บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากเยื่อและกระดาษ

บรรจุภัณฑ์กระดาษมีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการขนส่งอาหารและที่ไม่ใช่อาหาร โดยมีลักษณะเด่น คือ สามารถที่จะพับได้หรือการทับเส้นบนกระดาษมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษประเภทต่างๆ แต่มีข้อเสีย คือ ไม่ทนต่อความชื้น ก๊าซ และเก็บกลิ่นได้ไม่ดีเนื่องจากมีรูพรุน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการนำกระดาษไปเคลือบพลาสติกชนิดต่างๆ หรือเคลือบกับเปลวอลูมิเนียมโดยใช้พลาสติกเป็นตัวเชื่อม (ปุ่น คงเจริญเกียรติ และ สมพร คงเจริญเกียรติ, 2541) กระดาษที่ใช้ในการบรรจุอาหาร ได้แก่ (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550; Marsh and Bugusu, 2007)

1.1 กระดาษคราฟท์ (kraft paper) หมายถึงกระดาษที่ผลิตจากเยื่อคราฟท์อย่างน้อย 80 % มีสีน้ำตาล เนื่องจากไม่ฟอกสี มีความแข็งแรงสูง นิยมใช้เพื่อการขนส่ง เช่น ถุงหลายชั้นบรรจุอาหารแห้งชนิดต่างๆ กล่องกระดาษแข็ง ถังกระดาษ เป็นต้น

1.2 กระดาษกันไข (greaseproof paper) คือกระดาษที่ผลิตจากเยื่อสกัดทางเคมีผ่านการตีเยื่อเป็นเวลานานกว่าปกติ เพื่อให้เยื่อดูดซึมน้ำจนบวมพองกว่าปกติและผิวมีลักษณะเหนียวหนืด ทำให้เส้นใยสานกันได้แน่นขึ้น มีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยลง เนื้อกระดาษจึงแน่นและมีความหนาแน่นสูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของไขมัน ไอน้ำ และอากาศได้ดีกว่ากระดาษธรรมดา นิยมใช้ห่ออาหารที่มีไขมันสูง เช่น คุกกี้ อาหารทอด เนยแข็ง ไส้กรอก และยังนิยมใช้ห่ออาหารแช่แข็งเพื่อป้องกันอาหารเกาะติดกัน

1.3 กระดาษกลาซีน (glassine paper) ผลิตจากกระดาษกันไขที่ผ่านการรีดผิว เนื้อกระดาษจึงแน่นขึ้นและผิวมันวาว ป้องกันการซึมผ่านของไขมัน ไอน้ำ และอากาศได้ดี มีความโปร่งแสงมากกว่ากระดาษกันไขและสวยงามน่าใช้มากขึ้น

1.4 กระดาษหนังพิมพ์เขียนหรือกระดาษพาร์ชเมนท์ (parchment paper) ผลิตจากเยื่อสกัดทางเคมีและไม่เติมสารกันซึม หลังจากผ่านเครื่องอัดรีดมีการแช่กรดซัลฟิวริกเพื่อให้เซลลูโลสที่ผิวเส้นใยบวมพองและหนืดเหนียว เส้นใยสานกันได้แน่นและมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อย กระดาษที่ได้จึงแข็งแรง เนื้อแน่น ป้องกันการซึมผ่านของไขมัน ไอน้ำ และอากาศได้ดีกว่ากระดาษกันไขและกระดาษกลาซีน แต่ราคาแพงกว่า เนื่องจากในสภาพเปียกความแข็งแรงกว่าสภาพแห้ง จึงใช้ห่อผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำมันหรือความชื้นสูง เช่น โดของคุกกี้หรือพิซซ่า อาหารที่มีราคาแพง เช่น เนยสด คุกกี้ ขนมขบเคี้ยว และนิยมใช้เป็นแผ่นกั้นเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของผลิตภัณฑ์ เช่น แฮม เบคอน และอาหารแช่แข็ง เป็นต้น

1.5 กระดาษเคลือบไข (waxed paper) ส่วนใหญ่ผลิตจากการนำกระดาษกลาซีนหรือกระดาษกันไขมาเคลือบไขเพื่อเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ ไขมัน ไอน้ำ อากาศ และทำให้สามารถปิดผนึกได้ด้วยความร้อน ใช้ห่ออาหารที่มีไขมันสูง เช่น คุกกี้ ขนมปัง ขนมเปี๊ยะ อาหารทอดชนิดต่างๆ แต่ไม่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์แช่แข็งเนื่องจากปัญหาไขหลุดลอกที่อุณหภูมิต่ำ

1.6 กระดาษทิชชู (tissue paper) คือ กระดาษที่มีความนุ่มและบางเป็นพิเศษ นิยมใช้ห่ออาหารประเภท ขนมปังกรอบ ขนมปังก้อน ลูกกวาด ช็อกโกแลตและผลไม้สด เป็นต้น

1.7 กระดาษแข็ง (paperboard) คือ กระดาษที่มีความหนามากกว่า 0.012 นิ้ว มีความแข็งแรงกว่ากระดาษจึงนิยมทำกล่องพับได้ กล่องคงรูป ถาดผลไม้ ถาดหรือกล่องอาหาร โดยกล่องที่บรรจุอาหารเหลวมีการเคลือบไขหรือพลาสติกเพื่อเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของน้ำและไขมันเช่น กล่องนม ถ้วยอาหารเหลวและถาดอาหารแช่แข็ง เป็นต้น

2. บรรจุภัณฑ์พลาสติก

พลาสติก คือ วัสดุประเภทพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถทำให้ไหล (flow) และหล่อขึ้นรูปได้ โดยใช้ความร้อนหรือความดันหรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการขึ้นรูปแก้วและโลหะมาก (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550) พลาสติกที่นิยมนำมาทำบรรจุภัณฑ์อาหาร ได้แก่ โพลิเอทิลีน (polyethylene; PE), โพลิโพรพิลีน (polypropylene; PP), โพลิสไตรีน (polystyrene; PS), โพลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) และโพลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride; PVC) เป็นต้น (ปุ่น คงเจริญเกียรติ และ สมพร คงเจริญเกียรติ, 2541; วิเชียร วรพุทธพร, 2534) ซึ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบ่งได้ 2 ลักษณะตามชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุและแบ่งตามรูปแบบที่ใช้

2.1 บรรจุภัณฑ์พลาสติกแบ่งตามชนิดของพลาสติกได้ 2 ประเภท คือ

2.1.1 Thermoplastics คือ พลาสติกที่เมื่อผ่านการขึ้นรูปแล้วสามารถหลอมและขึ้นรูปได้ใหม่ ถ้าการเรียงตัวของโมเลกุลไม่เป็นระเบียบเรียกว่า amorphous thermoplastics แต่ถ้าโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า crystalline thermoplastics ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าอีกประเภทและมีการนำมาใช้ทำภาชนะพลาสติกบรรจุอาหารมากที่สุด ได้แก่ polyethylene, polyamide, polypropylene และ polystyrene เป็นต้น (วิเชียร วรพุทธพร, 2534)

2.1.2 Thermosets คือ พลาสติกที่เมื่อผ่านการขึ้นรูปแล้วไม่สามารถนำกลับมาหลอมตัวและขึ้นรูปได้อีก มีคุณสมบัติที่ดีด้านความแข็งแรง มีความต้านทานสารละลายได้ดี มีอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโค้งงอสูงแต่มีความเหนียวต่ำ คือ melamine formaldehyde (MF) ซึ่งใช้ทำจานชามต่างๆ polyester (unsaturated) ใช้ทำหลอดสำหรับเครื่องหมุนเหวี่ยงและท่อต่างๆ ใช้เป็นแลกเกอร์เคลือบกระป๋อง (can lacquer) ฝาขวด (closure) วัสดุกันกระแทก (cushioning) และกาว (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550; วิเชียร วรพุทธพร, 2534)

2.2 บรรจุภัณฑ์พลาสติกแบ่งตามรูปแบบได้ 2 ประเภท คือ (กัลยา สัมพันธารักษ์, 2531)

2.2.1. ฟิล์มพลาสติก คือ พลาสติกที่เป่ารีดเป็นแผ่นบาง มักใช้ทำถุงหรือใช้ห่อ ได้แก่ ถุงพลาสติกธรรมดา ถุงพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรม ถุงพลาสติกหลายชั้น และฟิล์มพลาสติก ซึ่งการบรรจุอาหารควรใช้ถุงที่ทำด้วยฟิล์มพลาสติกต่างชนิดประกบกันหรือฟิล์มพลาสติกกับวัสดุอื่น ซึ่งเรียกว่าลามิเนท เพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการ

2.2.2 ภาชนะพลาสติก คือ ภาชนะที่มีการขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆ ได้แก่ ขวดพลาสติก ถ้วยพลาสติก ถาดและกล่องพลาสติกซึ่งนิยมใช้บรรจุอาหารสำเร็จรูป อาหารกึ่งสำเร็จรูปที่ปรุงเสร็จได้ในเวลารวดเร็ว (fast food), อาหารสด และสกินแพค (skin pack) ที่ทำจากพลาสติกขึ้นรูปด้วยความร้อนและนำมาประกบติดกับกระดาษแข็งเพื่อให้แขวนได้ ส่วนใหญ่บรรจุสิ่งของเครื่องใช้

อย่างไรก็ดีพลาสติกมีบทบาทที่สำคัญในอุตสาหกรรมการบรรจุเนื่องจากมีข้อดี คือ มีคุณสมบัติหลากหลายและสามารถปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ง่าย การขึ้นรูปทำได้หลากหลายวิธี สะดวก รวดเร็ว และได้รูปร่างตามต้องการ มีความแข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักเบา มีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ารวดเร็วทำให้มีพลาสติกใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติดีขึ้นตอบสนองความต้องการใช้ได้มากขึ้น สามารถใช้งานร่วมกับวัสดุชนิดอื่นๆ ได้ง่าย ช่วยประหยัดวัตถุดิบ ต้นทุน

การผลิต และสามารถผลิตวัสดุให้มีคุณสมบัติตามความต้องการ โดยมีราคาต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้บรรจุชนิดอื่นๆ (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550)

