt
สูตรโมเลกุล	$\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOH}$	$\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOK}$
น้ำหนักโมเลกุล	112.13	150.22
อุณหภูมิติดไฟ (°ซ)	126	-
ค่าคงที่ในการแตกตัวเป็นไอออน ที่ 25 °ซ	1.73×10^{-5}	-
ความหนาแน่น ที่ 20 °ซ (กรัม/มิลลิลิตร)	-	1.36
ช่วงหลอมเหลว (°ซ)	132-137	สลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 270 °ซ
Heat of Combustion ที่ 25 °ซ (Btu/lb)	11,927	-
ความเป็นด่าง/ความเป็นกรด	-	1.1 ml 0.1 N NaOH to 0.8 ml 0.1 N HCl per 1.1 g
ความดันไอ (mmHg)		
ที่ 20 °ซ	< 0.001	-
ที่ 120 °ซ	10	-
ที่ 140 °ซ	43	-
จุดเดือด (°ซ) ที่ความดัน		
760 มิลลิเมตรปรอท	สลายตัว	-
50 มิลลิเมตรปรอท	143	-
10 มิลลิเมตรปรอท	119	-
ความบริสุทธิ์ไม่เกิน (ร้อยละ)	> 98	> 98
ปริมาณความชื้นไม่เกิน (ร้อยละ)	0.5	1.0
ปริมาณโลหะหนักไม่เกิน (ppm)	10	10
ปริมาณ Arsenic ไม่เกิน (ร้อยละ)	3	3
ปริมาณเถ้าไม่เกิน (ร้อยละ)	0.2	-

ที่มา: Sofos and Busta (1993)

ตาราง 3 ผลของความเป็นกรดเป็นด่างต่อการแตกตัวของกรดซอร์บิก

ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	ปริมาณกรดซอร์บิกในรูปไม่แตกตัว (ร้อยละ)
3	98
4	86
5	37
6	6
7	0.6

ที่มา: Giese (1994)

2. โปแตสเซียมซอร์เบท

โปแตสเซียมซอร์เบทมีชื่อทางเคมีคือ 2,4-Hexadinoic acid potassium salt สูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH=CH-COOK}$ น้ำหนักโมเลกุล 150.22 มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นเม็ดสีขาว สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโปแตสเซียมซอร์เบทแสดงในตาราง 2 และจากตาราง 4 จะเห็นว่าโปแตสเซียมซอร์เบทละลายในน้ำได้ดีกว่ากรดซอร์บิก ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โปแตสเซียมซอร์เบทสามารถละลายได้ดีถึง 58.20 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร การใช้โปแตสเซียมซอร์เบทในอาหารสามารถละลายได้มากกว่ากรดซอร์บิกถึงร้อยละ 50 และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 74 ของกรดซอร์บิกที่มีน้ำหนักเท่ากัน

ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ของซอร์เบทจะเพิ่มขึ้นหากค่า pH ลดลง เช่นเดียวกับกรดซอร์บิก เพราะค่าคงที่ในการแตกตัว (Dissociation constant, pK_a) เท่ากับ 4.76 แม้ว่าซอร์เบทจะยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ ๆ แต่ก็มีรายงานว่า ซอร์เบทยังคงมีประสิทธิภาพที่ค่า pH เท่ากับ 6.5 หรือแม้กระทั่งที่ค่า pH สูงเท่ากับ 7.0 ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของซอร์เบทเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุกันเสียชนิดอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น โพรพิโอนัทและเบนโซเอตจะมีประสิทธิภาพที่ค่า pH ไม่เกิน 5.0-5.5 และ 4.0-4.5 ตามลำดับ

ตาราง 4 ค่าการละลาย (ร้อยละ) ของกรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบท

ตัวละลาย	กรดซอร์บิก	โปแตสเซียมซอร์เบท
น้ำ อุณหภูมิ 20°ซ (ความเป็นกรดเป็นด่าง 3.1)	0.15	58.20
น้ำ อุณหภูมิ 20°ซ (ความเป็นกรดเป็นด่าง 4.4)	0.22	-
น้ำ อุณหภูมิ 20°ซ (ความเป็นกรดเป็นด่าง 5.9)	1.02	-
น้ำ อุณหภูมิ 50°ซ	0.55	61.00
น้ำ อุณหภูมิ 100°ซ	4.00	64.00
น้ำมันข้าวโพด อุณหภูมิ 20°ซ	0.80	0.01
น้ำมันข้าวโพด อุณหภูมิ 50°ซ	2.00	0.03
น้ำมันถั่วเหลือง อุณหภูมิ 20°ซ	0.52	-
น้ำมันเมล็ดฝ้าย อุณหภูมิ 20°ซ	1.00	0.01
สารละลายกลูโคส ร้อยละ 10	0.15	58.00
สารละลายกลูโคส ร้อยละ 40	0.10	45.00
สารละลายกลูโคส ร้อยละ 60	0.08	28.00
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 5	0.11	47.00
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 10	0.07	34.00
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 15	0.04	12.00 – 15.00
กรดอะซิติก	11.50 - 12.30	-
กรดแลคติก ร้อยละ 85.5	2.25	-
กรดซิตริก ร้อยละ 50	0.26	-
กรดฟอสฟอริก ร้อยละ 85	0.12	-
เอทานอล ร้อยละ 5	0.16	57.40
เอทานอล ร้อยละ 20	0.29	54.60
เอทานอล ร้อยละ 50	-	45.30
เอทานอล ร้อยละ 95	12.60 – 14.50	6.50
เอทานอล ร้อยละ 100	12.90 – 14.80	2.00
พอร์ไพรีนไกลคอล อุณหภูมิ 20°ซ	0.20	55.00
พอร์ไพรีนไกลคอล อุณหภูมิ 50°ซ	0.50	48.00
พอร์ไพรีนไกลคอล อุณหภูมิ 100°ซ	5.50	20.00
เพนเทน อุณหภูมิ 25°ซ	0.15	-
เพนเทน อุณหภูมิ 50°ซ	0.06	-
เพนเทน อุณหภูมิ 75°ซ	1.80	-
เบนซีน อุณหภูมิ 25°ซ	2.34	< 0.01
เบนซีน อุณหภูมิ 50°ซ	8.14	-
เบนซีน อุณหภูมิ 75°ซ	24.00	-
เอทิลเอเทอร์ อุณหภูมิ 20°ซ	5.00 – 5.30	0.10
กลีเซอรอล อุณหภูมิ 20°ซ	0.31	0.20
อะซิโตน อุณหภูมิ 20°ซ	9.20	0.10
เมทานอล อุณหภูมิ 20°ซ	12.90	16.00
ไซโคลเฮกเซน อุณหภูมิ 20°ซ	0.28	-
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อุณหภูมิ 20°ซ	1.30	< 0.01

ที่มา: Sofos and Busta (1993)

ผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์และแห้งจะมีความคงตัว (stable) ดีกว่าสารละลายซอร์เบท สารละลายซอร์เบทจะเสื่อมสลายได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนิลต่าง ๆ เช่น โครโทนัลดีไฮด์ (crotonaldehyde) มาโลนัลดีไฮด์ (malonaldehyde) อะเซตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) และ เบต้าคาร์บอกซีแลคโตลีน (β - carboxylactolein) อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายซอร์เบทจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อค่า pH ต่ำลงในสภาวะที่มีแสงและกรด วิธีการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและการสูญเสียกรดซอร์บิกคือ การใช้สารต้านการออกซิเดชัน (antioxidants) การใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมและการเก็บรักษาในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ภัทรา, 2542)

กรดซอร์บิกที่เติมลงในอาหารจะสูญเสียไปในระหว่างการเก็บอาหาร ปริมาณที่สูญเสียจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณซอร์เบทที่ใช้ในอาหาร ค่า pH องค์ประกอบของอาหาร ความชื้น กระบวนการผลิตอาหาร ภาชนะบรรจุที่ใช้ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บอาหาร วัตถุเจือปนอื่น ๆ ที่มีอยู่ในอาหารก็มีผลต่อการสูญเสียของซอร์บิกด้วยเช่นกัน มีรายงานว่าโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3.5 และ 8.0 ทำให้กรดซอร์บิกสลายไปมากขึ้น แต่โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 13 กลับช่วยป้องกันการสลายตัวของกรดซอร์บิก

