บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

ในปัจจุบันพลาสติกนับว่ามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิต จะพบว่าผลิตภัณฑ์เกือบทุกชนิดล้วนผลิตขึ้นหรือถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่เรียกว่าพลาสติกด้วยกันทั้งสิ้น การใช้พลาสติกมีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี ในทำนองเดียวกันของเหลือทิ้งที่มาจากผลิตภัณฑ์พลาสติกก็ย่อมมีปริมาณมากขึ้นตามกัน สมบัติของพลาสติกที่ย่อยสลายช้ากลายเป็นปัญหาไปทั่วโลก เพราะถ้าไม่มีการกำจัดที่ถูกต้องก็จะมีแต่ทับถมกันมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีการเปรียบเทียบระเวลาการย่อยสลายของวัสดุชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (degradable plastic) ในรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นมา

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุชนิดต่าง ๆ (Zeng et al., 2009)

วัสดุ	ระยะเวลาการย่อยสลาย
ผ้าฝ้าย	1-5 เดือน
เศษกระดาษ	2-5 เดือน
เชือก	3-14 เดือน
เปลือกส้ม	6 เดือน
ผ้าขนสัตว์	1 ปี
ถ้วยกระดาษเคลือบ	5 ปี
ไม้	13 ปี
ก้นกรองบุหรี่	15 ปี
รองเท้าหนัง	25-40 ปี
กระป๋องอะลูมิเนียม	80-100 ปี
กระป๋องเหล็ก	100 ปี
ขวดพลาสติก	450 ปี
ถุงพลาสติก	450 ปี

พลาสติกย่อยสลายได้เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ สามารถวัดการย่อยสลายได้โดยวิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติก ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ หลายองค์กรในต่างประเทศได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานวิธีการทดสอบและการรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ISO (International Organization for Standardization), ASTM (American Society for Testing and Materials), DIN (Deutsches Institute for Normung or German Institute for Standardization), JIS (Japanese Industrial Standard), ORCA (Organic Reclamation and Composting Association, Belgium) และ ISR (Institute for Standards Research) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ในระดับนานาชาติในปัจจุบันนั้นมีรายละเอียดใกล้เคียงกัน หากแต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ในเรื่ององค์ประกอบ วิธีการทดสอบ และคุณสมบัติเพื่อผ่านการรับรองการย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามมาตรฐานเหล่านี้ล้วนมีหลักที่คล้ายคลึงกัน อาทิ การวัดความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradability) การวัดความสามารถในการแตกเป็นชิ้นเล็กๆ (disintegration) ของวัสดุทดสอบในสภาวะหมักปุ๋ย (compost) และการประเมินการย่อยสลายเบื้องต้น รวมถึงปริมาณโลหะหนัก ตลอดจนการวิเคราะห์คุณภาพและความเป็นพิษต่อระบบนิเวศของปุ๋ยที่ได้จากการหมัก (Ecotoxicity of the compost) (Zeng et al., 2009)

2.1.1 วัตถุดิบพลาสติก

วัตถุดิบที่ใช้ในทำพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1.1.1 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และปาล์ม ในประเทศสหรัฐอเมริกา พืชผลทางการเกษตรหลัก ที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่น้ำตาลจากหัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโค ได้แก่ หางนม (whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพ และราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส และ ลิกโนเซลลูโลซิก (lignocellulosics) ที่มีอยู่ในพืชซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาล อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีสำหรับการย่อยเซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก

ไปเป็นน้ำตาลในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา

2.1.1.2 แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพธา (naphtha) และถ่านหิน ซึ่งถูกใช้เป็นทั้งแหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิต แหล่งวัตถุดิบดังกล่าวนอกจากจะใช้หมดไปแล้ว กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย

แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้เป็นแหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในการผลิตวัสดุโดยเฉพาะจำพวกพลาสติกเพื่อลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมและทดแทนต่อไปในที่สุด ทั้งนี้นอกจากสามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลน ด้านวัตถุดิบแล้ว ยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย

2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถจำแนกตามกลไกการย่อยสลายได้เป็น 5 ประเภท (ธนาวดี, 2549) ดังต่อไปนี้