แต่ผลิตภัณฑ์พลาสติกได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีจำกัด ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ราคาเปลี่ยนแปลงไปตามราคาน้ำมัน และยังอาจเกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในอนาคตเนื่องจากมีการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี เกิดการสะสมของพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกได้ถูกออกแบบให้ใช้งานได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ถึงแม้ว่าจะมีการรณรงค์ด้วยมาตรการต่างๆ ทั้งการลดปริมาณการใช้พลาสติก การนำกลับมาใช้ใหม่และการนำกลับคืนมาเพื่อใช้ประโยชน์ใหม่ (recycle) แต่การรณรงค์ให้มีการเก็บรวบรวมและการคัดแยกขยะพลาสติกยังไม่สามารถปฏิบัติให้ผลเป็นรูปธรรมได้มากนัก นอกจากนี้ต้นทุนในการกำจัดขยะพลาสติกก็มีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้ปริมาณขยะพลาสติกยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (รมณีย์ หวังดีธรรม, 2549; สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551; สำนักบริหารยุทธศาสตร์, 2552)

ดังนั้นการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารนอกจากจะคำนึงถึงการเก็บรักษาคุณภาพของอาหารแล้ว ประเด็นอื่นๆ เช่น ต้นทุนของพลังงานแส่ะวัสดุ สังคมและสิ่งแวดล้อม รวมถึงข้อกำหนดเกี่ยวกับมลพิษและการกำจัดขยะก็ควรนำมาพิจารณาอย่างเหมาะสมด้วย เช่น แก้วแม้จะมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้ดี จึงน่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่สุด ถ้าไม่มีปัญหาเรื่องความปลอดภัยและค่าใช้จ่ายที่สูง จึงเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายและใช้กับอาหารได้เกือบทุกประเภท แต่ข้อเสียคือเกิดการซึมผ่านระหว่างสารในพลาสติกและอาหาร ทำให้มีความพยายามที่ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มาจากวัสดุต่างชนิดกัน เช่น การใช้พลาสติกต่างชนิดกัน หรือ การเคลือบพลาสติกกับฟอยส์หรือกระดาษ เป็นต้น โดยปกติกระดาษสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ แต่ไม่สามารถเก็บรักษาอาหารได้นานเพราะไม่ทนต่อความชื้นและก๊าซ แต่การเคลือบด้วย พลาสติก ไขแลกเกอร์ หรือ เรซิน ช่วยให้กระดาษมีความสามารถในการกีดกันดีขึ้น (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550; ปุ่น คงเจริญเกียรติ และ สมพร คงเจริญเกียรติ, 2541; Marsh and Bugusu, 2007)

ปัจจุบันการตื่นตัวในเรื่องสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มมากขึ้นได้กลายมาเป็นตัวกำหนดลักษณะและกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์ ทำให้เกิดการค้นหาวัตถุดิบใหม่ๆ เพื่อทดแทนพลาสติก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกลุ่มประเทศอุตสาหกรรมระดับแนวหน้าของโลก ได้ค้นคว้า วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกชีวภาพ ซึ่งสามารถนามาใช้ประโยชน์ได้ดีเทียบเท่ากับพลาสติกที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นพลาสติกชีวภาพจึงเป็นทางเลือกใหม่ซึ่งเกิดจากความต้องการของผู้บริโภคบวกกับเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการสร้างเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ๆ สู่การพัฒนาธุรกิจของอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพเพื่อการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน (รมณีย์ หวังดีธรรม, 2549; สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551; สำนักบริหารยุทธศาสตร์, 2552)

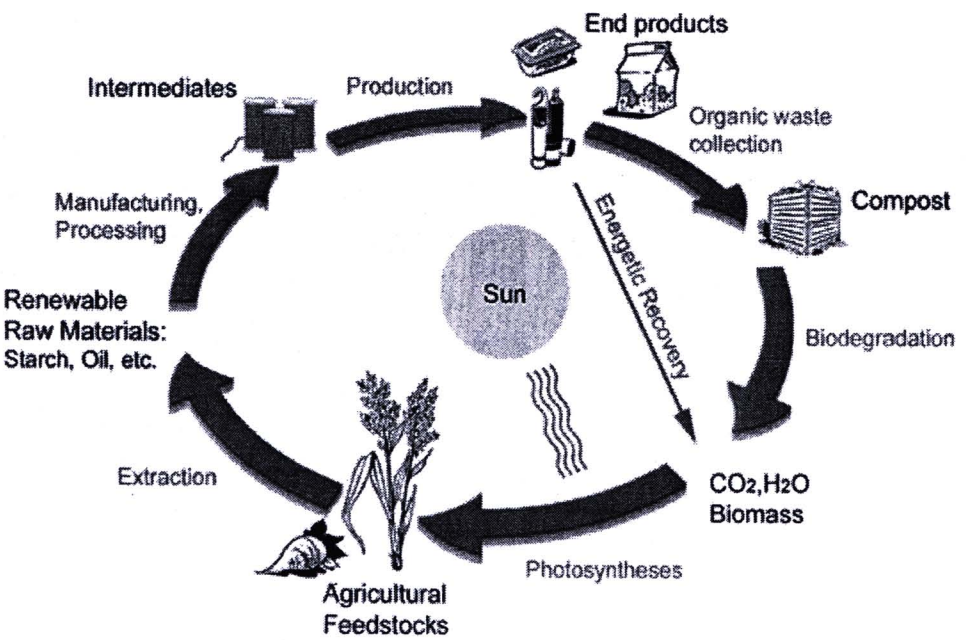
3. พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบชีวมวล (bio - based biodegradable plastics) ได้แก่ ไบโอพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุธรรมชาติ และสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไตรกลีเซอไรด์ และโปรตีนจากถั่ว เป็นต้น (รมณีย์ หวังดีธรรม, 2549; สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551) ผลิตจากโพลิเอสเทอร์ที่สกัดจากเซลของแบคทีเรีย ซึ่งเกิดตามธรรมชาติจากกระบวนการใช้สารน้ำตาลของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ควบคุม เช่น โพลิไฮดรอกซิลอัลคาโนเอท (polyhydroxyalkanoates; PHAs) และวัตถุดิบที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำตาลและแป้งโดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพ เช่น โพลิแลคติกแอซิด (polylactic acid) (Weber, 2000) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันพลาสติกจาก

ชีวมวลที่ผลิตได้จากวัตถุดิบหรือทรัพยากรที่เกิดทดแทนใหม่ได้ (renewable resource) กำลังได้รับการยอมรับและเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีจุดแข็ง คือ ช่วยลดปริมาณขยะและสร้างภาพพจน์ของการเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการผลิตพลาสติกชีวภาพจะเริ่มตั้งแต่การเปลี่ยนวัตถุดิบแป้งให้เป็นน้ำตาลและโมโนเมอร์โดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพ แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์โพลิเมอร์จากโมโนเมอร์หรือโพลิเมอไรเซชั่น (polymerization) จากนั้นเป็นการคอมพาวดิ้ง (compounding) โดยการเติมโพลิเมอร์ชนิดอื่นหรือ การใส่สารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติพลาสติกชีวภาพหรือลดต้นทุน และการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (processing) (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551; สำนักบริหารยุทธศาสตร์, 2552)

3.1 วัฏจักรของพลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพเป็นนวัตกรรมใหม่ของอุตสาหกรรมพลาสติก มีคุณสมบัติการใช้งานเหมือนพลาสติกทั่วๆ ไป แต่มีจุดเด่นตรงที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ หรือถูกหมักเป็นปุ๋ยได้ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งระยะเวลาการย่อยสลายขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล ชนิด และปริมาณไบโอพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิต โดยกระบวนการย่อยสลายคล้ายคลึงกับการย่อยสลายในธรรมชาติ เริ่มจากชีวมวลหลายพันล้านตันถูกผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งชีวมวลจำนวนเท่ากันนี้จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สามารถนำมาหมุนเวียนใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืชเพื่อใช้ในการผลิตชีวมวลใหม่ เช่น พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้ง เมื่อได้รับความชื้น แป้งจะเกิดการพองตัวและเสียรูป จากนั้นก็จะย่อยสลายไปอย่างรวดเร็วและปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อมเป็นวัฏจักรของธรรมชาติ โดยวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพนี้ไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้พลาสติกชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากรที่ปลูกทดแทนได้ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเมื่อหมดอายุการใช้งานและมีค่าใช้จ่ายที่ถูก (รมณีย์ หวังดีธรรม, 2549; สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551; สำนักบริหารยุทธศาสตร์, 2552)



ภาพที่ 1 วัฏจักรของการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพเพื่อใช้งานกับผู้บริโภค (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)

3.2 การนำพลาสติกชีวภาพไปใช้งาน

ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภทเช่นเดียวกับพลาสติกจากปิโตรเคมี ได้แก่ (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551; สำนักบริหารยุทธศาสตร์, 2552)

1. **การใช้งานทางการแพทย์** เช่น ผิวหนังเทียม สารควบคุมการปลดปล่อยยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกาย ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรูและแผ่นดามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกาย ที่สามารถย่อยสลายได้เอง ทำให้ไม่ต้องผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2. **สารเคลือบกระดาษหรือโฟม** มีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเพื่อเคลือบกระดาษสำหรับห่อแฮมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

3. **ฟิล์มคลุมดินและวัสดุสาหรับการเกษตร** ช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน ซึ่งสำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ และแผ่นฟิล์มยังช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เพราะสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดจากการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ยังนำมาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสาร สำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสาหรับการเกษตร หรือวัสดุกักเก็บน้ำสาหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

4. **ถุงสำหรับใส่ของ (shopping bag)** พลาสติกที่ย่อยสลายได้ถูกนำมาใช้เป็นพลาสติกแทนพลาสติกทั่วไป เพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์ม

5. **ฟิล์มและถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (food waste film and bags)** ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใช้ใส่ขยะเศษอาหาร กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะดวกไม่ต้องแยกทิ้ง

6. **บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (consumer packaging materials)** โดยผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน

7. **โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill)** มีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์อื่นๆ ที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ซึ่งง่ายต่อการใช้งานและกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

3.3 บรรจุภัณฑ์อาหารจากพลาสติกชีวภาพ (Food biopackaging)

หลักที่สำคัญในการเลือกใช้วัตถุดิบชีวมวลในการทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร คือ คุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร เนื่องจากต้องสัมผัสกับบรรจุภัณฑ์โดยตรง ดังนั้นปัจจัยในเรื่องการทำปฏิกิริยากับน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง สารอาหาร ออกซิเจน ระยะเวลาในการเก็บและอุณหภูมิ จึงมีผลต่อความคงตัวของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบชีวมวล ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการป้องกันต่างๆ ซึ่งการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารจากวัตถุชีวภาพจึงมีความพยายามที่จะทำให้ทนทานเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ยืดอายุการเก็บรักษาในระหว่างจำหน่ายและขนส่ง แล้วสามารถย่อยสลายได้เมื่อหมดอายุการใช้งาน (Petersen et al., 1999) ซึ่งนอกจากบรรจุภัณฑ์อาหารทั่วๆ ไปแล้ว ยังมีสารเคลือบและฟิล์มบริโภคได้ (edible coating and films), active packaging, modified atmosphere packaging (MAP) และ combination material (Weber, 2000)