การแพร่ (diffusion) ของซอร์เบทเข้าสู่เนื้ออาหารจะเกิดมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับสมบัติต่าง ๆ ของอาหารนั่นเอง ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบ สมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง ความชื้น หรือค่าน้ำที่เป็นประโชชน์ ดังนั้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้ซอร์เบทสำหรับถนอมอาหาร ผู้ผลิตอาหารควรจะศึกษาถึงกลไกการแพร่ของกรดซอร์บิกเข้าสู่เนื้ออาหาร เพื่อที่จะสามารถควบคุมให้กรดซอร์บิกแพร่เข้าสู่เนื้ออาหารมากที่สุด ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร

กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบทเป็นสารประกอบที่ไวต่อความร้อน ความชื้น และแสงแดด (ภัทรา, 2542) ดังนั้นเพื่อป้องกันการถูกทำลายจากปัจจัยดังกล่าว จึงควรเก็บรักษาวัตถุดิบเหล่านี้ในภาชนะบรรจุที่ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้ดี พร้อมทั้งเก็บภาชนะดังกล่าวในบริเวณที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำ ไม่มีแสงแดด (Sofos and Busta, 1993) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขระบุว่าให้เก็บกรดซอร์บิกในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท กันแสงได้ และเก็บที่อุณหภูมิไม่เกิน 38 องศาเซลเซียส (กระทรวงสาธารณสุข, 2527)

ผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์

1. การยับยั้งจุลินทรีย์

โดยทั่วไปแล้วซอร์เบทมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อยีสต์และเชื้อราได้ดีกว่าแบคทีเรีย ซอร์เบทความเข้มข้นร้อยละ 0.05-0.3 จะให้การยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหารมากที่สุด ประสิทธิภาพการยับยั้งของเกลือซอร์เบทต่อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มีดังนี้คือ

1.1 การยับยั้งเชื้อยีสต์

นักวิจัยหลายคนได้รายงานถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อยีสต์หลายชนิด (species) ได้แก่เชื้อยีสต์ในجنัส *Brettanomyces*, *Candida*, *Cryptococcus*, *Debaryomyces*, *Endomycopsis*, *Hansenula*, *Kloeckera*, *Pichia*, *Rhodotorula*, *Saccharomyces*, *Sporobolomyces*, *Torulaspora*, *Torulopsis* และ *Zygosaccharomyces* เป็นต้น

เริ่มมีรายงานการใช้ซอร์เบทเพื่อยับยั้งเชื้อยีสต์ เริ่มมีรายงานครั้งแรกในปีคริสต์ศักราช 1950 ในผลิตภัณฑ์ผักดอง ต่อมาจึงมีการใช้ซอร์เบทเพื่อยับยั้งเชื้อยีสต์ในอาหารชนิดอื่น ๆ เช่น น้ำผลไม้ ไวน์ เนยแข็ง ผลไม้แห้ง ผลิตภัณฑ์เนื้อ และผลิตภัณฑ์ปลา ซอร์เบทเป็นวัตถุกันเสียที่นิยมใช้มากที่สุดในอาหารที่มีค่า pH ต่ำและ/หรืออาหารกึ่งแห้ง เช่น เครื่องดื่มอัดก๊าซ น้ำสลัด น้ำเชื่อม แยม ลูกอม เยลลี่ Chocolate syrup และผลิตภัณฑ์จากมะเขือเทศ

1.2 การยับยั้งเชื้อรา

มีรายงานมากมายถึงประสิทธิภาพของซอร์เบทในการยับยั้งเชื้อราหลายชนิด ได้แก่ เชื้อราในجنัส *Alternaria*, *Ascochyta*, *Aspergillus*, *Botrytis*, *Cephalosporium*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Colletotrichum*, *Cunninghamella*, *Cunninghamella*, *Curvularia*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Gliocladium*, *Helminthosporium*, *Heterosporium*, *Humicola*, *Molinia*, *Mucor*, *Penicillium*, *Phoma*, *Pepularia*, *Pestalotiopsis*, *Pullularia*, *Rhizopus*, *Rosellinia*, *Sporotrichum*, *Trichoderma* และ *Truncatella* เป็นต้น

การใช้ซอร์เบทเพื่อยับยั้งเชื้อราในอาหารจะนิยมใช้ในเนยแข็งมากที่สุด และพบการใช้ในอาหารอื่น ๆ เช่นกัน ได้แก่ เนย ไข่กรอบ ผลไม้ น้ำผลไม้ แยม กล้วยฝัซ ขนมหัง และปลารมควัน

ซอร์เบทสามารถยังยั้งการสร้างสารพิษจากเชื้อรา (mycotoxin) ได้หลาย ๆ ชนิดทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและอาหารทั่ว ๆ ไป แต่ก็มีรายงานว่าภายใต้สภาวะบางอย่างการใช้ซอร์เบทที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าระดับที่ให้ผลยับยั้ง (sub inhibitory levels) อาจจะกระตุ้นการสร้างสารพิษจากเชื้อรา (ภัทวรา, 2542) ทั้งนี้การกระตุ้นการสร้างสารพิษจากเชื้อราโดยซอร์เบทที่มีความ

เข้มข้นต่ำนี้ขึ้นกับปัจจัยด้านต่าง ๆ คือ ชนิดและสายพันธุ์ของเชื้อ อุณหภูมิในการเก็บ และยังมีปัจจัยอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย

1.3 การยับยั้งแบคทีเรีย

แม้ว่าซอร์เบทจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อยีสต์และเชื้อรามากกว่าแบคทีเรีย แต่ก็มีรายงานถึงผลการยับยั้งของซอร์เบทต่อแบคทีเรียหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรียที่อยู่ในจีแนส *Acetobacter*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Enterobacter*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Alteromonas*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Moraxella*, *Mycobacterium*, *Pediococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Serratia*, *Staphylococcus*, *Vibrio* และ *Yersinia* เป็นต้น

ซอร์เบทสามารถยับยั้งหรือชะลอ (inactivated) *Listeria monocytogenes* ได้ทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและใน Cold-pack cheese food แต่จะขึ้นอยู่กับค่า pH และความเข้มข้นของซอร์เบทที่ใช้ แต่มีแบคทีเรียบางสายพันธุ์ (strains) ไม่ถูกยับยั้งโดยซอร์เบทและบางสายพันธุ์สามารถเมตาบอลิซึม (metabolize) ซอร์เบทได้ อย่างไรก็ตามสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าซอร์เบทสามารถยับยั้งแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ คือ แบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ แบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์คะตะเลสได้ (catalase-positive bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์คะตะเลสไม่ได้ (catalase-negative bacteria) แบคทีเรียที่ต้องการอากาศ (aerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ไม่ต้องการอากาศ (anaerobic bacteria) แบคทีเรียที่เจริญที่อุณหภูมิปานกลาง (mesospheric bacteria) และแบคทีเรียที่เจริญที่อุณหภูมิต่ำ (psychotropic bacteria) รวมทั้งแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (spoilage bacteria) และแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโทษ (pathogenic bacteria)

ในผลิตภัณฑ์เนื้อซอร์เบทสามารถยับยั้งแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคและแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียได้ ซึ่งได้แก่แบคทีเรียต่อไปนี้ *Salmonella*, *Clostridium botulinum*, *Cl. Perfringens*, *Cl. Sporogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Brochothrix thermosphacta*, *Serratia liquefaciens*, *Lactobacillus*, *Bacillus cereus*, *B. licheniformis* และ *Pseudomonas* จากการศึกษาในผลิตภัณฑ์เนื้อชนิดต่างๆ คือ เบคอน เนื้อหมัก (cured meat) เนื้อหมู เนื้อวัว เนื้อไก่ พบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งจะดีขึ้นหากใช้ซอร์เบทร่วมกับไนไตรท์ โซเดียมคลอไรด์ ฟอสเฟส สารต้านการเกิดออกซิเดชัน กรด ความเป็นกรดเป็นด่างต่ำ อุณหภูมิการเก็บรักษาค่ำ สภาวะที่มีออกซิเจนน้อยและสภาวะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูง

ซอร์เบทยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้โดยมีผลทำให้ช่วง Lag phase เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตลดลง นอกจากนั้นซอร์เบทยังมีผลต่อการสร้างสปอร์ของแบคทีเรียได้อีกด้วยโดยอาจจะรบกวนการสร้างสปอร์ การงอกของสปอร์ (spore germination) การเจริญเติบโตภายนอก (outgrowth) และ/หรือการแบ่งตัว (division) ของเซลล์