2.1.2.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช รวมถึงมันสำปะหลังและข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีภาพแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันคือเมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งผู้บริโภคบางรายที่กลัวว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้จะเกิดการย่อยสลายไปในขณะที่ใช้งานโดยทำให้อายุการใช้งานสั้นและไม่คุ้มค่าในการใช้งานนั้น ไม่ต้องกังวลในจุดนี้อีกต่อไป เพราะตราบใดที่เราไม่ทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ให้เป็นขยะ โดยเฉพาะเมื่อถูกฝังกลบ และเมื่อไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลาย ก็จะไม่เกิดการย่อยสลาย พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มการทำตลาดดี และมีการผลิตเพื่อใช้ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ Polylactic Acid (PLA) และ Polyhydroxyalcanoates (PHAs) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้จากธรรมชาติคือ ใช้กระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพจากแป้งที่ได้จากมันสำปะหลังและข้าวโพดให้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากพลาสติกนี้แล้ว ยังมีพลาสติกย่อยสลายอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นที่

นิยมในตลาดเช่นกัน นั่นคือ Poly (butylenes adipate-co-terephthalate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบปิโตรเคมี ผลิตโดยบริษัท BASF ประเทศเยอรมนี มีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพลาสติกทั้ง 2 ชนิดข้างต้นซึ่งได้มาจากพืชธรรมชาติ

2.1.2.2 พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation plastics) หรือบางครั้ง เรียกว่า พลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ (biodegradable plastics) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของ พอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydro peroxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) ของแสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชันซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายพอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.1.2.3 พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastics) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้ไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่ไม่มีแสง หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง ประเทศฝรั่งเศสใช้พลาสติกประเภทนี้ ขนาดกว้าง 1 เมตร ปูลงบนทุ่งนาเพื่อกักเก็บความร้อนในดินและเร่งผลผลิต อายุใช้งานอยู่ระหว่าง 1-3 ปี ก่อนผุพังปนไปกับดิน แต่พลาสติกชนิดนี้ต้องใช้ในภูมิประเทศที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวตามอัตราที่คาดการณ์ได้

2.1.2.4 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกในโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่าง ๆ (enzyme) เช่น depolymerase, lipase, esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) ด่าง (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.1.2.5 พลาสติกย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) เป็นการย่อยสลายโดยให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการโดยทั่วไปที่ใช้ในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

2.1.3 เทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในช่วงแรกของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้มีการนำแป้งชนิดต่าง ๆ มาใช้เป็นสารผสมร่วมกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการปิโตรเคมี เพื่อเป็นการลดสัดส่วนของสารที่ย่อยสลายได้ยากในวัสดุ และเพิ่มคุณสมบัติการสลายตัวของวัสดุให้มากขึ้น เนื่องจากแป้งเป็นวัสดุเพียงชนิดเดียวที่สามารถขึ้นเป็นภาพร่วมกับวัสดุอื่นได้ โดยการใช้ความร้อน แต่วัสดุที่ได้จะพบปัญหาในเรื่องการซึมผ่านของน้ำ และการบวมหรือการคงตัวของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เมื่อได้รับความร้อน โดยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นภาพด้วยแป้งนิ่มง่าย และไม่คงภาพ จึงทำให้แป้งเพียงอย่างเดียวไม่ได้ผลเท่าที่ควร

แนวคิดใหม่ของการสรรหาวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง การสังเคราะห์โมเลกุลของสารเคมีขึ้นมาใหม่ตลอดกระบวนการซึ่งถือว่ายังไม่มีความชัดเจน วัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาจาก 2 แหล่ง คือ วัสดุที่มาจากแหล่งธรรมชาติ และวัสดุที่ได้จาก

การสังเคราะห์ โดยวัสดุที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น polyhydroxyalcanoates (PHAs) ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ผลิตและสะสมเอาไว้ในเซลล์ ส่วนวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์มักจะเกิดจากผลผลิตของกระบวนการหมัก (fermentation) ได้แก่ สารประกอบโปรตีน หรือสารประกอบแพคตินที่สามารถพัฒนาต่อไปเป็นสารพอลิเมอร์รวมทั้งพอลิแลคติกแอซิดซึ่งได้จากการต่อเชื่อมกัน (polymerization) ของกรดแลคติก

วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มต้นจากพืชผลทางการเกษตรถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ ตามลำดับ จากนั้นพอลิเมอร์ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติและขึ้นภาพเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เมื่อหมดอายุการใช้งานหรือไม่เป็นที่ต้องการแล้ว การนำไปทิ้งในสภาวะที่เหมาะสม จะทำให้พลาสติกเหล่านี้ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (European bioplastics, 2010) ดังแสดงในภาพที่ 1