4. ฟิล์มบริโภคได้ (edible film)

ฟิล์มบริโภคได้ หมายถึง ชั้นบางๆ ที่ทำมาจากวัตถุดิบที่สามารถรับประทานได้ โดยถูกนำมาเคลือบหรือห่อหุ้มอาหาร (วารินทร์ พิมพา, 2549) ซึ่งจากนิยามของฟิล์มบริโภคได้จะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ สามารถบริโภคได้ หมายถึง สิ่งนั้นต้องบริโภคได้อย่างปลอดภัย และต้องได้การรับรองจาก United States Department of Agriculture (USDA) ว่าเป็น Generally Recognized As Safe (GRAS) ส่วนที่สอง คือ ต้องประกอบด้วยวัสดุที่ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ คือ พอลิเมอร์ และสามารถใช้วิธีจุ่ม ทาหรือพ่นเคลือบวัสดุนั้นไปบนอาหารได้ นอกจากนี้คำว่าฟิล์มบริโภคได้จะอ้างถึงสารละลายเหลวที่ถูกขึ้นรูปให้เป็นฟิล์ม (Weber, 2000) มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถกีดกัน (barrier) ทั้งก๊าซ น้ำมัน และน้ำ โดยควบคุมทั้งการสูญเสีย (loss) และการนำเข้า (uptake) ของน้ำมันและน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสดของอาหารระหว่างเก็บรักษาหรือหลังจากเปิดบรรจุภัณฑ์แล้ว และยังสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ (วารินทร์ พิมพา, 2549; Weber, 2000)

4.1 สารประกอบและชนิดของฟิล์มบริโภคได้แบ่งได้ 3 ประเภท คือ

4.1.1 Hydrocolloids แบ่งได้เป็น

4.1.1.1 คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) ได้แก่ แป้ง (starch) และอนุพันธ์ของแป้ง เซลลูโลส ยางคาราจีแนน อัลจีเนต ไคตินและไคโตซาน รวมถึงแป้งดัดแปรและพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) อื่นๆ (Donhowe and Fennema, 1994;) ข้อดีคือ ต้นทุนต่ำ หาง่ายและไม่มีพิษ (ภูริสา ทัศวิล, 2547) เนื่องจากโดยธรรมชาติมีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) จึงไม่เหมาะที่นำมาใช้ป้องกันการซึมผ่านของความชื้น แต่มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไขมัน รวมทั้งสารให้กลิ่น สามารถใช้เคลือบอาหาร ผักและผลไม้ ลดอัตราการหายใจ มีลักษณะเหมือนวุ้นช่วยชะลอการสูญเสียความชื้นของอาหารในช่วงอายุการเก็บสั้นๆได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) ของไขมัน และองค์ประกอบอื่นๆในอาหารได้อีกด้วย (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; ภูริสา ทัศวิล, 2547)

4.1.1.2 โปรตีน (protein) ได้แก่ เจลาตินและคอลลาเจน เซอีน เคซีน โปรตีนจากพืชและสัตว์ ฟิล์มโปรตีนมีลักษณะเหนียว ให้ความมันวาวกับผลิตภัณฑ์ ทนทานต่อการเสียดสี มีคุณสมบัติกันการซึมผ่านของไอน้ำได้น้อยเนื่องจากมีคุณสมบัติชอบน้ำตามชาติธรรมชาติ แต่มีความแข็งแรง ป้องกันการซึมผ่านของ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไขมันได้ดี นอกจากนี้ยังใช้กับผลิตภัณฑ์ที่บอบบางและเปราะแตกง่าย เพื่อทำให้แข็งแรงขึ้น (ภูริสา ทัศวิล, 2547; Donhowe and Fennema, 1994) ในการผลิตฟิล์มที่ใช้โปรตีนเป็นโครงสร้างหลักนิยมใช้การขึ้นรูปบนวัสดุที่มีผิวเรียบร่วมกับตัวทำละลาย (solvent casting) ที่เป็นน้ำ ส่วนใหญ่ใช้ในรูปโปรตีนสกัดที่แยกโดยอาศัยคุณสมบัติในการละลายได้ของโปรตีนนั้น (วุฒิชัย นาครักษา และ ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ, 2541)

4.1.2 ลิพิด (lipid) เช่น waxes, acetoglyceride, fatty acid, shellac resins และ surfactants เป็นต้น ฟิล์มลิพิดมีผิวหน้ามันและเรียบ ไม่มีความทนทาน แต่มีคุณสมบัติเป็นตัวกั้นน้ำที่ดี เนื้อฟิล์มไม่ยืดหยุ่น ไม่ต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น จึงไม่นิยมขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแต่จะใช้เป็นสารเคลือบเพื่อป้องกันการแพร่ผ่านของไอน้ำ หรือใช้เพิ่มความมันวาวในการผลิตลูกกวาด นอกจากนี้ยังใช้เคลือบผักและผลไม้เพื่อลดอัตราการหายใจและการสูญเสียความชื้น (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; ภูริสา ทัศวิล, 2547; Bourtoom, 2008a; Donhowe and Fennema, 1994)

4.1.3 Composites คือ สารประกอบที่ใช้พอลิเมอร์จากกลุ่ม hydrocolloids และ lipids มารวมกัน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตกับโปรตีน คาร์โบไฮเดรตกับลิพิด โปรตีนกับลิพิด หรือ พอลิเมอร์สังเคราะห์กับพอลิเมอร์จากธรรมชาติในการเตรียมฟิล์ม (Bourtoom, 2008a; Donhowe and Fennema, 1994)

ตารางที่ 1 Comparative properties of bio - derived polymers and comparison with polyethylene and polystyrene

Polymer	Moisture permeability	Oxygen permeability	Mechanical properties
Cellulose/cellophane	High–medium (low if coated)	High	Good
Cellulose acetate	Moderate	High	Moderate (needs plasticiser)
Starch/Polyvinyl alcohol	High	Low	Good
Proteins	High–medium	Low	Moderate
Polyhydroxyalcanoates (Polyhydroxybutyrate/valerate)	Low	Low	Good
Polylactate	Moderate	High–moderate	Good
Low density polyethylene	Low	High	Moderate–good
Polystyrene	High	High	Poor–moderate

(ดัดแปลงจาก Petersen et.al., 1999)

ความสามารถในการเป็นฟิล์มของสารแต่ละชนิดจะให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นฟิล์มที่เตรียมขึ้นอาจใช้สารชนิดเดียวหรือหลายชนิด โดยนำจุดเด่นของสารแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานรวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของฟิล์มด้วย

4.2 การขึ้นรูปฟิล์ม วิธีการขึ้นรูปแบบฟิล์มมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน คือ

4.2.1 การจุ่ม (dipping)

เป็นวิธีเคลือบที่ผิวของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยหลังจากจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในสารละลายฟิล์ม ส่วนที่เกินออกจะไหลไปตามรูปทรงของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำให้แห้ง วิธีนี้ใช้เคลือบ เนื้อ (meats) ปลา (fish) และสัตว์ปีก (poultry) สำหรับ acetylated monoglycerides และใช้กับฟิล์มจาก wax สำหรับเคลือบผักและผลไม้ (ภูริสา ทัศวิล, 2547; Donhowe and Fennema, 1994)

4.2.2 การฉีด - พ่น (spraying)

ใช้กับฟิล์มที่ต้องการเคลือบผลิตภัณฑ์ให้มีความบางและสม่ำเสมอมากกว่าการจุ่ม และใช้เคลือบเฉพาะผิวเพียงด้านใดด้านหนึ่งเพื่อปกปิด นอกจากนี้ยังใช้ในการเคลือบครั้งที่สอง สำหรับสภาวะที่มีประจุบวกใช้สำหรับฟิล์มที่เตรียมจาก cross - link alginate หรือ pectin (ภูริสา ทัศวิล, 2547; Donhowe and Fennema, 1994)

4.2.3 การเท (casting)

เป็นวิธีพื้นฐานที่ง่าย ซึ่งแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความเรียบ แบน โดยกระจายหรือการเทสารละลายฟิล์มให้มีความหนาสม่ำเสมอกัน โดยใช้ตัวกระจาย (spreader) ซึ่งปรับระดับความสูงได้วางบนสารละลายฟิล์มที่อยู่ในภาชนะแม่พิมพ์แล้วทำให้แห้ง หรือเทสารละลายฟิล์มลงในภาชนะแม่พิมพ์ที่มีพื้นที่จำกัดแล้วทำให้แห้ง (ภูริสา ทัศวิล, 2547; Donhowe and Fennema, 1994)

4.2.4 การรีด (drumming)

โดยการนำสารละลายฟิล์มมาเกลี่ยลงบนกระจกผิวเรียบ แล้วรีดให้เรียบเสมอกันด้วยลูกกลิ้ง ความหนาของฟิล์มที่ต้องการขึ้นกับแรงกดอัดของลูกกลิ้งบนแผ่นฟิล์มและระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งสองลูกที่ผ่านฟิล์มเข้าไปจากนั้นจึงทำให้แห้ง (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; วุฒิชัย นาครักษา และ ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ, 2541)

4.2.5 วิธีเอกซ์ทรูชัน (extrusion)

เป็นการผลิตฟิล์มโดยใช้เครื่องมือในการทำให้ฟิล์มขึ้นรูปเป็นแผ่นบาง ลักษณะคล้ายกับการผลิตฟิล์มพลาสติกทั่วไป แต่ต้องทำเป็นสารเทอร์โมพลาสติกเทียมก่อนจึงจะขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้ (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548)

นอกจากสารประกอบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มและวิธีขึ้นรูปฟิล์มแล้ววิธีการ อุณหภูมิ และเวลาในการทำให้แห้งก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเตรียมฟิล์มบริโภคได้ โดยวุฒิชัย นาครักษา และธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ (2540) ได้ศึกษาการผลิตฟิล์มบริโภคได้จากโปรตีนสกัดถั่วเขียวพบว่าปัจจัยในการเตรียมฟิล์มจะมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มในด้านอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate, WVTR) และการต้านทานแรงดึง (tensile strength, TS) โดยปัจจัยในการตรียมคือ อัตราส่วนระหว่างคาร์โบไฮเดรต (แป้งข้าวเหนียว) ต่อโปรตีน คือ 0.05: 1, 0.10: 1 และ 0.15: 1 โดยน้ำหนักแห้ง/น้ำหนักแห้ง และอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง 30: 70, 20: 80 และ 10: 90 ซึ่งฟิล์มที่ได้มีความชื้นระหว่าง 22.55 - 28.05 % มีความหนา 01.10 - 0.16 mm มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ เท่ากับ 4.75 ± 0.87 - 7.53 ± 1.0 g/m^2/day มีการต้านทานแรงดึง เท่ากับ 0.66 - 1.32 กิโลกรัมแรง/cm^2. และสามารถต้านทานการซึมผ่านของไขมันได้มากกว่า 36 ชม. โดยฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวเหนียวต่อโปรตีน 0.05: 1 โดยน้ำหนักแห้ง/น้ำหนักแห้ง และอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง 10: 90 จะให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ 4.75 ± 0.87 g/m^2/day และมีการต้านทานแรงดึง 1.32 ± 0.11 กิโลกรัมแรง/cm^2

การใช้สารละลายที่อุ่นและทำให้ฟิล์มแห้งด้วยความร้อนที่เหมาะสมจะได้ฟิล์มที่มีลักษณะสมบูรณ์ เพราะการใช้อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการระเหยของตัวทำละลายเร็วเกินไป ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกตรึงก่อนที่จะเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์ แผ่นฟิล์มที่ได้จึงมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าไม่เรียบและแตกง่าย (จุฬาลักษณ์ จารุฑารัตน์, อรพิน เกิดชูชื่น, ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์, รัชฎาวรรณ นิ่มนวล และ สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง, 2552ข) ซึ่งการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยอุณหภูมิที่ต่ำ ทำให้การต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น การต้านทานแรงดึงและการยืดตัวลดลง นอกจากนี้ปริมาณความชื้นในแผ่นฟิล์มก็ลดลง (จุฬาลักษณ์ จารุฑารัตน์, อรพิน เกิดชูชื่น, ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์, รัชฎาวรรณ นิ่มนวล และ สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง, 2552ก)

โดยจุฬาลักษณ์และคณะ (2552ก) ได้ศึกษาผลของเทคนิคทำแห้งโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) และใช้ตู้อบลมร้อน ต่อคุณสมบัติฟิล์มแป้งข้าวเจ้าผสมไคโตแซน พบว่า ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมไคโตซาน ที่ใช้เทคนิคการทำแห้งโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิ 60 °C, 75 °C และ 90 °C เป็นเวลา 6, 5, 4 ชั่วโมง และใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C, 75 °C และ 90 °C เป็นเวลา 3, 2, 1 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าแผ่นฟิล์มฟิล์มแป้งข้าวเจ้าผสมไคโตซานที่ทำให้แห้งด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าแรงต้านทานการดึง ปริมาณความชื้น (moisture content) และการละลายน้ำ (water solubility index) สูงสุด คือ 252.57 kPa, 11.67 % และ 11.55 % ตามลำดับ และค่าเหล่านี้ลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 75 °C และ 90 °C ส่วนการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าแรงต้านทานการดึง, ปริมาณความชื้น และการละลายน้ำสูงสุด คือ 183.95 kPa, 10.94 % และ 18.59 % ตามลำดับ สำหรับค่าการยืดตัว การทำแห้งทั้งวิธีใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิและใช้ตู้อบลมร้อน มีค่าสูงที่สุดเมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิ 75 °C คือ 12.38 % และ 16.69 % ตามลำดับ

4.3 คุณสมบัติของฟิล์มและการทดสอบ (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2521)

การนำเอาฟิล์มไม่ว่าชนิดใดมาใช้เป็นภาชนะบรรจุต้องคำนึงถึงโครงสร้างและสมบัติการใช้งาน เพื่อให้สามารถเลือกใช้ฟิล์มที่เหมาะสมในการรักษาผลิตภัณฑ์ไม่ให้เสื่อมคุณภาพ ป้องกันความเสียหาย และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของฟิล์ม ได้แก่

4.3.1 คุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ได้แก่ การต้านทานแรงดึง หมายถึง ความสามารถของฟิล์มที่จะต้านทานแรงดึง ซึ่งกระทำที่ปลายข้างหนึ่งของแผ่นทดสอบที่มีความกว้างคงที่จนแผ่นทดสอบขาด และการยืดตัว (% elongation) มีหน่วยเป็นร้อยละของความยาวเดิมของแผ่นทดสอบ ความทนทานต่อการพับขาด (folding endurance) ซึ่งหมายถึงจำนวนการพับไปพับมา (double folds) ที่ทำให้แผ่นทดสอบขาดจากกันเมื่อใช้แรงดึงที่กำหนด

4.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงลักษณะภายนอกที่มองเห็น เช่น ความหนา (thickness) คือ ระยะตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองของฟิล์ม มีหน่วยเป็นไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร ความโปร่งแสง และความเป็นมันวาว

4.3.3 คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (physical chemistry properties) ได้แก่ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ อัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (oxygen transmission rate, OTR) อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (gas transmission rate, GTR) เป็นต้น

4.4 การใช้ประโยชน์ของฟิล์มบริโภคได้

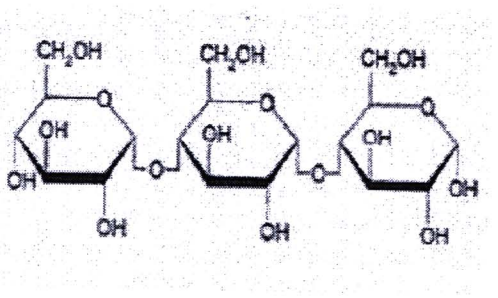
การใช้ฟิล์มบริโภคได้เพื่อเก็บรักษาคุณภาพและยืดอายุของอาหารมีมานานแล้ว โดยใช้ในรูปแบบการเคลือบ (coating) เลียนแบบสารเคลือบผิวธรรมชาติของผักและผลไม้ ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การจุ่ม (dipping) การแปรง (brushing) หรือการพ่นฝอย (spraying) ด้วยสารเคลือบผิว เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียหลังจากเก็บเกี่ยว การใช้ฟิล์มบริโภคได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ การผลิตฟิล์มเป็นแผ่นแล้วจึงนำมาใช้ห่อหุ้มอาหารและใช้เป็นแผ่นกั้นระหว่างชั้นของอาหารที่มีองค์ประกอบต่างกันหรือขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุ นอกจากนี้ฟิล์มบริโภคได้ยังใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมสารในกระบวนการเอนแคปซูเลชัน (encapsulation) (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548)

5. แป้ง (starch)

แป้งเป็นโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช และเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง ส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดธัญพืช และบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง มันสำปะหลัง โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (starch granule) องค์ประกอบภายในของแป้งหลักๆ ประกอบด้วย พอลิเมอร์ของกลูโคส ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ และแหล่งของแป้ง ทำให้แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกันและเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6: 10: 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ องค์ประกอบที่สำคัญของแป้งได้แก่ พอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้นหรืออะมิโลส (amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่งหรืออะมิโลเพกติน (amylopectin) ผสมกัน แป้งที่ได้จากแหล่งที่แตกต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่ต่างกัน มีผลทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

5.1 อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิด แอลฟา - 1, 4 (α - 1, 4) อะมิโลสที่อยู่ในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน สามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล (butanol) กรดไขมัน (fatty acid) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ฟีนอล (phenol) และ ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ซึ่งเป็นสารประกอบ

เชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส นอกจากนี้ตำแหน่งของอะมิโลสในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง บางส่วนจะอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกตินบางส่วนกระจายอยู่ทั้งส่วนอสัณฐาน ส่วนผลึก โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายมีหลายรูปแบบ คือ มีลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เป็นเกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) อะมิโลสไม่ละลายน้ำโดยเมื่อเติมน้ำลงไปจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย และเนื่องจากโมเลกุลของอะมิโลสเป็นสายยาวจึงมีโอกาสที่จะไปจับคู่กับอะมิโลสอีกโมเลกุลหนึ่งเป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ซึ่งอะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เส้นตรงมีคุณลักษณะที่สามารถทำเป็นฟิล์มได้ในตัวเอง (self supporting film) แป้งที่มีอะมิโลสสูงสามารถเกิดแผ่นฟิล์มบางที่ยืดหยุ่นและแข็งแรงได้ มักใช้ทำเป็นวัสดุห่อหุ้มอาหาร (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548)



Amylose

ภาพที่ 2 โครงสร้างของอะมิโลส (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

5.2 อะมิโลเพกติน เป็นโฮโมโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเม็ดสตาร์ช ประมาณ 70 - 100 % มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิดแอลฟา - 1, 4 (α - 1, 4) และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 - 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิดแอลฟา - 1, 6 (α - 1, 6) โดยมีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลในแป้งแต่ละชนิดมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส และมีอัตราการคืนตัวต่ำเนื่องจากอะมิโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งซึ่งประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ

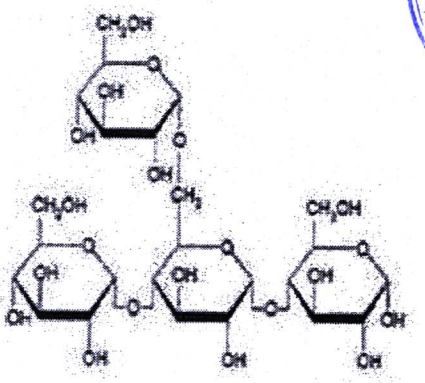
1. สาย A (A - chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวและไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)

2. สาย B (B - chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8 - 0.9: 1

3. สาย C (C - chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิ่ง 1 หมู่ ซึ่งในอะมิโลเพคตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
รับที่ 24 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 247450
เลขเรียกหนังสือ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



Amylopectin

ภาพที่ 3 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

อะมิโลเพกตินมีความสำคัญมากกว่าอะมิโลส ทั้งทางด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ โดยอะมิโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α - 1, 4	α - 1, 4 และ α - 1, 6
ขนาด	200 - 2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีม่วงแดง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

(กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

5.3 คุณสมบัติของแป้ง

คุณสมบัติของที่สำคัญแป้ง ได้แก่ การดูดซับน้ำ การพองตัว การละลาย และความหนืด โดยเมื่อเติมน้ำลงไปในแป้งที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ในบรรยากาศปกติเมื่อเกิดสมดุลแป้งจะมีความชื้น 10 - 17 % ซึ่งน้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมี 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำรูปที่ไม่อิสระ และน้ำในรูปอิสระ โดยน้ำจะจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่อมีการให้ความร้อนกับสารผสมน้ำแป้งจนอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับกับ

หมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดเรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชั่น (gelatinization) ซึ่งทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนซ์แล้วยังให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซึมน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชั่น (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) ซึ่งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่น ทึบแสง เกิดเป็นเจล เมื่อทำให้อุณหภูมิต่ำลงไป อีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้นโมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาภายนอกเจล โดยแป้งที่มีปริมาณของอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มาก และเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการดัดแปรทางเคมี ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง คือ ชนิดของแป้งและการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

6. ฟิล์มบริโภคได้จากแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ มีข้อดี คือ มีความบริสุทธิ์สูง สามารถย่อยสลายได้ หาง่ายจากพืชชนิดต่างๆ โดยมีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสจึงมีราคาถูก สามารถพองตัวขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่แป้งมีข้อจำกัดการใช้งานเนื่องจากเกิดการพองตัวและเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับความชื้น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550; รมณีย์ หวังดีธรรม, 2549) ซึ่งฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมีคุณสมบัติที่ควรคำนึงถึงเช่นเดียวกับฟิล์มบริโภคได้ชนิดอื่น ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง ความโปร่งแสงของฟิล์ม ความเรียบเป็นเงามันของผิวฟิล์ม การตอบสนองต่อความชื้น และการละลายน้ำ เป็นต้น ซึ่งฟิล์มที่เตรียมจากแป้งต่างชนิดกันมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ฟิล์มแป้งที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด มีความยืดหยุ่น และแข็งแรงมากกว่าฟิล์มจากแป้งสาลี ส่วนการละลายน้ำนั้น ฟิล์มแป้งที่ได้จากพืชหัวและส่วนรากพืช ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง ละลายน้ำได้ดีกว่าและมีความโปร่งแสงมากกว่า (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Mali et al., 2006)

อะมิโลสทำให้ฟิล์มแป้งมีลักษณะแข็ง (stiff and strong) อะมิโลเพกตินทำให้ฟิล์มแป้งมีลักษณะอ่อนและยืดหยุ่น (soft and flexible) (Mali et al., 2006) ซึ่งปริมาณอะมิโลสที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มจากแป้งเพิ่มสูงขึ้น(Lloyd and Kirst, 1963) อย่างไรก็ตามฟิล์มจากแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เช่น แป้งจากธัญพืชจะเกิดการคืนตัวได้ง่ายทำให้ฟิล์มขุ่น และเปราะแตกง่าย (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) แป้งข้าวเจ้ามีโครงสร้างที่เป็นร่างแหในเม็ดแป้งจึงแข็งแรงขึ้นทำให้การพองตัวต่ำและมีการละลายต่ำ แผ่นฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีความขุ่น โปร่งแสงและมีด้านหนึ่งเรียบมันวาว ส่วนอีกด้านหนึ่งไม่มันวาว (จุฬาลักษณ์และคณะ, 2552ก) ในขณะที่ฟิล์มจากแป้งที่มีอะมิโลเพกตินสูง เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีลักษณะใส ผิวเรียบเช่นเดียวกับฟิล์มพลาสติก มีการต้านทานแรงดึงขาดดี ทนทานต่อการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้สูงมาก แต่ดูดซับน้ำสูงมากเช่นกัน (จุฬาลักษณ์และคณะ, 2552ข)

สำหรับในการผลิตฟิล์มและสารเคลือบโดยตรงจากแป้งนั้นสามารถทำได้แต่ฟิล์มที่ได้จะมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากการใช้แป้งเพียงอย่างเดียวทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเปราะ ขาดความคงทนในการเก็บรักษาและไม่ทนทานน้ำ (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; รมณีย์ หวังดีธรรม, 2549) จึงมีการแยกส่วน อะมิโลสตาร์ช (amylostarch) เพื่อนำมาผลิตเป็นฟิล์มและสารเคลือบ ลักษณะของฟิล์มแป้งอะมิโลสนี้จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและรส ไม่เป็นพิษ แข็งแรงยืดหยุ่น เป็นมันวาว มีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้สูงและยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ต่ำแต่มีข้อเสียคือในการละลายอะมิโลสเพื่อผลิตเป็นฟิล์มต้องใช้อุณหภูมิสูงภายใต้ความดันบรรยากาศ จึงนิยมใช้อนุพันธ์ของอะมิโลสซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีกว่า (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550; ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548) นอกจากสารก่อฟิล์มหรือพอลิเมอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารเคลือบแล้วยังมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ สารเพิ่มความยืดหยุ่น หรือพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ที่ช่วยทำให้สารเคลือบมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานมากขึ้นอีกด้วย

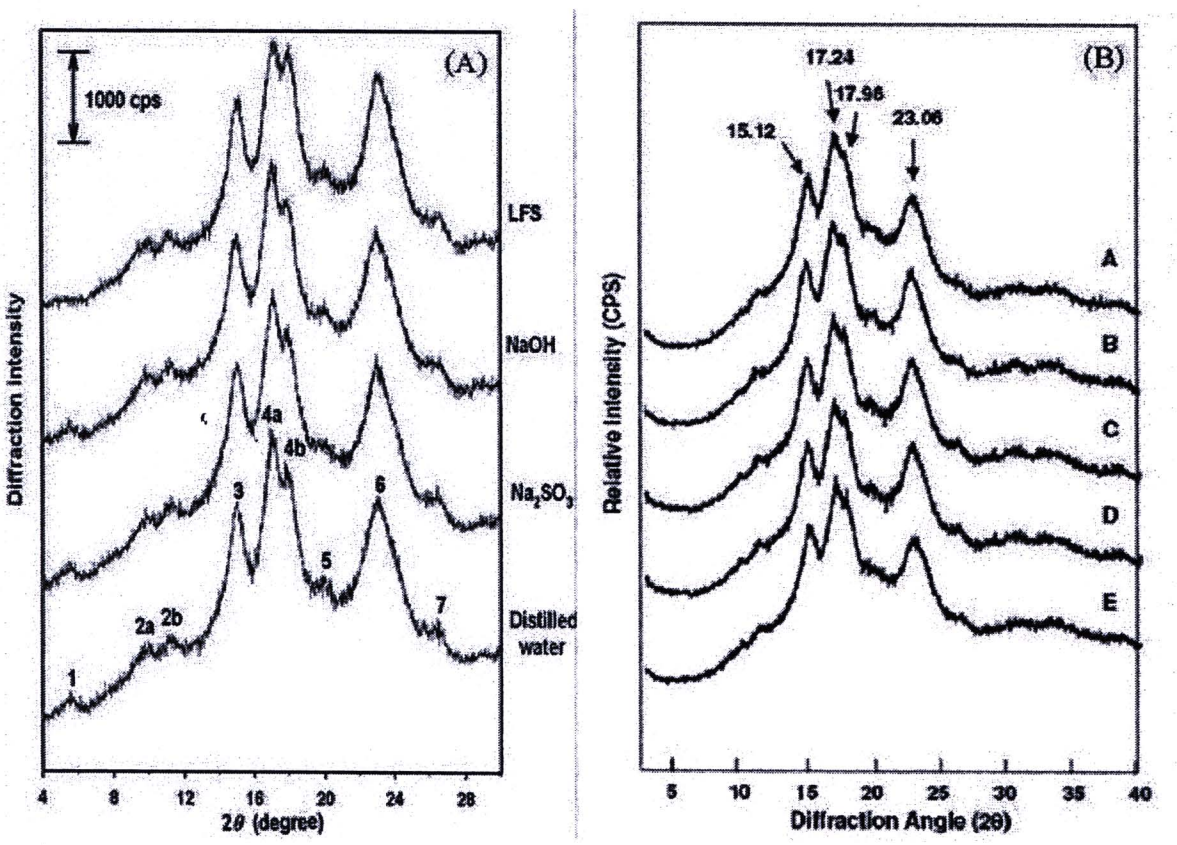
7. แป้งถั่วเขียว (mung bean starch)

ถั่วเขียวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vigna radiata* L. Wilczek เป็นพืชในวงศ์ Fabaceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางตอนเหนือของประเทศอินเดีย จากนั้นแพร่หลายเข้าไปในจีน ไทย และประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้อื่นๆ ในต่างประเทศแป้งถั่วเขียวมีราคาค่อนข้างสูงกว่าแป้งชนิดอื่นเนื่องจากผลิตน้อยและมีขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยาก แต่ในประเทศไทยแล้วถั่วเขียวเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุดและยังเป็นพืชส่งออกที่สำคัญ นอกจากนี้ด้วยเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบันยังทำให้ราคาของแป้งถั่วเขียวไม่สูงกว่าแป้งชนิดอื่นมากนัก ลักษณะของเม็ดแป้งถั่วเขียวมีรูปร่างรีคล้ายไตหรือบางเม็ดค่อนข้างกลม (นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา และ อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา, 2548; อรอนงค์ นัยวิกุล, จิตธนา แจ่มเมฆ, อรพิน ภูมิภมร และ วุฒิชัย นาครักษา, 2531; Liu and Shen, 2006) ซึ่งแป้งถั่วเขียวมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ส่วนใหญ่มีการนำมาใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์อาหารที่สำคัญ คือ การผลิตก๋วยเตี๋ยวและวุ้นเส้น และสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำขนมไทยและขนมต่างชาติได้หลากหลายชนิด ประกอบด้วยโปรตีน 20 - 26 % คาร์โบไฮเดรต 50 - 70 % ซึ่งมีแป้ง (starch) (46 - 54 %) เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมีน้ำมัน เยื่อใย และขี้เถ้า ประมาณ 1 % 3 % และ 4 % ตามลำดับ (นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา และ อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา, 2548) โดยอรอนงค์และคณะ (2531) ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว 20 สายพันธุ์ โดยพบว่าแป้งถั่วเขียวมีความชื้นประมาณ 8 % โปรตีน 21 % เถ้า 4 % ไขมัน 1 % และคาร์โบไฮเดรต 60 %