2. กลไกที่กระทำต่อจุลินทรีย์

การใช้ซอร์เบทความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 0.3 ปกติจะให้ผลยับยั้งต่อจุลินทรีย์เท่านั้น หากต้องการใช้เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์จะต้องใช้ความเข้มข้นสูงกว่านี้ ซอร์เบทมีผลต่อเซลล์ของจุลินทรีย์ คือ ยับยั้งการเจริญเติบโตและยับยั้งการเพิ่มจำนวนเซลล์ (cell multiplication) และซอร์เบทมีผลต่อแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ (spore-forming bacteria) คือ ยับยั้งการงอก (germination) และการเจริญเติบโตภายนอก (outgrowth) แต่ยังไม่มีความชัดเจนถึงกลไกที่แท้จริงที่ซอร์เบทกระทำต่อกิจกรรมเหล่านั้นของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามมีรายงานมากมายเกี่ยวกับกลไกที่ซอร์เบทกระทำต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ไว้ดังนี้

2.1 กลไกการยับยั้งการสร้างสปอร์ของแบคทีเรีย

มีการศึกษามากมายโดยแสดงให้เห็นถึงผลของซอร์เบทในการยับยั้งการงอกของสปอร์ของแบคทีเรีย (bacterial spore germination) หลายชนิด ทั้งในอาหารเลี้ยงเชื้อและในอาหาร ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการยับยั้ง ได้แก่ ชนิด (species) และสายพันธุ์ (strains) ของแบคทีเรีย ความเป็นกรดเป็นด่าง และความเข้มข้นของซอร์เบทที่ใช้ มีรายงานเสนอแนะกลไกการยับยั้งของซอร์เบทต่อการงอกของสปอร์ของแบคทีเรียไว้ ดังนี้

ซอร์เบทเป็นตัวยับยั้งแบบแข่งขันต่อกรดอะมิโนที่เหนี่ยวนำให้เกิดการงอกของสปอร์และสามารถย้อนกลับมาเป็นตัวยับยั้งได้อีก (reversible inhibitor)

ซอร์เบทไม่ได้ยับยั้งการปล่อย (triggering) สปอร์ แต่ยับยั้งขั้นตอนในกระบวนการงอกของสปอร์

ซอร์เบทอาจจะยับยั้งเอนไซม์ sporeolytic enzyme ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการงอกของสปอร์

ซอร์เบทอาจจะทำปฏิกิริยากับเมมเบรนของสปอร์

2.2 กลไกการยับยั้งต่อ Metabolic function ของจุลินทรีย์

ภายใต้สภาวะบางอย่างซอร์เบททำให้ลักษณะปรากฏและสัณฐานวิทยา (morphology) ของเซลล์จุลินทรีย์เปลี่ยนแปลง มีการศึกษาพบการเปลี่ยนแปลงในเซลล์จุลินทรีย์คือ

ในเซลล์ยีสต์ฟอสโฟโปรตีนจะจับตัวกันแน่น (dense phosphoprotein) นิวเคลียสผิดปกติไป (irregular nuclei) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) และแวคิวโอ (vacuoles) มีจำนวนเพิ่มขึ้นและมีขนาดหลาย ๆ ขนาด

มีรายงานในเซลล์แบคทีเรียบางชนิด เช่น เซลล์ของ *Clostridium botulinum* จะยาวและมีส่วนพองนูนทำให้การแบ่งเซลล์บกพร่อง ส่วน *Cl. sporogenes* ซึ่งเซลล์ปกติมีลักษณะเป็นเส้นใยแบบไม่มีผนังกั้น (filamentous and nonseptate) ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

คือ รูปร่างจะผิดแปลกไป มีส่วนโค้งงอหลายแห่ง หากมีผนังกันจะทำให้ผนังเซลล์ด้านใน (inner cell wall) หนาขึ้นผนังเซลล์ด้านนอก (outer cell wall) บางส่วนหายไป ส่วนเซลล์ของ *Alteromonas putrefaciens* พบว่าการใช้ซอร์เบทที่ค่า pH 7.0 จะเพิ่มค่าความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ของเซลล์และผนังเซลล์จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ Lysozyme นอกจากนี้ยังมีหลักฐานการเสียหายของเซลล์เมมเบรนของเซลล์อื่น ๆ อีกด้วยเช่นกัน

กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจเนื่องมาจาก

1. มีการรวมตัวของซอร์เบทกับโครงสร้างจำเพาะของเซลล์
2. เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการสังเคราะห์ทางชีววิทยา

(biosynthetic process) ภายในเซลล์

2.3 กลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การยับยั้งของซอร์เบทต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อาจจะแยกได้เป็นสองลักษณะ ลักษณะที่หนึ่งคือเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมมเบรนด้วยกลไกต่าง ๆ ดังนี้ซอร์เบททำให้มีการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยา ความสมบูรณ์และหน้าที่ของเซลล์เมมเบรน เช่น รูปร่างของเซลล์เมมเบรนโตขึ้น ซอร์เบทดูดซึมคาร์บอนจากสารตั้งต้นพวก กลูโคส Acetate, Succinate, Pyruvate, Lactate, Oxalate, α -ketoglutarate, Ethanol และ Acetaldehyde ส่วนลักษณะที่สองคือ มีการยับยั้งเมตาบอลิซึมของเซลล์ด้วยกลไกต่าง ๆ ดังนี้ ซอร์เบทยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งอาจนำไปสู่การทำลายกระบวนการที่สำคัญของเซลล์ เช่น การถ่ายเทสารเข้าออกเซลล์ กระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ การเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ เอนไซม์ที่ถูกยับยั้งได้แก่ Alcohol dehydrogenase, Fumarase, Enolase, Aspartase, Catalase, Malate dehydrogenase, α -Ketoglutarate dehydrogenase, Succinoc dehydrogenase และ Ficin หากซอร์เบทอยู่ในรูปกรดซอร์บิกแล้วจะละลายในไขมันได้ดี จึงอาจรบกวนกลไกการถ่ายเทสารตั้งต้น (เช่น กลูโคส หรือกรดอะมิโน) และการถ่ายเทอิเล็กตรอน เป็นผลให้เซลล์อดอยาก เนื่องจากการยับยั้งการถ่ายเทสารตั้งต้นเข้าสู่เซลล์ ซอร์เบทยับยั้งการใช้สารอาหาร (nutrient uptake) ของเซลล์ โดยอาจเกิดจากการทำให้ proton motive force เป็นกลาง การยับยั้งระบบการถ่ายเทอิเล็กตรอน การยับยั้งการสังเคราะห์ ATP การยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทสาร (transport enzyme) หรือการทำให้ปริมาณ ATP ลดลงโดยการไฮโดรไลซ์ ATP ด้วยระบบ sodium/ hydrogen pump เพื่อรักษาสมดุลของออสโมภายในเซลล์

3. การต้านทานของจุลินทรีย์ต่อกรดซอร์บิกและซอร์เบท

เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทางด้านองค์ประกอบหรือส่วนผสมของอาหาร ความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ วัตถุเจือปนที่ใช้ กระบวนการผลิตอาหาร ชนิดและสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน อุณหภูมิและบรรยากาศในการเก็บรักษาอาหาร ชนิดของภาชนะบรรจุ และความเข้มข้นของซอร์เบทที่ใช้ ดังนั้นประสิทธิภาพยับยั้งของซอร์เบทจึงอาจจะมีความน้อยแตกต่างกันในอาหารแต่ละชนิดหรืออาจจะไม่มีผลยับยั้งเลยก็อาจเป็นไปได้

มีรายงานว่าบางสภาวะ เชื้อยีสต์บางสายพันธุ์สามารถต้านทานต่อการยับยั้งของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งได้แก่เชื้อยีสต์ในจีนัส *Zygosaccharomyces*, *Saccharomyces*, *Torulopsis*, *Brettanomyces*, *Candida* และ *Triganopsis* กลไกที่อาจเป็นไปได้ในการต้านทานของ osmotolerant yeast ต่อการยับยั้งของซอร์เบทคือ การที่เซลล์ยีสต์หดตัวและลดขนาดรูที่เมมเบรน เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ต่ำเป็นผลให้ซอร์เบทซึมผ่านเข้าสู่ยีสต์ได้ช้า หรือเซลล์ยีสต์อาจจะผลิตสารบางอย่างเช่น polyosis เพื่อป้องกันไม่ให้ซอร์เบทยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