ภาพที่ 1 วงจรวัฏจักรพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Gruber & O'Brien, 2002)

2.1.4 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) (สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา, 2548)

การผสม (Blending) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก

ที่สุดในอุตสาหกรรม อาจจะเป็นการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ หรือ ผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้สมบัติที่หลากหลายตามความต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน อีกทั้งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต การทำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ได้เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยไม่ต้องเสียเวลาสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมาซึ่งต้องใช้เวลานานและและอาจต้องใช้ต้นทุนสูงในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่เกิดจากการผสมมีคุณสมบัติ เช่น ผสมกันแล้วช่วยให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Strength) มีความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรงต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พอลิเมอร์เบลนด์สามารถปรับปรุงโครงสร้างให้บิดโค้งงอแปรรูป (Processbility) ให้เหมาะสมต่อการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีสมบัติคงตัว (Product uniformity) สามารถเปลี่ยนแปลงสูตรการผสมในการผลิตได้อย่างรวดเร็ว และให้อัตราผลผลิตที่มีปริมาณสูงขึ้น (High productivity) (Johnsena et al., 2005) นอกจากนี้ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมอีกด้วย

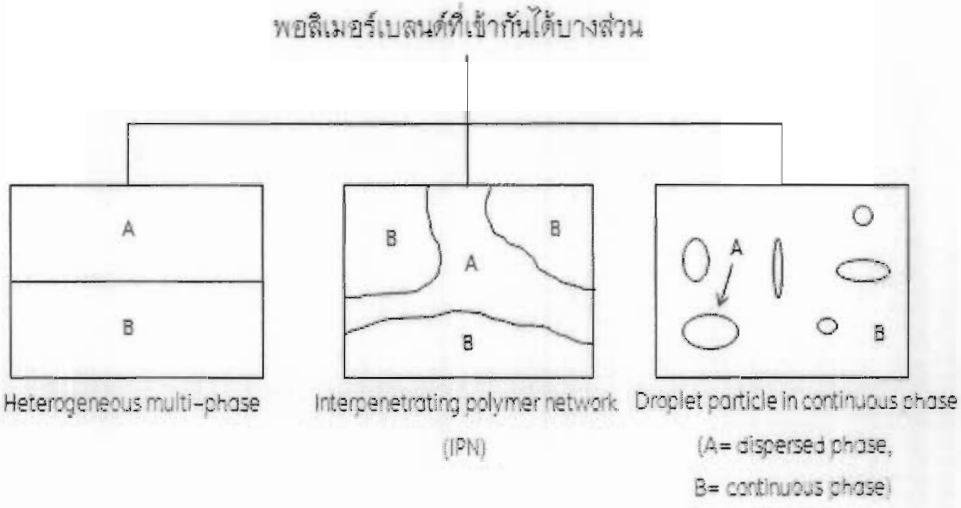
2.1.4.1 ความเข้ากันได้ (Compatibility) (ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์, 2554)

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าในระดับโมเลกุล ไม่แสดงการแยกเฟสเมื่อทำการผสม ซึ่งความเข้ากันได้จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสอง และสภาวะการผสมโดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิและเวลา

พอลิเมอร์บางชนิดผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากันเลย (Incompatible blend) บางชนิดมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน (Partially compatible blend) และบางชนิดสามารถรวมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด (Completely compatible blend)

2.1.4.1.1 ผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากัน พอลิเมอร์ทั้งสองไม่ผสมเข้าด้วยกัน มีขอบเขตการแยกอย่างชัดเจน ไม่มีการผสมกันในระดับโมเลกุลส่งผลให้แรงกระทำระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) ไม่ดี พอลิเมอร์ทั้งสองแยกกันอยู่เป็นผลทำให้ไม่มีการเปลี่ยนสมบัติระหว่างกัน การผสมไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์นั้น ๆ เมื่อมีแรงกระทำในขณะที่ใช้งานจะเกิดการแตกหักได้ง่าย

2.1.4.1.2 ผสมกันแล้วมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน พอลิเมอร์ที่ได้จะมีได้หลายเฟส ซึ่งเป็นระบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous system) และเกิดขอบเขตขึ้น ซึ่งอาจมีหรือไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสก็ได้ โดยสามารถเกิดสัณฐานวิทยาได้หลายแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม (ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์, 2554)