แป้งถั่วเขียวมีจุดเด่นที่สำคัญคือ มีปริมาณอะมิโลสสูง เมื่อเตรียมเป็นเจลจะให้เจลที่ใส มีความยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงของเจลสูง (strong gel - strength) เมื่ออยู่ในสารละลายร้อนมีความหนืดใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง แต่มีความต้านทานต่อแรงเฉือน (shere resistance) มากกว่าแป้งชนิดอื่นจึงไม่เกิดการคืนตัวได้ง่ายเมื่อเย็นตัวลงเหมือนกับแป้งมันสำปะหลัง (อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา และ นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา, 2550; Liu and Shen, 2006)

แป้งถั่วเขียวมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C (Chang, Lin, and Chen, 2006; Kim, Lee, Baik, Joo and Yoo, 2007; Hoover, Li, Hynes and Senanayake, 1997) ซึ่งโดยทั่วไปเม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ โดยถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากจะมีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ 17 °2θ และ 17.9 °2θ แต่ไม่มีพีคที่ 5.6 °2θ ได้แก่แป้งจากธัญพืช เช่นแป้งข้าว แต่ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ จะมีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้พีคที่ 5.6 °2θ และ 17.2 °2θ แต่ไม่มีพีคที่ 17.9 °2θ ได้แก่แป้งจากพืชหัว เช่น

แป้งมันฝรั่ง เป็นต้น ถ้าจัดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ C จะมีพีคที่ 5.6 °2θ และ 17.9 °2θ ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)



ภาพที่ 4 (A) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งถั่วเขียวจากการศึกษาของ Chang และคณะ (2005) และ (B) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งถั่วเขียวจากการศึกษาของ Kim และคณะ (2007) โดย A - E แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งถั่วเขียว 5 สายพันธุ์ ในประเทศเกาหลี

การศึกษาของ Hoover และคณะ (1997); Chang และคณะ (2005) และ Kim และคณะ (2007) พบว่าแป้งถั่วเขียวมีโครงสร้างผลึกแบบ C โดย Hoover และคณะ (1997) พบว่าแป้งถั่วเขียวมีพีคชัดเจน 5 ตำแหน่งที่ 5.84, 5.19, 5.12, 4.89 และ 3.81 Å นอกจากนี้ Kim และคณะ (2007) ยังพบว่าแป้งถั่วเขียวจาก 5 สายพันธุ์ในประเทศเกาหลี มีพีคที่ตำแหน่ง 15.12 °2θ มีพีคไม่ชัดเจนซ้อนทับกันที่ตำแหน่ง 17.24 °2θ และ 17.96 °2θ และมีพีคที่ตำแหน่ง 23.06 °2θ ดังแสดงในภาพที่ 4

นอกจากนี้ฟิล์มที่เตรียมโดยการนำแป้งถั่วเขียว (แป้งดิบ) มาต้มที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปเตรียมเป็นแผ่นฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง และฟิล์มแป้งถั่วเขียวที่มีส่วนผสมของกลีเซอรอล ทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น (ชิราวุธ ปทุมธนทรัพย์, 2552) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของกลีเซอรอลในการเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น

จากคุณสมบัติของแป้งถั่วเขียวที่สามารถเตรียมเป็นสารละลายเจลที่มีความหนืดสูง จึงมีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ โดยการนำแป้งถั่วเขียวมาทำการดัดแปรเพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติจึงเป็นการประยุกต์เพื่อเพิ่ม

แนวทางในการใช้งาน รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกษตรอีกทางหนึ่ง (นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา และ อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา, 2548)

8. สารเพิ่มความยืดหยุ่น (plasticizers)

สารเพิ่มความยืดหยุ่นเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ ระเหยได้ยาก มีจุดเดือดสูง เมื่อผสมกับพอลิเมอร์จะเปลี่ยนคุณสมบัติของฟิล์ม โดยเข้าไปลดอุณหภูมิแปลงแก้วของอสัณฐานของพอลิเมอร์ (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; ภูริสา ทัศวิล, 2547, อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา และ นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา, 2550) และลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ (Talja et al., 2007) ทำให้ความยืดหยุ่น (flexibility) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีต้องผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ คือมีคุณสมบัติการละลายคล้ายคลึงกันและสามารถคงตัวอยู่ได้ ซึ่งการคงตัวจะเกิดกับสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีค่าความดันไอต่ำและพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการแพร่ในฟิล์มต่ำด้วย (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; ภูริสา ทัศวิล, 2547; อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา และ นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา, 2548)

นอกจากนี้สารเพิ่มความยืดหยุ่นควรไม่มีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ซึ่งการเลือกใช้ที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันการแยกตัวของฟิล์มในระหว่างทำให้แห้ง ทำให้ฟิล์มมีลักษณะทางกายภาพดี สามารถคงความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่นำมาใช้ในฟิล์มบริโภคจะต้องได้รับการอนุญาตจากองค์การอาหารและยาสหรัฐอเมริกา (The U.S. Food and Drug Administration; U.S. FDA) โดยมีการพิสูจน์และยอมรับว่าไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคทั้งในระยะเฉียบพลันและระยะยาว (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548, ภูริสา ทัศวิล, 2547) ซึ่งสารเพิ่มความยืดหยุ่นแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. **สารเพิ่มความยืดหยุ่นภายนอก (external plasticizer)** เป็นสารที่เติมลงไปในโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล โดยการไปจับกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะเวเลนซีทุติยภูมิ (secondary valency) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลงเกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา และ นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา, 2550)

2. **สารเพิ่มความยืดหยุ่นภายใน (internal plasticizer)** ทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548) ทำการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในโครงสร้างพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ (copolymer) โดยแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างลูกโซ่ของพอลิเมอร์และทำปฏิกิริยากับแรงยึดระหว่างลูกโซ่ทำให้เมทริกซ์ของพอลิเมอร์ยืดออกและอ่อนนุ่มยิ่งขึ้น (อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา และ นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา, 2550)

สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมีหลายประเภท ได้แก่ พวกโมโนแซกคาไรด์ ไดแซกคาไรด์ และโอลิโกแซกคาไรด์ เช่น น้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และน้ำผึ้ง เป็นต้น พวกลิพิดและอนุพันธ์ของลิพิด เช่น กรดไขมัน เป็นต้น และพวกพอลิออล (polyol) หรือ พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ ซึ่งมีคุณสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับความชื้นได้ดีและละลายน้ำได้ (ภูริสา ทัศวิล, 2547) ที่นิยมใช้กันมากในการผลิตฟิล์มบริโภคได้ ได้แก่ กลีซอรอลและซอร์บิทอล (ปานทิพย์ บุญส่ง, 2548; ภูริสา ทัศวิล, 2547; วุฒิชัย นาครักษา และ ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ, 2540)

กลีเซอรอล (glycerol) หรือกลีเซอรีน (glycerine) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโมเลกุล $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 ดาลตัน เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน เป็นของเหลวที่มีความหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นตัวทำละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง (Kibbe, 2000) ซึ่งกลีเซอรอลมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มแป้งโดย

อุณหภูมิแปลงแก้วของฟิล์มแป้งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของกลีเซอรอล และที่อุณหภูมิห้องฟิล์มแป้งจะมีลักษณะเปราะถ้ามีการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 °C การยืดตัวจะลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้เข้มข้นมากกว่า 12 wt % การยืดตัวจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กลีเซอรอลยังมีผลต่อการดูดซึมความชื้นในฟิล์มแป้ง เมื่อเติมกลีเซอรอลเพิ่มทำให้มีการดูดซึมความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งความสมดุลของความชื้นระหว่างฟิล์มแป้งกับสภาพแวดล้อมสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นโดยมีค่าเพิ่มขึ้น (Wypych, 2004)

ซอร์บิทอล (sorbitol) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม น้ำหนักโมเลกุล 182.17 ลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาลครึ่งหนึ่ง ละลายน้ำได้ดีและสารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำ (Kibbe, 2000)

ตัวอย่างการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นได้แก่ ปานทิพย์ บุญส่ง (2548) ได้ศึกษาผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งข้าวเจ้า โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเปราะแตกง่าย ไม่นุ่มมือ แต่เมื่อเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นลงไปทำให้ฟิล์มแป้งมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น มีความยืดหยุ่น นุ่มมือ และไม่เปราะแตกง่าย และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีความอ่อนตัวขึ้น ยืดหยุ่นขึ้นและผิวมีลักษณะเรียบมากขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความหนาและความสามารถในการละลายของฟิล์ม โดยสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งซอร์บิทอลและกลีเซอรอลมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้ง 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นเดียวกันพบว่าซอร์บิทอลสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังได้ดีกว่ากลีเซอรอล โดยซอร์บิทอลที่ความเข้มข้น 15 %, 20 %, 25 % และ 30 % มีค่าการซึมผ่านไอน้ำ เท่ากับ 595, 638, 666 และ785 $g/m^2/day$ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ากลีเซอรอลที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ 1204, 1231, 1378 และ 1577 $g/m^2/day$ ตามลำดับ เพราะซอร์บิทอลมีขั้วสูงกว่ากลีเซอรอลทำให้ฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลดูดความชื้นและเก็บไว้ได้ดีกว่า ค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังลดลงและ % elongation เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติมซอร์บิทอลที่ 15 %, 20 %, 25 % และ 30 % ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 3.884, 2.609, 1.425 และ 1.379 $Kgforce/mm^2$ ในขณะที่กลีเซอรอลความเข้มข้น 15 %, 20 %, 25 % และ 30 % มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 2.842, 2.603, 2.376 และ 2.159 $Kgforce/mm^2$ ตามลำดับ ค่า % elongation ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เติมซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 15 %, 20 %, 25 % และ 30 % % elongation เท่ากับ 2.71, 7.22, 29.42 และ 30.07 % ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ 1.1 % และสูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้น 15 %, 20 %, 25 % และ 30 % โดยมีค่า % elongation เท่ากับ 1.33, 1.38, 1.52 และ 1.70 % ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เติมซอร์บิทอลความเข้มข้นสูงทำให้มีความยืดหยุ่นสูงกว่ากลีเซอรอล โดยซอร์บิทอลที่ความเข้มข้น 35 % โดยน้ำหนัก ทำให้ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสำปะหลังมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