โดยทั่วไปแล้วเชื้อราจะถูกยับยั้งได้ดีด้วยซอร์เบท กล่าวคือซอร์เบทร้อยละ 0.1 ก็เพียงพอต่อการยับยั้งเชื้อราที่ถูกยับยั้งง่าย (sensitive molds) แต่ในสภาวะบางอย่างเชื้อราบางสายพันธุ์กลับสามารถเจริญเติบโตและเมตาบอไลซ์ซอร์เบทให้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ ดังที่มีการตรวจพบในเนยแข็งและผลิตภัณฑ์จากผลไม้ว่ามีการสลายไป (decomposition) ของซอร์เบทเนื่องจากเชื้อรา เชื้อราจีนัส *Penicillium* ที่แยกได้จากเนยแข็งที่ใช้ซอร์เบท สามารถเจริญเติบโตและเมตาบอไลซ์ซอร์เบทความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 0.18-1.20 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเมตาบอไลซ์คือ 1,3-Pentadiene ซึ่งเป็นสารระเหยมีกลิ่นคล้ายน้ำมันกำมะถัน ลิพลาस्टิก หรือไฮโดรคาร์บอน เชื้อราชนิดอื่นๆ ที่สามารถสลายซอร์เบทได้ ได้แก่เชื้อราจีนัส *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor* และ *Geotrichum* อย่างไรก็ตามไม่มีความสัมพันธ์ใด ๆ ระหว่างการต้านทานของเชื้อราต่อซอร์เบทกับสมบัติในการสร้างสารพิษของเชื้อรา ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายซอร์เบทด้วยเชื้อรา ได้แก่ ชนิดและสายพันธุ์ของเชื้อรา ปริมาณซอร์เบท ปริมาณเชื้อเริ่มต้น และชนิดของสารตั้งต้น

นอกจากเชื้อราแล้ว แบคทีเรียบางสายพันธุ์สามารถต้านทานต่อซอร์เบทและย่อยสลายซอร์เบทได้เช่นเดียวกัน หากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก (lactic acid - producing bacteria) ในกรณีที่มีจำนวนเชื้อนี้สูงมากในอาหารที่มีซอร์เบทน้อยกว่าความเข้มข้นที่ทำลายเชื้อรา (sub lethal concentration) แบคทีเรียกรดแลคติกจะย่อยสลายซอร์เบทไปเป็นสารประกอบพวก Ethyl-3-5-diene ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติเหมือนต้น Geranium (Geranium - type off - odors) ดังที่ผู้ผลิตไวน์มักจะพบกลิ่นของต้น Geranium เสมอ ๆ จากไวน์ที่ใช้ซอร์เบทและมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์สูง

ความเป็นพิษ

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมมนุษย์และสัตว์สามารถเมตาบอลิซึมซอร์เบทได้ เช่นเดียวกับกรดไขมันชนิดอื่น เช่น กรดคาโปรอิก (Caproic acid) และกรดบิวทีริก (Butyric acid) โดยจะเกิดจากปฏิกิริยาเบต้าออกซิเดชัน (β -Oxidation) หรือหากมีปริมาณซอร์เบทสูง ๆ ก็จะเกิดจากปฏิกิริยาโอเมก้าออกซิเดชัน (ω -Oxidation) ผลจากการออกซิไดส์อย่างสมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำและให้พลังงาน 6.6 กิโลแคลอรีต่อกรัม

ในการพิจารณาให้ซอร์เบทเป็นวัตถุกันเสียที่ใช้ในอาหารได้จะต้องมีการวิจัยอย่างละเอียดถึง ความเป็นพิษของสารนี้ นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาความเป็นพิษของซอร์เบทต่อสัตว์ทดลองหลายชนิด เพื่อตรวจหาความเป็นพิษเฉียบพลัน (carcinogenicity) และการก่อให้เกิดความผิดปกติต่อทารก (teratogenicity) โดยติดตามผลการเปลี่ยนแปลงทั้งในระยะสั้นและระยะยาว การวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าซอร์เบทไม่มีอันตราย (harmlessness) ต่อสัตว์ทดลองและมีความปลอดภัยสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุเจือปนอาหาร (food additives) อื่น ๆ จากการศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันของซอร์เบทต่อหนูพบว่า มีค่า LD_{50} (Mean lethal dose) อยู่ระหว่าง 4.2 – 10.5 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า LD_{50} ของเกลือแกง (Sodium Chloride) ซึ่งมีค่าเป็น 5 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัวสามารถพิจารณาได้ว่าซอร์เบทเป็นวัตถุกันเสียที่มีอันตรายน้อยที่สุดชนิดหนึ่ง จากการศึกษาความเป็นพิษเรื้อรังในสัตว์ทดลอง โดยให้หนูกินอาหารที่มีกรดซอร์บิกผสมอยู่ร้อยละ 10 เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงของหนู ผลปรากฏว่าไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้นกับหนูและหนูบางตัวมีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากหนูได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากการเมตาบอลิซึมกรดซอร์บิกนั่นเอง และมีรายงานว่า การใช้ซอร์เบทในอาหารก็ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือการผิดปกติ (mutagenic) ในสัตว์ทดลอง (Sofos and Busta, 1993)

กฎหมายเกี่ยวกับการใช้กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบทในอาหาร

ปัจจุบันนี้ซอร์เบทได้รับอนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุกันเสียในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดทั่วโลก และกำลังจะได้รับอนุญาตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เป็นเพราะว่าซอร์เบทมีความเป็นพิษต่ำและมีสมบัติที่ดีกว่าวัตถุกันเสียชนิดอื่นนั่นเอง ในประเทศไทยมีประกาศของกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 ณ วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2527 อนุญาตให้ใช้โปแตสเซียมซอร์เบทในอาหารได้ในปริมาณสูงสุดไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักอาหาร 1 กิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2527)

กรดซอร์บิกและโปแตสเซียมซอร์เบตได้รับการพิจารณาในประเทศสหรัฐอเมริกาว่าเป็นสารประกอบที่มีความปลอดภัย (Generally Recognized as Safe, GRAS) ต่อนมนุษย์ และได้รับ คำรับรองจากคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Food and Drug Administration) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ปัจจุบันอนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารทุกชนิดในขนาดตามข้อบังคับของ Code of Federal Regulation เรื่องการใช้วัตถุกันเสียในอาหาร มีข้อกำหนดให้ระบุชื่อสามัญ (เช่น “โปแตสเซียมซอร์เบต” หรือ “กรดซอร์บิก”) และวัตถุประสงค์ที่ใช้ (เช่น “เพื่อรักษาความสด” “เพื่อยืดอายุการเก็บ” หรือ “เพื่อถนอมอาหาร”) ไว้บนฉลากของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการใช้โปแตสเซียมซอร์เบตหรือกรดซอร์บิก ด้วยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization) ได้อนุญาตปริมาณซอร์เบตที่ร่างกายรับได้สูงสุดคือ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัวต่อวัน (mg/kg body weight per day)

การใช้ในอาหาร

กรดซอร์บิกและเกลือของกรดซอร์บิกสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุกันเสียในอาหารอย่างแพร่หลาย รูปที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือกรดซอร์บิกและเกลือโปแตสเซียมซอร์เบต นอกจากจะใช้เพื่อถนอมอาหารสำหรับมนุษย์แล้วยังมีการใช้ในอาหารสัตว์ เครื่องสำอาง ด้านเภสัชกรรม วัสดุหีบห่อและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาหารหรือร่างกายมนุษย์ ปัจจุบันมีการอนุญาตให้ใช้ซอร์เบตในผลิตภัณฑ์อาหารจำนวนมากกว่า 80 ชนิด วัตถุประสงค์หลักของการใช้ซอร์เบตในอาหารก็คือเพื่อยับยั้งเชื้อยีสต์และเชื้อรา โดยเฉพาะการใช้ในผลิตภัณฑ์นม ขนมอบ ผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ ผลิตภัณฑ์อิมัลชันของไขมัน (fat emulsion product) ผลิตภัณฑ์เนื้อ ผลิตภัณฑ์ปลา และขนมหวาน (sugar and confectionery) ดังแสดงในตาราง 5