Heterogeneous multi-phase พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่มีการผสมเข้ากัน มีการแยกเฟสอย่างชัดเจน

Interpenetrating polymer network (IPN) พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้บางส่วน ซึ่งเป็นการแยกเฟส A กับ B อยู่ด้วยกัน โดยที่เฟส A จะประกอบด้วยพอลิเมอร์ B แต่มีปริมาณที่น้อยกว่าเรียกเฟส A ว่า A rich phase และเรียกเฟส B ว่า B rich phase เนื่องจากมีพอลิเมอร์ B อยู่มากกว่า A ซึ่งทั้งสองเฟสไม่ได้แยกกันอย่างเด็ดขาดและไม่ได้เป็นเฟสที่มีสารบริสุทธิ์เพียงตัวเดียว

Droplet particle in continuous phase เป็นสัณฐานวิทยาที่เข้ากันได้บางส่วนโดยมี B rich phase เป็น continuous phase และ A rich phase อยู่ในรูปอณุภาคที่กระจายอยู่ใน B rich phase เรียกว่า dispersed phase

สัณฐานวิทยาแบบเข้ากันได้บางสัดส่วนทั้ง 2 แบบนี้มีสัณฐานวิทยาที่ต่างกัน และมีสมบัติไม่เหมือนกัน สามารถนำไปใช้งานที่ต่างกันด้วย

2.1.4.1.3 ผสมกันแล้วรวมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีเฟสเดียวและเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เห็นขอบเขต (Boundary) ของการแยกเฟส ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส ถ้าหากพอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดี สมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองอาจจะหักล้างกันหรืออาจเสริมกันก็ได้

การผสมกันของพอลิเมอร์ที่ดีต้องสามารถรวมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด เพราะจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ แต่ถ้าหากการผสมกันของพอลิเมอร์ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้หมดจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ คือ ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน และเฟสแต่ละเฟสของพอลิเมอร์จะเกิดการยึดเหนี่ยวกันของแต่ละเฟส ทำให้พอลิเมอร์มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลภายในต่ำลง และทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่น ๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งถือว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีคุณภาพและไม่ควรนำไปใช้งาน ดังนั้นถ้าหากจะทำการเตรียมผสมพอลิเมอร์ต้องคำนึงความเข้ากันได้เป็นสำคัญ

2.1.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ (พรชัย ราชตนะพันธุ์, 2542)

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบ่งหลัก ๆ เป็น 2 วิธี

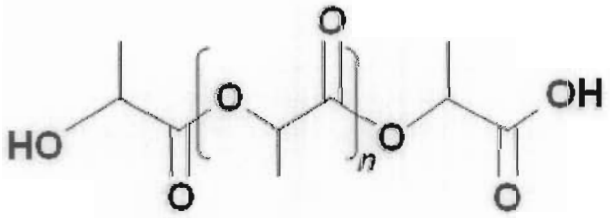
2.1.4.2.1 การเตรียมในสภาวะสารละลาย (Solution blending) โดยสารละลายพอลิเมอร์ต่างชนิดกันในตัวทำละลายที่เหมาะสมชนิดเดียวกัน ทิ้งไว้จนสารละลายระเหยออกจนหมด จะได้พอลิเมอร์เบลนด์เป็นของแข็ง ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการแต่ไม่เป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีการที่มีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก อีกทั้งวิธีการระเหยตัวทำละลายปริมาณมากออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ทำได้ยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ผลของตัวทำละลายที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก จึงต้องมีระบบในการจัดเก็บตัวทำละลายที่ระเหยออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งต้องเพิ่มในส่วนค่าใช้จ่ายในการจัดการ ทำให้วิธีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยวิธีนี้ไม่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากเหตุผลหลักในเรื่องของต้นทุนการผลิตที่สูงดังกล่าว

2.1.4.2.2 การเตรียมโดยการหลอมผสม (Melt blending) โดยการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงกว่า T_g ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ณ อุณหภูมิดังกล่าวพอลิเมอร์จะอยู่ในสถานะที่อ่อนนุ่ม ทำให้สามารถผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันได้ การผสมด้วยวิธีนี้มักทำโดยใช้เครื่องมือ เช่น Barbender melt mixer ซึ่งขนาดเล็กใช้ปริมาณพอลิเมอร์เพียง 30 กรัม Small-scale mixer สำหรับผสมตัวอย่างในหน่วยกรัม Twin screw extruder ที่พัฒนาโดยเพิ่มส่วนของการหมุนผสม และเครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับสารขนาดมากกว่า