ในขณะที่ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ยังไม่ได้เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีลักษณะใส มีความสม่ำเสมอทั้งแผ่น แต่เปราะแตกง่าย เมื่อเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีความใสขึ้น ผิวเรียบขึ้น และมีความอ่อนตัวลง การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้ฟิล์มที่ได้อ่อนตัวลง นุ่มมือขึ้น โดยทั้งซอร์บิทอลและกลีเซอรอล มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยฟิล์มแป้งข้าวเจ้าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้การซึมผ่านไอน้ำเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเติมซอร์บิทอลความเข้มข้น 30 %, 35 %, 40 % และ 45 % ฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีค่าการซึมผ่านไอน้ำ เท่ากับ 1230, 1260, 1335 และ 1425 $g/m^2/day$ ส่วนกลีเซอรอลความเข้มข้น 20 %, 25 %, 30 % และ 35 % มีค่าการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ 1500, 1520, 1545 และ 1600 $g/m^2/day$ ตามลำดับ โดยซอร์บิทอลมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านไอน้ำได้ดีกว่ากลีเซอรอลที่ความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเมื่อเติมซอร์บิทอลความเข้มข้น 30 %, 35 %, 40 % และ 45 % มีค่าการต้านทานแรงดึงเท่ากับ 55.2, 35.5, 33.6 และ 28.0 $Kgforce/mm^2$ ในขณะที่เติมกลีเซอรอลความ

เข้มข้น 20 %, 25 %, 30 % และ 35 % มีค่าเท่ากับ 34.1, 21.6, 18.3 และ 9.9 Kgforce/mm^{2}ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลความเข้มข้น 30 %, 35 %, 40 % และ 45 % มีค่า % elongation เท่ากับ 8.1, 16.1, 22.4 และ 23.7 % และฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้น 20 %, 25 %, 30 % และ 35 % มี % elongation เท่ากับ 2.1, 18.2, 19.6 และ 14.3 % ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ 1.1 % แสดงว่าฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่เติมซอร์บิทอลมีความยืดหยุ่นดีกว่ากลีเซอรอล โดยซอร์บิทอลที่ความเข้มข้น 30 % โดยน้ำหนัก ทำให้แป้งข้าวเจ้ามีคุณสมบัติดีที่สุด

การใช้แป้งธรรมดาไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตฟิล์มเป็นแผ่นบางๆ เนื่องจากไม่มีคุณสมบัติแบบพลาสติก แต่การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น เช่น น้ำ หรือกลีเซอรอล สามารถช่วยทำให้มีคุณสมบัติแบบเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ในการทำให้เป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแม้ว่าเทอร์โมพลาสติกที่ได้จะมีคุณสมบัติป้องกันก๊าซได้ดีแต่การที่แป้งมีลักษณะชอบน้ำทำให้มีข้อจำกัดในการใช้ เช่น การไวต่อความชื้นในสภาพแวดล้อมและมีแนวโน้มที่จะย่อยสลายตามธรรมชาติอย่างรวดเร็ว (Fang, Fowler, Escrig, Gonzalez, Costa and Chamudis, 2005).

9. การดัดแปรแป้ง

แป้งดัดแปรตามนิยามของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 10/3 - 2536 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมี และ/หรือทางฟิสิกส์ด้วยความร้อน เอ็นไซมและ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เนื่องจากแป้งดิบโดยทั่วๆ ไปไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำและเป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณโดยไม่จำเป็น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550; อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา และ นิสิต กิตติพงษ์พัฒนา, 2550) ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการดัดแปรแป้งได้แก่ (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

1. การดัดแปรทางเคมี (chemical modification)

1.1 การเกิดอนุพันธ์กับสารเคมี (derivertization)

1.1.1 การแทนที่สารในหมู่โมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) คือการเข้าแทนที่ด้วยหมู่ฟังค์ชั่น 1 หมู่ภายในโมเลกุลกลูโคส ทำให้โมเลกุลและโครงสร้างของเม็ดแป้งเปลี่ยนไป ทำให้ยับยั้งการคืนตัวของเม็ดแป้งและแป้งมีความหนืดคงตัว ได้แก่

1.1.1.1 อีเทอร์ริฟิเคชั่น (etherification) การเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชั่นระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อีเทอร์ ได้แป้งอีเทอร์แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

(1) ไฮดรอกซีแอลคิลสตาร์ช (hydroxyalkyl starch) หรือแป้งไม่มีประจุ ซึ่งมีความเหนียวสูงกว่าแป้งทั่วไป คงตัวต่อสภาวะแช่แข็งและการละลาย และมีความหนืดคงตัว

ก. ไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช (hydroxypropyl starch) ซึ่งแบ่งออกเป็นการผลิตไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช โดยใช้น้ำและไม่ใช้น้ำ ซึ่งแป้งไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ชที่ผลิตโดยไม่ใช้น้ำสามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น แป้งเปียกมีความเหนียวมากขึ้น คงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารให้ความข้นและครีมเทียม ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอใช้ผลิตฟิล์ม ใช้เคลือบกระดาษและสิ่งทอ

ข. ไฮดรอกซีเอทิลสตาร์ช (hydroxyethyl starch) มีอุณหภูมิเปลี่ยนรูปต่ำแป้งคืนตัวน้อยลง มีความหนืดคงตัว มีคุณสมบัติการยึดเกาะที่ดี ได้ฟิล์มที่ใส เรียบ และยืดหยุ่นได้ดี จึงนำมาใช้เคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความมันเงา และความต้านทานน้ำมัน จึงนำมาใช้กับฟิล์มห่อเนื้อ กล่องใส่แป้ง กล่องใส่เนยเทียม

ค. ไซยาโนเอทิลสตาร์ช (cyanoethyl starch)

(2) คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช (carboxymethyl starch) คือ แป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยา carboxymethylation ระหว่างแป้งกับโซเดียมโมโนคลอโรแอซีเทต หรือกรดโมโนคลอโรแอซีติก ในสภาวะด่าง สามารถละลายน้ำเย็นได้สมบูรณ์ แป้งเปียกมีความใสและเหนียว มีความหนืดสูง และฟิล์มมีความใส ละลายน้ำง่าย ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้สำหรับฟอกเยื่อหรือเป็นสารเคลือบกระดาษ

(3) แคทไอออนิกสตาร์ช (cationic starch) เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุบวก ได้จากสารเคมีที่มีหมู่ amino, imino ammonium sulfonate หรือ phosphonium ใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้เพิ่มความเหนียวให้กระดาษ ทนการขูดหรือถลอก ต้านการซึมของของเหลว เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม

1.1.1.2 เอสเทอร์ริฟิเคชั่น การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชั่นระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่เอสเทอร์ ได้แป้งเอสเทอร์ ได้แก่

(1) แป้งแอซีเทต (starch acetate) ได้จากปฏิกิริยาแอซิทิเลชั่น (acetylation) ระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่แอซิติล เช่น กรดอะซิติก ทำให้แป้งสามารถต้านทานการคืนตัวหลังจากเกิดแป้งเปียกและทำให้เย็นลง ใช้เป็นสารให้ความคงตัวและสารให้ความข้นในอุตสาหกรรมอาหาร และในอุตสาหกรรมกระดาษใช้เคลือบกระดาษเนื่องจากมีคุณสมบัติยึดติดกับเซลลูโลสได้ดี

(2) สตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate monoester) เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุลบ เกิดจากปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชั่น (phosphorylation) ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้เคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

1.1.2 การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เรียกว่า แป้งคลอสลิง (cross - linked starch) ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้เคลือบกระดาษ

1.2 การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (acid thinning) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง โดยกรดจะตัดโมเลกุลของแป้งให้เล็กลง ได้แก่ แป้งย่อยด้วยกรด (acid modified starch) หรือ thin - boiling starch หรืออะมิโนเดกซ์ทริน (amynodextrin) ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้เคลือบกระดาษได้กระดาษที่มีผิวหน้าเรียบ เพื่อกันน้ำหมึกไม่ให้ซึมผ่านกระดาษ และใช้ผลิตกระดาษลูกฟูก

1.3 เดกซ์ทริไนเซชันเป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization) โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับกรด ซึ่งมีการนำไปใช้ในเป็นกาวในอุตสาหกรรมกระดาษและใช้เคลือบกระดาษ

1.4 ออกซิเดชัน (oxidation) โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลลง ได้แก่ แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch) ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษให้ผิวหน้าเรียบและแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของเยื่อกระดาษสำหรับกันหมึกซึม นอกจากนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ

1.5 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์น้ำย่อยหรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin)

2. การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

2.1 พรีเจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนกับแป้งจนผ่านขั้นตอนของกระบวนการเจลาทิไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาทิไนซ์ ในอุตสาหกรรมกาวและกระดาษใช้เป็นกาวติดผนังห้องและใช้เคลือบกระดาษ

2.2 แป้งละลายน้ำเย็น (granular cold - water - soluble starch; GCWSS) เป็นการดัดแปรแป้งด้วยการใช้แอลกอฮอล์และด่าง ทำให้แป้งสามารถละลายในน้ำเย็นได้ 70 - 90 % มีลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่นสูง มันเงาและแข็งแรงกว่าแป้งพรีเจล โดยขึ้นอยู่กับพันธุ์ของพืชที่สกัดแป้ง ความเข้มข้นของเอทานอล ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสภาวะการผลิตมีผลทำให้แป้งที่ได้มีคุณสมบัติแตกต่างกันซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการผลิตแป้งในน้ำเย็นในระดับอุตสาหกรรม

2.3 การลดขนาดเม็ดแป้งทางกล คือการลดขนาดโดยทำให้เม็ดแป้งแตกออก แป้งที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าปกติ

2.4 Annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาทิไนเซชัน

2.5 ดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งสูงกว่าอุณหภูมิเกิดเจลาทิไนเซชันในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

3. การดัดแปรทางเทคโนโลยีทางชีวภาพ (biotechnology bodification)

คือ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ได้แก่แป้งที่มีอะมิโลสสูงและแป้งอะมิโลเพกติน

ปัจจุบันแม้ว่าแป้งละลายในน้ำเย็นที่ดัดแปรจากการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์และด่างยังไม่มีการผลิตในระดับอุตสาหกรรม แต่ได้มีความพยายามที่จะผลิตแป้งที่สามารถพองตัวได้ในน้ำเย็นมาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 1984 Eastman และ Moore ได้นำแป้งมาละลายในแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิและความดันสูง ได้แป้งที่ละลายในน้ำเย็นได้ 50 % ต่อมาในปี 1987 ผลิตแป้งละลายในน้ำเย็นจากแป้งอะมิโลเพกตินได้ ต่อมาในปี 1991 Jane และ Seib ได้ใช้วิธีปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์และด่างให้เม็ดแป้งพองตัว แล้วปรับให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้วล้างและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการดัดแปรแป้งด้วยแอลกอฮอล์และด่างดังต่อไปนี้