แม้ว่าซอร์เบตจะมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหารแต่ต้องใช้ซอร์เบตในอาหารที่ผ่านกระบวนการผลิตที่สะอาดถูกสุขลักษณะ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตต้องมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์น้อยที่สุด เพราะหากอาหารนั้นเสื่อมเสียแล้วการใช้ซอร์เบตจะไม่มีประโยชน์เพราะซอร์เบตไม่สามารถปรับปรุงคุณภาพของอาหารที่เสื่อมเสียแล้วให้ดีขึ้นได้

ปริมาณซอร์เบตที่ใช้ในอาหารร้อยละ 0.02-0.3 จะไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของอาหาร แต่หากใช้ปริมาณสูงเกินไปอาจจะทำให้เกิดรสชาติที่แปลกปลอมในอาหาร อย่างไรก็ตามในอาหารบางชนิดแม้ว่าจะใช้ซอร์เบตไม่มาก คือเพียงร้อยละ 0.1 ผู้บริโภคบางคนอาจจะรับรสชาติที่เปลี่ยนแปลงได้

ตาราง 5 การใช้ซอร์เบทในการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหาร

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณที่ใช้ (ร้อยละ)
ผลิตภัณฑ์นม ได้แก่ Aged cheeses, Processed cheeses, Cottage cheeses, Cheese dips ครีมเปรี้ยว (sour cream) โยเกิร์ต	0.05 – 0.30
ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ได้แก่ เค้ก โดนัท เค้กผสม พายน์ Fillings, Mixes น้ำตาล ไอซิ่ง (icings) Fudges, Toppings	0.03 – 0.30
ผลิตภัณฑ์ผัก ได้แก่ ผักดอง (pickles) ผักหมัก (fermented) โอลิว สลัด Relishes	0.02 – 0.20
ผลิตภัณฑ์ผลไม้ ได้แก่ ผลไม้แห้ง แยม เยลลี่ น้ำผลไม้ สลัดผลไม้ น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น Purees	0.02 – 0.25
เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ได้แก่ Still wines, เครื่องดื่มอัดกาซและไม่อัดกาซ เครื่องดื่มจากผลไม้ (fruit drinks) เครื่องดื่มพลังงานต่ำ (Low-caloric drinks)	0.02 – 0.10
ผลิตภัณฑ์อิมัลชัน ได้แก่ มายองเนส (mayonnaise) เนยเทียม น้ำสลัด	0.05 – 0.10
ผลิตภัณฑ์เนื้อและปลา ได้แก่ ปลาเค็มและปลารมควัน ไส้กรอกแห้ง	0.05 – 0.30
ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ ไส้บรรจุไส้กรอก อาหารสัตว์กึ่งแห้ง Confectionery	0.05 – 0.30

วิธีการใช้ซอร์เบทในอาหารมีอยู่หลายแบบทั้งการใส่โดยตรงในอาหาร การฉีดพ่นสารละลายซอร์เบท การจุ่มอาหารในสารละลายซอร์เบท การคลุกพร้อมกับผงแป้ง (dusting with a powder) การเติมลงในวัสดุหีบห่อหรือวัสดุที่ใช้เคลือบผิวอาหาร การเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดอาจพิจารณาจาก กระบวนการผลิตอาหาร ชนิดของอาหาร วัตถุประสงค์ที่ต้องการ เครื่องมือ และความสะดวก (Sofos and Busta, 1993)

การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต

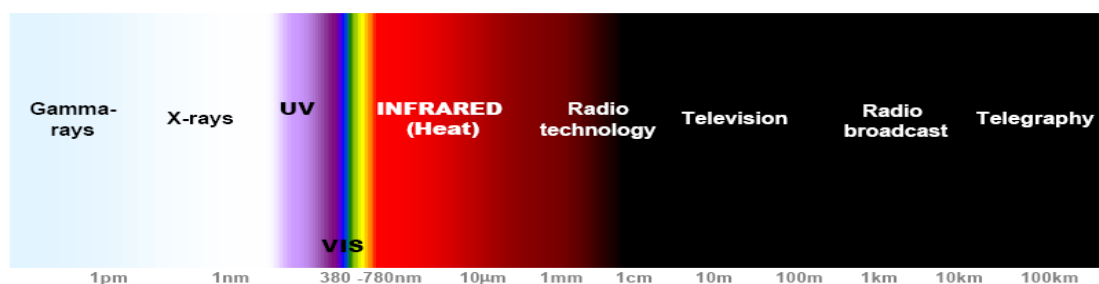
รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Radiation : UV) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สั้น ช่วงต่อจากแสงสีม่วง (ระหว่าง Visible Spectrum กับ X-ray) เป็นรังสีที่ตาคนมองไม่เห็น และไม่สามารถรับรู้ได้ สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. UV-A ช่วงความยาวคลื่น 315-380 นาโนเมตร เป็นรังสี UV ที่มีปริมาณสูงในแสงแดด (ผ่านชั้นบรรยากาศของโลกมากที่สุดถึง 85.7 วัตต์ต่อตารางเมตร) แต่เป็นคลื่นพลังงานต่ำ

จึงไม่ค่อยมีอันตรายมากนัก มีผลเพียงทำให้ผิวหนังมีสีคล้ำ สามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้หลายด้าน โดยเฉพาะทางด้านเคมี, ฟิสิกส์

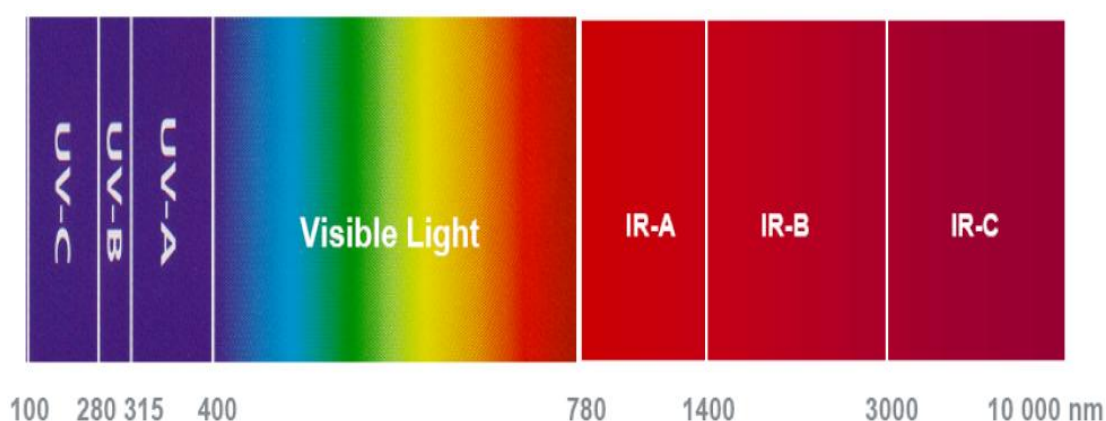
2. UV-B ช่วงความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพมากที่สุดและมีผลต่อร่างกายและสิ่งของได้ ก่อให้เกิดการไหม้ของผิวหนัง (sunburn or erythematic) และการอักเสบของตาได้ แต่มีประโยชน์ในการรักษาโรคผิวหนังบางชนิดได้ รวมถึงการประยุกต์ ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี

4. UV-C ช่วงความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร มีความยาวคลื่นสั้นที่สุด จึงมีพลังงานสูงมาก เป็นรังสีที่มีอันตรายต่อร่างกายได้อย่างรุนแรง เช่น ผิวแดงไหม้เกรียม (erythema) หรือเยื่อบุตาอักเสบ (conjunctivitis) ซึ่งสามารถประยุกต์มาใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อในอาหารได้



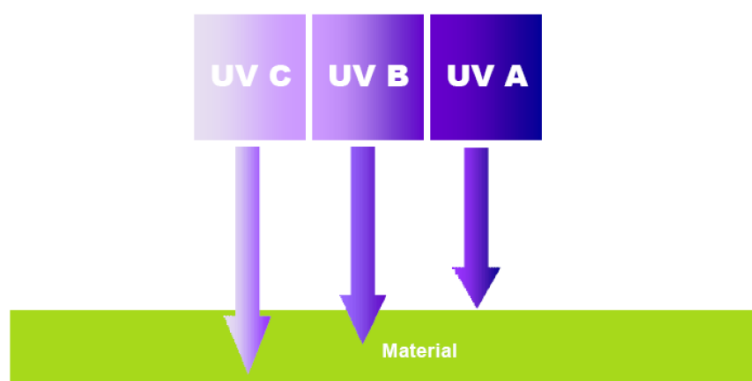
ภาพ 10 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต

ที่มา: Michael and Marie-Luis (2003)



ภาพ 11 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต แบบต่าง ๆ

ที่มา : Michael and Marie-Luis (2003)



ภาพ 12 การทะลุทะลวงผ่านวัสดุของคลื่นรังสีอัลตราไวโอเลต แบบต่าง ๆ

ที่มา : Michael and Marie-Luis (2003)

การใช้คลื่นรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อการคัดแปรสสาร

คลื่นรังสีอัลตราไวโอเลตในช่วงความยาวคลื่นสั้นที่มีขนาดความเข้มข้นมากพอ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสสาร ด้วยการลดขนาดโมเลกุลทั้งอะมิโนส และอะมิโน - เพคติน (oxidative depolarization) และให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารพวก dextrin, monosaccharides และ disaccharides รวมทั้งน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (เนตรนภิส, 2546)

Bertolini et al. (1998) ได้ทำการคัดแปรสสารมันสำปะหลังด้วย 2% lactic acid นาน 10 นาทีทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และให้ได้รับรังสี UV จากหลอดไฟประดิษฐ์ ความยาวคลื่น 360 และ 250 nm นาน 24 ชั่วโมง พบว่าความหนืด (intrinsic viscosity) ของสสารคัดแปรด้วย UV ความยาวคลื่นสั้น 250 nm มีค่าความหนืดลดลงมากกว่าเมื่อใช้คลื่นรังสีความยาวคลื่น 360 nm และความสามารถขยายปริมาตรวิกฤต หรือ ค่าปริมาณจำเพาะ (specific volume, cm^3/g) ที่เตรียมจากสสารคัดแปรด้วยคลื่นรังสี 250 nm จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น $11.5 \text{ cm}^3/\text{g}$ สูงกว่าสสารปกติที่มีค่าประมาณ $8 \text{ cm}^3/\text{g}$ และเมื่อตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC) เชื่อมกับ MALLS detectors พบว่าน้ำหนักโมเลกุลลดลงจาก 3.7×10^7 เป็น $2.2 \times 10^7 \text{ g/mole}$ เนื่องจากความยาวคลื่นสั้น 250 nm สามารถทำให้โครงสร้างโมเลกุลสสารเกิดการเสียหายได้บางส่วน โดยความสัมพันธ์ของโครงสร้างสสารที่มีขนาดโมเลกุลลดลงกับความสามารถขยายปริมาตรได้ระหว่างการอบ มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดกระบวนการสร้างพันธะเชื่อมข้าม หรือการจัดเรียงตัวรวมกันใหม่ (reassociation) ระหว่างโมเลกุลหลังจากการได้รับคลื่นรังสี UV และมีผลให้สสารมันสำปะหลังเกิดสมบัติ plasticity ขึ้น

นอกจากนี้การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสตาร์ชมันสำปะหลังเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวโพด (Bertolini et al., 2000) ได้แสดงผลยืนยันเกี่ยวกับการดัดแปรสตาร์ชด้วยการย่อยด้วย lactic acidเข้มข้น 0.24 โมลาร์ ร่วมกับคลื่นรังสี UV จากหลอดไฟประดิษฐ์ 3 ชนิดที่มีความยาวคลื่นต่างกัน พบว่าทั้งสตาร์ชมันสำปะหลังและข้าวโพดมีความหนืดลดลง และเมื่อได้รับคลื่นความยาว 254 nm จะให้ ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าปริมาตรจำเพาะต่ำกว่าเมื่อได้รับคลื่นความยาว 360 nm ขณะที่ข้าวโพดมีการขยายปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะสตาร์ชมันสำปะหลังที่ย่อยด้วยกรดร่วมกับการได้รับคลื่นความยาว 250-360 nm พบว่ามีความหนืดสูงสุดเพียง 70 RVU ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวโพดที่มีค่า 79 RVU และมีค่าปริมาตรจำเพาะสูงถึง $13.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ อย่างไรก็ตาม Camargo et al. (1988) กลับพบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่หมักแบบธรรมชาติ มีค่าความหนืดสูงสุด peak consistency เปลี่ยนแปลงจากสตาร์ชปกติไม่มากนัก ขณะที่ความหนืด intrinsic viscosity มีค่าต่ำมากเช่นกัน

คลื่นรังสีอัลตราไวโอเลตต่อความทนทานของฟิล์ม

กรรมวิธีการถนอมอาหารแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้กันได้แก่ วิธีการใช้ความร้อน การทำแห้ง การแช่แข็ง การแช่เย็น การเติมสารเคมี การใช้บรรจุภัณฑ์แบบ active หรือ antimicrobial food packaging และการฉายรังสี เทคโนโลยีที่ได้ผลดีเช่นกัน คือ การใช้บรรจุภัณฑ์ ร่วมกับสาร antioxidants หรือการฉายคลื่นรังสี UV

Gennadios et al. (1998) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์โปรตีนถั่วเหลือง (soy protein) ในการผลิตฟิล์มห่ออาหารชนิดรับประทานได้ (edible film) หรือใช้เป็นฟิล์มเคลือบอาหาร โดยใช้คลื่นรังสี UV ความยาวคลื่น 253.7 nm ติดตั้งภายในตู้ที่บุด้วยอลูมิเนียม แผ่นฟิล์มจะได้รับความเข้มคลื่นรังสีขนาด $13\text{-}103.7 \text{ J/m}^2$ เป็นเวลานาน 6-8 ชั่วโมง เมื่อทำการวัดความต้านทานการแตกหัก (tensile strength) และค่าความยืดหยุ่น (elongation) ด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine พบว่า เมื่อฟิล์มได้รับขนาดความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นถึง 103.7 J/m^2 จะได้ค่าความต้านทานการแตกหักเพิ่มจาก 3.7 ± 0.5 เป็น $6.1 \pm 0.5 \text{ MPa}$ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโปรตีนถั่วเหลืองเกิดการเกี่ยวพันมากขึ้นเนื่องจากพลังงานรังสี UV ขณะที่ค่าความยืดหยุ่นลดลง แสดงให้เห็นถึงคลื่นรังสี UV มีผลให้แผ่นฟิล์ม โปรตีนถั่วเหลืองมีความเหนียวมากขึ้น ซึ่งยืนยันการเกิดโครงสร้างพันธะเชื่อมข้าม (cross-linking) และได้ตรวจสอบชนิดโปรตีนด้วยวิธี electrophoresis (SDS-PAGE) พบว่าเมื่อฟิล์มได้รับคลื่นรังสีสูงขึ้น จะเกิดการจับตัวรวมกันของแถบชนิดโปรตีนเพิ่มขึ้น หรือแยกออกไม่ได้

ชัดเจน โดยเชื่อว่าเป็นพันธะแบบ covalent disulfide bonds ที่ทำให้เกิดการยึดเกาะอย่างเหนียวแน่นของโครงสร้างโปรตีนถั่วเหลือง

นอกจากนี้ Khan et al. (2006) ได้ศึกษาการเตรียมและลักษณะความคงตัวของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) จากแป้งสาโก (sago starch) ผสม พอลิไวโนลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต พบว่า รังสีอัลตราไวโอเลตมีผลทำให้ฟิล์มที่ทำจากแป้งสาโก และ PVA ในอัตราส่วน 1:2 มีค่าความต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength: TS) และความสามารถในการยืดตัว (Elongation at break: Eb) ที่สูงที่สุด ส่วนการศึกษาลักษณะของฟิล์มจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราดลำแสง (SEM) ในการตรวจสอบพบว่าฟิล์มมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่แน่น และเรียบ

ปัจจุบันการนำรังสีอัลตราไวโอเลตมาใช้ในการพัฒนาฟิล์มนั้นส่วนใหญ่จะใช้ในด้านการอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น และมีส่วนน้อยที่จะนำรังสีอัลตราไวโอเลตมาพัฒนาฟิล์มชีวภาพ (bio-film)

การเกิดฟิล์ม

ฟิล์มที่รับประทานได้หรือที่ย่อยสลายได้เกิดขึ้นจากการทำให้สารที่สามารถเกิดฟิล์มละลายหรือกระจายตัว แล้วใช้วิธีต่าง ๆ ในการแยกสารนั้นออกจากตัวทำละลาย เช่น การทำให้ตัวทำละลายระเหยไป การเติมอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดพันธะข้าม การปรับความเป็นกรด-เบส ซึ่งเรียกว่า โคแอกเซอเรชัน (coacervation) หรือโดยการทำให้สารที่เกิดฟิล์มซึ่งหลอมเหลวแข็งตัว (solidification) ฟิล์มรับประทานได้มีองค์ประกอบหลัก คือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีสมบัติเกิดฟิล์มได้ ตัวทำละลายและสารเจือปนซึ่งเติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม (Kester and Fennema, 1986)