500 กรัม เป็นต้น การผสมด้วยวิธีการหลอมผสมสามารถเตรียมตัวอย่างขนาดใหญ่เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลตามมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM ได้ โดยตัวอย่างสามารถขึ้นรูปเป็นแบบแผ่นโดยใช้การอัดรีด (Compression mold) หรือเป็นแบบเส้นโดยใช้การฉีดเส้น (Injection mold) ซึ่งวิธีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบหลอมผสม มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเตรียมในสภาวะสารละลาย คือสามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ในปริมาณมาก ๆ โดยปราศจากตัวทำละลาย ดังนั้นในทางอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้วิธีนี้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์

2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)

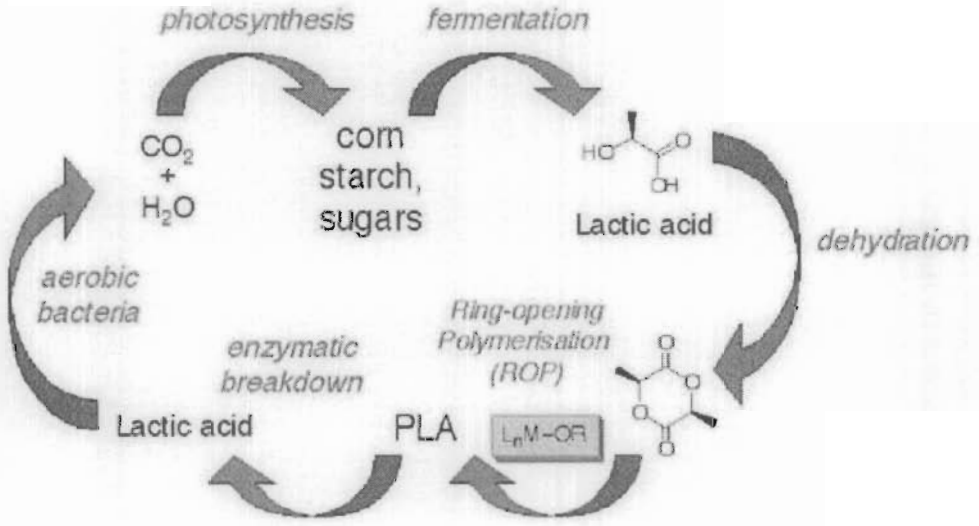
พอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคไทด์ (Polylactide) หรือพอลิแลคเทต (Polylactate) เป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) มีโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในภาพที่ 3 ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Auras et al., 2005)



ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิด (Su, 1988)

พอลิแลคติกแอซิดเป็นผลผลิตมาจากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดนี้สามารถผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี หรือกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลผลิตทางเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง หัวบีท หรือขยะทางชีวภาพ เป็นต้น จุลินทรีย์จะทำการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดแลคติก ซึ่งกรดแลคติกนี้ถือว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบใหม่ที่สามารถสร้างทดแทนการใช้วัตถุดิบจากปิโตรเลียม สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ไม่มีสิ้นสุดและเป็นทรัพยากรหมุนเวียนที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย (Auras et al., 2005) โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือโม่ให้พืชนั้นละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นก็ทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมักด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นแลคติกแอซิด ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายกับการหมักเบียร์ ซึ่ง

หลังจากกรดแลคติกผ่านขั้นตอนการแยกและทำให้บริสุทธิ์แล้ว จะนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ ซึ่งการสังเคราะห์อาจทำได้โดยการพอลิเมอไรเซชั่นด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation polymerization) ของกรดแลคติกได้เป็น พอลิแลคติกแอซิด มวลโมเลกุลต่ำ และทำต่อเนื่องด้วยกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนให้เป็นแลคไทด์ (Lactide) จากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศหรือที่เรียกว่ากระบวนการพอลิเมอไรเซชั่นแบบเปิดวง (Ring opening polymerization) จะได้พอลิเมอร์ของแลคไทด์ที่เป็นสายยาวขึ้น เรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด (รังสิมา ชลคุป และคณะ, 2552) ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งการกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์ให้ได้ตามที่ต้องการจะเป็นสิ่งที่ทำให้คุณสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดเปลี่ยนไปตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดที่ได้ สามารถใช้ทดแทนพลาสติกประเภท PET (Polyethylene terephtalate), PE (Polyethylene) หรือบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากผลิตภัณฑ์พลาสติกปิโตรเลียม (Mitomo, 2005)



ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการเกิดและการย่อยสลายพอลิแลคติกแอซิด (Su, 1988)

2.2.1 คุณสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก พอลิแลคติกแอซิด สามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้

ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทก (impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC (Polyvinyl chloride) ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก มีความแข็ง ความคงทนต่อการกระแทก และความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET (Polyethylene terephtalate) นอกจากนี้ พอลิแลคติกแอซิดยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS (Polystyrene) และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ PE (Polyethylene) หรือ PP (Polypropylene) ดังนั้น พอลิแลคติกแอซิดจึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟินส์ ที่ผลิตจากกระบวนการปิโตรเคมี (Mitomo, 2005)

สมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด สามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงกว้างคืออยู่ในช่วงจากวัสดุที่อ่อนและยืดหยุ่นไปจนถึงเป็นวัสดุที่แข็งซึ่งมวลโมเลกุล และปริมาณผลึก มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกล โดยพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเซมิคริสตัลไลน์มีปริมาณผลึกอยู่ในช่วง 30-38% มีค่ามอดุลัส (modulus) ประมาณ 9.2 x 10^3 MPa และค่าความแข็งแกร่ง (tensile strength) ประมาณ 870 MPa (Kienzle et al., 1982)

2.2.2 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การสลายตัวทางชีวภาพของพอลิแลคติกแอซิดนั้น ขึ้นกับโครงสร้างในสภาวะของแข็ง ได้แก่ ปริมาณผลึก, โครงสร้างทางเคมี เช่น หมู่ฟังก์ชัน และสมดุลระหว่างไฮโดรฟีลิกและไฮโดรโฟบิกของพอลิแลคติกแอซิด โดยปริมาณผลึกเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดอัตราการสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปการสลายตัวเกิดขึ้นโดยการตัดสายโซ่หลักของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ซึ่งทำให้ได้เป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ดังนั้นจำนวนของโอลิโกเมอร์หลังจากเกิดการตัดสายโซ่ขึ้นกับจำนวนเอสเทอร์ที่มีสายโซ่หลักพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไปแต่จะไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส โดยการย่อยสลายพอลิแลคติกแอซิดมี 2 ระยะคือ เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ ซึ่งอัตราการไฮโดรไลซิสของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่างของสภาวะ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ด้วย เช่น น้ำหนักโมเลกุล ระดับความเป็นผลึก ขนาดและรูปร่างของวัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์ เป็นต้น โดยพอลิแลคติกแอซิดจะดูดซับน้ำซึ่งจะเกิดการแตกของพันธะเอสเทอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูก

ตัดสั้นลงจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและปฏิกิริยานี้จะถูกเร่งเองโดยอัตโนมัติ (Autocatalyzed) ด้วยกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งที่ได้มาจากการแตกของพันธะเอสเทอร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้พลาสติกจะแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจะถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ได้ง่าย เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและชีวมวลในขั้นสุดท้าย (Kienzle et al., 1982)

2.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกที่สามารถเพิ่มมูลค่าได้หลายด้าน ได้แก่

- ด้านการแพทย์ เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพในร่างกาย จึงทำให้พอลิแลคติกแอซิดเป็น วัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำไปใช้ทางด้านนี้มานานกว่า 2 ทศวรรษ เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตัวเย็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด
- ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่องโฟม ฟิล์มสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ
- ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ non-woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน
- ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (bumpers) แผ่นรองพื้น (floor mats) และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน
- ด้านอิเลคทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี
- อื่น ๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาษ สารยึดติดท่อพลาสติกชั่วคราว (Auras et al., 2005)

2.2.4 ข้อดีของพอลิแลคติกแอซิด (Se´bastien et al., 2006)

1. ไม่ต้องใช้ปิโตรเลียมเป็นวัตถุดิบ แต่สามารถผลิตได้จากผลิตผลทาง

การเกษตร (ซึ่งใช้เวลาในการผลิตที่ไม่ยาวนานดังนั้นจึงสามารถขจัดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบออกไปได้)