Chen และ Jane (1994a) ดัดแปรแป้งที่มีและไม่มีอะมิโลสโดยปรับสภาพด้วยเอทานอล 40 % และ 3.0 โมลาร์ (molar, M) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมให้เข้ากัน ปรับให้เป็นกลางด้วย 3 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอริก แล้วล้างแป้งด้วย 60 - 95 % เอทานอล จากนั้นนำไปอบให้แห้ง พบว่าแป้งที่ดัดแปรแล้วสามารถละลายในน้ำเย็นได้ 70 - 90 % เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง

Kaur, Fazilah และ Karim (2010) ศึกษาการดัดแปรแป้งสาคูโดยใช้เอทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปรับความเป็นกรด - ด่างด้วย 3 M กรดไฮโดรคลอริก แล้วล้างแป้งด้วย 60 % และ 90% เอทานอล พบว่าแป้งสาคูที่ดัดแปรแล้วมีความสารมารถละลายน้ำเย็นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เม็ดแป้งมีขนาดที่โตขึ้น มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นแบบ V และมีช่วงช่วงอุณหภูมิของเจลาทิไนเซชั่นลดลงแต่ไม่พบช่วงอุณหภูมิของเจลาทิไนเซชั่นในแป้งดัดแปรที่มีการละลายน้ำได้มาก

ชิราวุธ ปทุมธนทรัพย์ (2553) ศึกษาแป้งข้าวเหนียวดัดแปรโดยใช้ด่างในแอลกอฮอล์ โดยใช้ 40 % เอทานอล และ 2.1 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปรับความเป็นกรด - ด่าง ด้วย 1.0 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอริก และ 0.5 โมลาร์ กรดซิตริก แล้วล้างแป้งด้วย 95 % เอทานอล นำแป้งที่ดัดแปรแล้วอบให้แห้ง พบว่าข้าวเหนียวที่ดัดแปรแล้วมีรูปร่างที่ไม่มีเหลี่ยมมุม มีขนาดที่โตขึ้น ความเป็นผลึกลดลง สามารถพองตัวและละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้เกิดความหนืด และความเป็นประจุลบลดลง

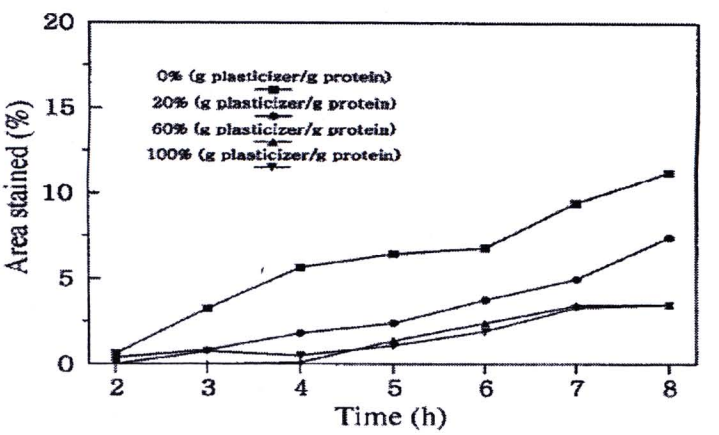
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

10. กระดาษเคลือบฟิล์มบริโภคได้ (edible film coated paper)

บรรจุภัณฑ์กระดาษยังมีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติในการเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ดี แต่ไม่มีความแข็งแรง ก๊าซซึมผ่านได้ดี ไม่ทนต่อความชื้น นอกจากนี้ยังไม่กันการซึมผ่านของน้ำและน้ำมัน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญเมื่อนำมาบรรจุอาหารที่มีความชื้นสูง แต่ปัญหาดังกล่าวได้รับการแก้ไขโดยการนำกระดาษไปเคลือบพลาสติกชนิดต่างๆ แต่ในปัจจุบันวัตถุดิบไบโอพอลิเมอร์กำลังเป็นทางเลือกที่สำคัญในการใช้เป็นสารเคลือบซึ่งเป็นแนวทางไปสู่การใช้วัสดุชีวภาพเต็ม 100 % (Weber, 2000)

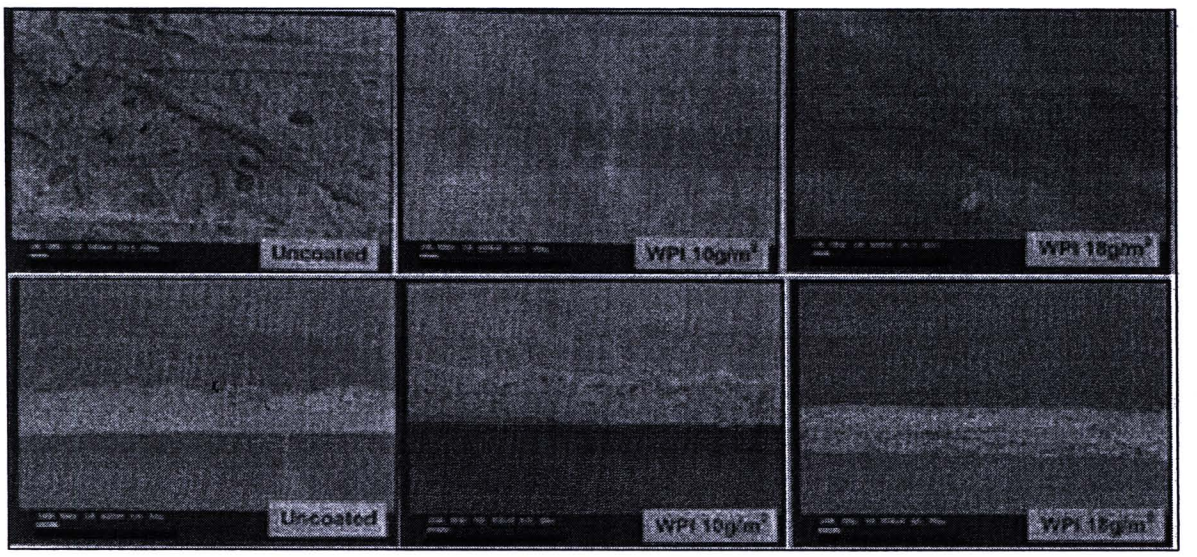
แป้งซึ่งเป็นผลผลิตทางเกษตรกรรมมีความน่าสนใจที่จะนำมาพัฒนาเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ เนื่องจากมีจำนวนมาก สามารถปลูกทดแทนได้ มีความปลอดภัยและราคาถูก แต่การที่แป้งดิบที่ยังไม่ผ่านการดัดแปรมีคุณสมบัติต่างจากพลาสติก จึงมีใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่น เช่น น้ำหรือกลีเซอรอล เพื่อช่วยทำให้แป้งมีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและมีความต้านทานก๊าซได้ดี แต่ข้อจำกัดคือไวต่อความชื้นในสภาพแวดล้อมทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการย่อยสลายได้ง่าย (Fang et al., 2004)

Park และคณะ (2000) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและการต้านน้ำมันของกระดาษเคลือบโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง พบว่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษเคลือบฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองจะซึมเข้าไปในเนื้อกระดาษทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองมากขึ้นจนเลยจุดวิกฤติไปทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง โดยกระดาษเคลือบฟิล์มโปรตีนสกัดถั่วเหลืองที่เคลือบหนากว่ากั้นน้ำมันได้น้อยกว่ากระดาษที่เคลือบฟิล์มบางกว่าอาจเนื่องจากรูปแบบการเคลือบ ที่ทำให้ฟิล์มที่เคลือบไม่ต่อเนื่องทำให้น้ำมันสามารถแผ่ผ่านรูหรือรอยเล็กๆ ได้ นอกจากนี้พื้นที่การแผ่ของน้ำมันบนกระดาษเคลือบโปรตีนถั่วเหลืองที่มีความหนา 2.0 kg/ream ต่ำกว่ากระดาษเคลือบ polyethylene ที่จำหน่ายในท้องตลาดและใช้ห่อแซนวิชในร้านอาหารจานด่วน คือ 1.8 - 2.4 % ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ความร้อนในการเคลือบ polyethylene บนกระดาษ นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและความสามารถต้านน้ำมันของกระดาษที่เคลือบโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง โดยเมื่อสัดส่วนของสารเพิ่มความยืดหยุ่นในสารละลายฟิล์มเพิ่มขึ้น กระดาษเคลือบโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองมีความต้านทานการดึงขาดลดลงและการยืดตัวเพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การแผ่ของน้ำมันบนกระดาษเคลือบโปรตีนสกัดถั่วเหลืองที่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นน้อยกว่ากระดาษเคลือบโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองที่ไม่เติมและเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นโดยสัมพันธ์กับเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 Grease permeation of ISP - coated papers with various plasticizer concentrations (Park et. al., 2000)

Han และ Krochta (2001) ศึกษาการเคลือบกระดาษโดยใช้ whey - protein - isolate (WPI) พบว่าความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้นและผิวของกระดาษเรียบขึ้นเมื่อปริมาณ WPI ที่เคลือบเพิ่มขึ้นในขณะที่ความต้านทานแรงดึงลดลงแต่ความสามารถในการยืดไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ภาพถ่าย SEM ด้านหน้าและด้านข้างของกระดาษเคลือบWPI ที่ใช้ปริมาณการเคลือบแตกต่างกัน (Han and Krochta, 2001)

Kjellgren, Gällstedt, Engström และ Järnström, (2006) ศึกษาผลของการเคลือบกระดาษต่างชนิดกันด้วยไคโตซาน พบว่าปริมาณไคโตซานในการเคลือบที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้านการซึมผ่านของอากาศและน้ำมันได้มากขึ้น ในขณะที่การลดการดูดซับน้ำของกระดาษได้น้อย

Sothornvit (2009) ศึกษาผลของ hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) type K4M ในการเคลือบกระดาษซึ่ง HPMC เป็นสารที่ได้รับความนิยม สามารถละลายได้ในน้ำ มีความหนืดสูงในปริมาณความเข้มข้นต่ำ ให้ฟิล์มที่แข็งแรง จึงน่าจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษได้ ซึ่งพบว่ากระดาษที่เคลือบด้วย HPMC มีแข็งแรงน้อยกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ แต่มีความสามารถในการยืดมากกว่า นอกจากนี้ยังทำให้การซึมผ่านไอน้ำของกระดาษลดลง