ในการเตรียมฟิล์มจะมีแรง 2 ชนิดที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงโคฮีชัน (cohesion) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยกันเอง จะเกิดขึ้นระหว่างการเกิดฟิล์มทำให้เกิดการเชื่อมต่อของผิววัตถุเดียวกันสร้างพันธะที่แข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันหรือต้านทานการแยกจากกัน ปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชัน ได้แก่ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสถานะในการเตรียมฟิล์ม โคนแรงโคฮีชันมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความสม่ำเสมอของโครงสร้างสายโซ่ การแผ่กิ่งก้านสาขา และการกระจายของกลุ่มที่มีขั้วบนสายพอลิเมอร์ คือ สายพอลิเมอร์ที่ยาวทำให้เกิดการยึดเกาะกันได้ดี การกระจายของกลุ่มที่มีขั้วอย่างมีระเบียบในสายพอลิเมอร์จะช่วยให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและพันธะไอออนิกระหว่างสายโซ่ทำให้มีความแข็งแรง

การละลายของ พอลิเมอร์ในการเตรียมฟิล์มยังมีผลต่อแรงโคฮีชันคือ ถ้าโมเลกุลของพอลิเมอร์ละลายหรือ ขยายตัวได้มากที่สุดจะได้โครงสร้างซึ่งเชื่อมกันด้วยโคฮีชันที่มาก ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรง ส่วนสภาวะในการเตรียมฟิล์มนั้น ควรเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายอุ่น และทำให้ฟิล์มแห้งโดยใช้ความร้อนที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้อัตราการระเหยตัวทำละลายเร็วเกินไป โมเลกุลของ พอลิเมอร์ถูกตรึงก่อนที่จะเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดรูเข็ม (pinholes) หรือทำให้ฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอซึ่งทำให้การซึมผ่านของฟิล์มเพิ่มขึ้น ระดับของแรงโคฮีชันมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มได้แก่ ความหนาแน่น ความอัดแน่น (compactness) ความโปร่งเป็นรูพรุน (porosity) ความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) ความยืดหยุ่น (flexibility) และความเปราะ เป็นต้น ส่วนแรงอีกชนิดหนึ่ง คือ แรงแอดฮีชัน (adhesion) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มทำให้เกิดโครงสร้างของฟิล์มได้ เช่น แรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอรซึ่งจะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเช่นกัน (Banker, 1966)

Graham (1977) อธิบายการเกิดฟิล์มจากเมทิลเซลลูโลสว่า เมื่อละลายเมทิลเซลลูโลสในสารละลายจะเกิดขึ้นตอนต่าง ๆ คือ เกิดการพองตัวเนื่องจากมีโมเลกุลของสารทำละลายเข้าไปแทรกอยู่ขณะเดียวกันความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ต่อมาพันธะระหว่างสายพอลิเมอร์จะถูกทำลาย ทำให้โซ่เริ่มกระจายตัว ความหนืดลดลงและคงที่เมื่อการกระจายของโมเลกุลเกิดอย่างสมบูรณ์ ระหว่างการระเหยของสารทำละลาย สายโซ่จะเชื่อมต่อกันใหม่ได้แผ่นฟิล์มเมทิลเซลลูโลส ถ้ามีการเติมพลาสติกไซเซอรลงไปสารดังกล่าวจะไปแทรกอยู่ระหว่างสายพอลิเมอร์ ทำให้แผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่นดีขึ้น

วิธีประเมินสมบัติของฟิล์ม

วิธีประเมินสมบัติของฟิล์มที่รับประทานได้ซึ่งมีความไวต่อสภาวะทางกายภาพ นิยมใช้วิธีประเมินสมบัติทางกล (Mechanical properties) และการป้องกันการแพร่ผ่าน (barrier) (Guilbert and Biquet, 1996)

1. สมบัติทางกล โดยทั่วไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties) โดยวัดความเค้น (stress) – ความเครียด (strain) ในวัสดุที่ยืดออก โดยความเครียด (ϵ) หมายถึง หน่วยการเปลี่ยนแปลงในขนาดหรือรูปร่างของวัตถุเนื่องจากแรง เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดหรือรูปร่างเดิม ความเครียดเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย (บัณฑิต, 2545) ดังสมการ (1)

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1)$$

เมื่อ l_0 = ความยาวก่อนทดสอบ

l_1 = ความยาวหลังทดสอบ

แสดงเป็นร้อยละของความยาวแรกได้โดย

$$\varepsilon(\%) = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \quad (2)$$

ความเค้น (σ) หมายถึง ความเข้มของแรงภายในหรือส่วนประกอบที่กระทำบนระนาบผ่านจุด ๆ หนึ่งในวัตถุ ความเค้นสามารถอธิบายในรูปแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

เมื่อ F = แรงที่มากที่สุด

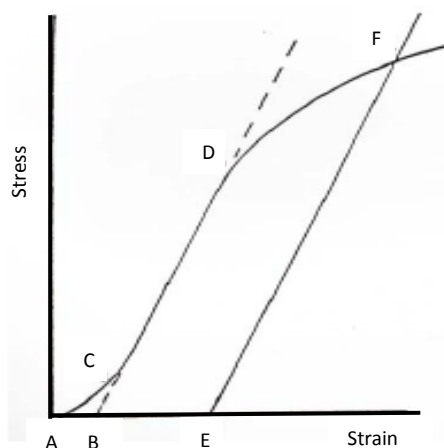
A = พื้นที่หน้าตัด (ความกว้าง x ความหนา) ของฟิล์มทดสอบ

จากกราฟความเค้น-ความเครียด บริเวณ AC ไม่แสดงคุณสมบัติของวัตถุแต่เกิดจากการจัดวางตัวอย่าง ในกรณีที่วัตถุแสดงพฤติกรรมแบบ Hookean (ภาพ 13) เป็นเส้นต่อเนื่อง CD โดยมีจุด B เป็นจุด zero-strain ที่ถูกต้อง ค่า elastic modulus (EM) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุหนึ่ง ๆ ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และเป็นไอโซโทรปิก (isotropic) หาได้จากความเค้นบนเส้น CD หารด้วยความเครียดที่จุดเดียวกัน (American Society of Testing and Materials, 1997) ตามสมการ (4)

$$EM = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

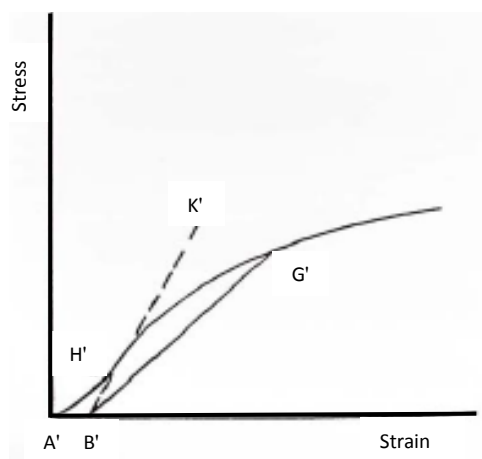
ในกรณีที่วัตถุไม่แสดงพฤติกรรมแบบ Hookean (ภาพ 14) สามารถลากเส้นความชันที่มากที่สุดตัดแกน ความเครียด ได้ B' เป็น จุด zero-strain สำหรับวัตถุที่ไม่เป็นเส้นตรงต้องใช้เส้นสัมผัสผ่านจุดโค้งที่มีการกำหนดจุด offset yield ซึ่งอาจมีการคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ความเค้นที่จุด G' บน curve หาได้จากเส้นตัดโค้งของเส้น B'H'

เครื่องมือที่นำมาวัดคุณสมบัติด้านแรงดึงของแผ่นฟิล์มจะต้องมีการตั้งค่าที่ตรงตามคุณสมบัติของฟิล์ม มีความถูกต้องแม่นยำและมีสภาวะทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (Iveset et al., 1971)



ภาพ 13 วัสดุแสดงพฤติกรรมแบบ Hookean

ที่มา: American Society of Testing and Materials (1997)