2. สามารถควบคุมราคา และต้นทุนการผลิตได้ง่ายกว่าผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ถึงแม้ว่าในขณะนี้เทคโนโลยีในการผลิตยังคงถูกจำกัดอยู่ในวงแคบ ทำให้ต้นทุนการผลิตยังคงสูงกว่าพลาสติกทั่วไปอยู่เล็กน้อยแต่คาดว่าแนวโน้มของราคาจะลดลงเมื่อมีผู้ผลิตเข้าสู่ตลาดมากขึ้น

3. เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดอัตราการปลดปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อม

4. นอกจากจะสามารถลดอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์และคุณสมบัติในการย่อยสลายได้เองแล้ว ในทางชีวภาพ ผลจากการย่อยสลายโดยทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่ยาวจนได้กลับมาเป็นกรดแลคติกดังเดิม ซึ่งกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดขึ้นได้ทั้งร่างกายของสิ่งมีชีวิต หรือในสภาวะนอกร่างกาย เช่น ในดิน

5. ลดปริมาณขยะ เพราะสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

6. ให้ความร้อนน้อยกว่า (ความร้อนเท่ากับที่ใช้เผากระดาษ)

7. ลดจำนวนสัตว์ที่บาดเจ็บจากการบริโภคพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก

8. เป็นอาหารของพืช

ซึ่งข้อแตกต่างของพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2

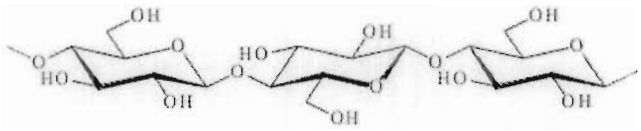
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ (Se´bastien et al., 2006)

	โฟม - พลาสติก	กระดาษ	แป้ง	พอลิแลคติกแอซิด
วัตถุดิบ	ใช้น้ำมันซึ่งเป็นทรัพยากรที่นำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้	ผลิตจากเยื่อของต้นไม้	ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถปลูกทดแทนใหม่ได้	ผลิตจากข้าวโพด
กระบวนการผลิต	ใช้สารเคมีมากในกระบวนการผลิตและใช้ปริมาณน้ำเป็นจำนวนมากในกรรมวิธีทำให้เย็นตัว	ใช้ปริมาณน้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมาก	ไอน้ำ	นำแป้งมาหมักโดยใช้จุลินทรีย์เพื่อย่อยโมเลกุลของแป้งให้เป็นน้ำตาล และกรดแลคติกตามลำดับ
คุณสมบัติต่ออุณหภูมิ	จะปล่อยสารสไตรีน ออกมาเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 85 องศาเซลเซียสซึ่งไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุของร้อน , ใส่ในไมโครเวฟและเตาอบไม่ได้	ไม่กันน้ำและไม่สามารถทนต่อน้ำมันร้อนได้, สามารถใส่ในเตาไมโครเวฟ และเตาอบได้แต่ค่าใช้จ่ายสูง	สามารถทนต่ออุณหภูมิความร้อนได้มากกว่า 95 องศาเซลเซียสใส่ในเตาไมโครเวฟและเตาอบได้	สามารถทนต่ออุณหภูมิความร้อนได้มากกว่า 110 องศาเซลเซียส ใส่ในเตาไมโครเวฟและเตาอบได้
การย่อยสลายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	100 ปีไม่สามารถย่อยสลายก่อให้เกิดปัญหาการจัดการเรื่องขยะ	ย่อยสลายได้ช้ามากและกระบวนการย่อยสลายก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ	ย่อยสลายอย่างสิ้นเชิงได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งสามารถนำมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์และนำไปทำปุ๋ยได้	ย่อยสลายอย่างสิ้นเชิงได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งสามารถนำมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์และนำไปทำปุ๋ยได้
สถานะทางการตลาด	หลายเมืองใหญ่ห้ามใช้	ไม่ได้รับการยอมรับเนื่องจากข้อจำกัดของการตัดไม้	เป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างสำหรับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม	เป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างสำหรับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

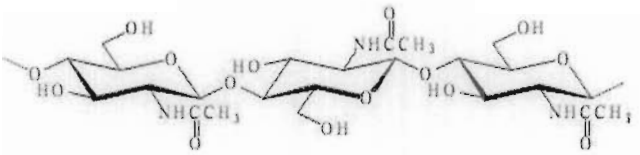
2.3 ไคโตซาน (Chitosan, CS)