ภาพ 14 วัสดุไม่แสดงพฤติกรรมแบบ Hookean

ที่มา: American Society of Testing and Materials (1997)

2. สมบัติการป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซสำหรับฟิล์ม เกี่ยวข้องกับกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ การดูดซับก๊าซบนพื้นผิวฟิล์ม การแพร่กระจายก๊าซผ่านฟิล์ม และการดูดซับของก๊าซบนพื้นผิวฟิล์มอีกด้านหนึ่ง ที่สภาวะคงตัว (Chung et al., 2003) ดังสมการ (5)

$$N_p = \frac{1}{\frac{1}{K_{in}} + \frac{l_p}{D_p K} + \frac{1}{K_{out}}} \Delta C \quad (5)$$

โดย N_p = อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซผ่านฟิล์ม (mass flux)

D_p = สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์ม (permeate diffusivity)

l_p = ความหนาของฟิล์ม

K_{in}, K_{out} = สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของมวลก๊าซภายในและภายนอกฟิล์ม

K = partition coefficient

จากกฎข้อที่ 1 ของฟิค แสดงการแพร่ผ่านก๊าซของฟิล์มที่สภาวะคงตัว (McHugh and Krochta, 1994) ดังสมการ (6)

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (6)$$

โดย J = จำนวนสารที่แพร่ผ่านต่อหน่วยพื้นที่ (mass flux)

dC = ผลต่างความเข้มข้นของฟิล์ม

dx = ผลต่างความหนาของฟิล์ม

จากกฎการละลายของเฮนรี ความเข้มข้น (C) ในฟิล์ม เท่ากับผลคูณของประสิทธิภาพการละลาย (S) และความดันอากาศ (P)

$$C = SP$$

จาก 2, 3 จะได้

$$J = -DS \frac{dP}{dx} \quad (7)$$

โดย dP = ความแตกต่างความดันในอากาศ

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์ม

S = ประสิทธิภาพการละลาย

โดยการแทนที่ dC ด้วย $(S)(dP)$ และเมื่อ dP เป็นความแตกต่างความดันของฟิล์ม และ DS เป็นการแพร่ผ่าน สามารถแสดงได้ดังนี้

$$J = -DS \frac{dP}{dx} \quad (8)$$

การทดลองสามารถตรวจสอบได้จาก

$$\text{permeability} = \frac{\text{permeate weight} \times \text{thickness}}{\text{area} \times \text{time} \times \text{partial pressure difference}} \quad (9)$$

การแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านแผ่นฟิล์ม เป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่แพร่ผ่านซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดออกซิเดชันและการหายใจในผักและผลไม้ ในที่นี้ใช้ volumetric method โดยอาศัยความชันจากกราฟน้ำหนักต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (McHugh and Krochta, 1994) ดังสมการ (10) และ (11)

$$V_r = G/t \times A \quad (10)$$

และ

$$OTP = 10^{-6} \times P_0 \frac{V_r}{ART} \quad (11)$$

หรือสามารถใช้เครื่องวัดการแพร่ผ่านก๊าซออกซิเจน (oxygen permeation analyzer) ได้โดยตรงจะได้ค่า OTR โดย

$$OP = \frac{OTR \times x}{p} \quad (12)$$

เมื่อ

V_r = volume-flow rate

A = พื้นที่หน้าตัดของ capillary

G/t = น้ำหนักต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

OTR = oxygen transmission rate

P_0 = ambient pressure

R = ค่าคงที่ของก๊าซสมบูรณ์

T = อุณหภูมิ

P = ความดัน

x = ความหนาฟิล์ม

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ผ่าน

3.1 อุณหภูมิ ผลที่ได้จากการแพร่ผ่านและการละลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แสดงได้ดังสมการของอาร์เรเนียส ดังนี้

$$D = D_o \exp (-Ed/RT) \quad (13)$$

และ

$$S = S_o \exp (-Es/RT) \quad (14)$$

จากกฎของเฮนรี $Q=DS$ จะได้

$$Q = Q_o \exp (-E_q/RT) \quad (15)$$

โดย D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

S = ประสิทธิภาพการละลาย

Q = การแพร่ผ่าน (permeability)

E_d, E_s, E_q = พลังงานกระตุ้น

R = ค่าคงที่ของก๊าซสัมบูรณ์

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

3.2 ธรรมชาติของวัสดุ เช่น มิติ รูปร่าง ความมีขั้ว และปริมาณโมเลกุลที่ควบแน่นมีผลต่อการแพร่ผ่านทั้งสิ้น

3.3 ธรรมชาติของพอลิเมอร์ เช่น ส่วนประกอบจากพอลิเมอร์ ระดับความเป็นผลึกความยาวโซ่ น้ำหนักโมเลกุล สัดส่วนของพลาสติกไซเซอร์ มีผลต่อการแพร่ผ่านโดยหากมีโครงสร้างคล้ายตะแกรงขนาดเล็กและยากในการปรับเปลี่ยนมิติ จะต้องใช้พลังงานในการแพร่ผ่านสูง

3.4 ความดัน สำหรับก๊าซทั่วไป อัตราการแพร่ผ่านเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างความดัน 2 ด้าน ของวัสดุที่เลือกใช้ (Leiris, 1996)

3.5 ความหนา อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง Q/At และ x (Pascat, 1986) ดังสมการ (16)

$$\frac{Q}{At} = \int \left(\frac{1}{Yx} \right) \quad (16)$$

โดย Y = สัมประสิทธิ์ที่มีค่าระหว่าง 0.8-1.2

Q = การแพร่ผ่าน (permeability)

A = พื้นที่หน้าตัด

t = เวลา

x = ความหนา

นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานสำหรับประเมินคุณสมบัติทางกล การใช้ประโยชน์และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของแผ่นฟิล์มที่เคลือบบนอาหาร หรืออาจตรวจติดตามโดยตรงเพื่อประเมินปริมาณน้ำ (water activity) ของฟิล์ม ในบางกรณีอาจสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเคลื่อนที่ของความชื้นในอาหาร หากรู้ลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ขององค์ประกอบในฟิล์มอย่างเพียงพอ ในกรณีตัวทำละลายที่รู้สัมประสิทธิ์การแพร่ก็อาจทำนายอายุการเก็บรักษาอย่างคร่าว ๆ ได้

แนวทางการใช้ประโยชน์ของฟิล์ม

สำหรับอุตสาหกรรมอาหารแล้วในปัจจุบันได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มที่รับประทานได้มาใช้เป็นภาชนะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยพยายามปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มที่รับประทานได้ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์มพลาสติก เพื่อให้การใช้ฟิล์มที่รับประทานได้มีคุณภาพและมีความหลากหลายในการใช้ประโยชน์มากขึ้น ตัวอย่างการใช้ฟิล์มที่รับประทานได้ ได้แก่

1. ใช้ในการห่อหุ้มอาหารเพื่อแยกอาหารออกเป็นชั้น
2. ใช้เพื่อเป็นแผ่นกั้นระหว่างอาหารที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากการถ่ายเทความชื้นและไขมันในเนื้ออาหารที่แตกต่างกัน
3. ใช้เป็นที่เก็บสารป้องกันจุลินทรีย์และสารกันหืน และยังควบคุมอัตราการซึมของสารกันเสียจากฟิล์มเข้าสู่อาหาร
4. สามารถทำฟิล์มให้เป็นเม็ดแคปซูลเพื่อบรรจุสารให้กลิ่นรสต่าง ๆ และสารทำให้ฟูได้ เพื่อควบคุมการเติมสารใส่ลงในอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. ใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ลูกกวาดชั้นใน เพื่อป้องกันการเหนียวติดกันในระหว่างการเก็บรักษา สะดวก และง่ายในการรับประทาน
6. ใช้ห่อเครื่องปรุงรสต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปโดยสามารถใส่น้ำร้อนแล้วรับประทานได้ทันที
7. สามารถทำเป็นภาชนะบรรจุพวกรา กาแฟ และซุปรสสำเร็จรูป
8. เพิ่มรสชาติโดยการเติมกลิ่นรสต่าง ๆ ลงในฟิล์มและเสริมคุณค่าทางอาหาร โดยเฉพาะฟิล์มที่เตรียมจากโปรตีน
9. สามารถทำเป็นภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปเพื่อให้อยู่ในรูปร่างที่ต้องการ เช่น หมูตั้ง หอยจ้อ เป็นต้น (Kester and Fennema, 1986)