ไคติน มีชื่อทางเคมีว่า poly [β-(1→4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranose] หรือ poly N-acetyl-glucosamine โดยแต่ละหน่วยจะเชื่อมกันด้วยพันธะ β-(1→4) และมีสูตรทั่วไปคือ $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ชีวภาพจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลส แต่จะต่างกันที่ตำแหน่ง C-2 โดยเซลลูโลสจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนไคตินจะประกอบด้วยหมู่อะซิทามิโด (acetamido group) สูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ โดยทั่วไปมักพบไคตินในผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น เห็ด รา รวมทั้งเปลือกของแมลง และสัตว์จำพวกโครงร่างภายนอกแข็ง (exoskeleton) กลุ่ม Crustacea อาทิ กุ้ง ปูและแกนหมึก (Merck Index, 1996)

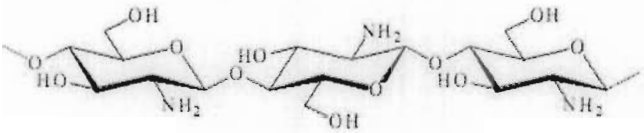
ไคโตซานหรืออนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิติล ไคตินที่มีการกำจัดหมู่อะซิติลตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป จะถูกเรียกว่า ไคโตซาน ซึ่งโดยทั่วไปไคโตซานจะมีปริมาณการกำจัดหมู่อะซิติลอยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 90 และส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10 ถึง 30 ยังคงเป็นหมู่ N-acetyl และถ้าปริมาณการกำจัดหมู่อะซิติลมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไปจะเรียกว่า full deacetylation (Hon, 1996) การกำจัดหมู่อะซิติลนี้เรียกว่าปฏิกิริยา deacetylation โดยแช่ไคตินในสารละลายด่างเข้มข้น โดยหมู่อะซิติล ($-COCH_3$) บนคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 จะถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนกลายเป็นหมู่เอมีน ($-NH_2$) ซึ่งไคโตซานที่ได้นี้ มีชื่อทางเคมีว่า poly [β-(1→4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose] มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{11}NO_4)_n$ และมีสูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานแสดงไว้ในภาพที่ 5(ค) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เกือบทั้งหมด และน้ำที่มีค่า pH เป็นกลางหรือด่าง แต่สามารถละลายได้ดีในกรดอ่อน (Hayes et al., 1977)



(ก) โครงสร้างของเซลลูโลส



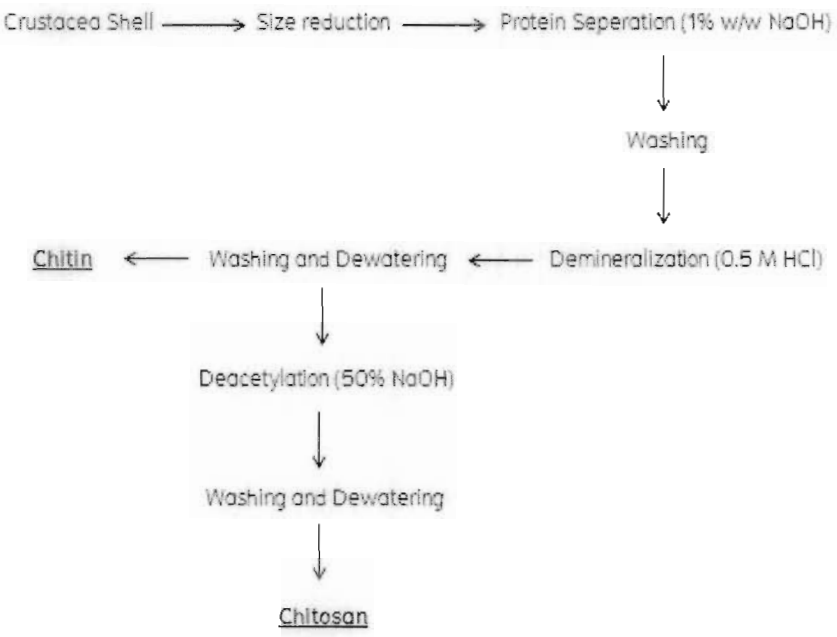
(ข) โครงสร้างของไคติน



(ค) โครงสร้างของไคโตซาน

ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ไคตินและไคโตซาน (Merck Index, 1996)

กรรมวิธีการผลิตไคตินและไคโตซานมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมมักจะใช้วิธีทางเคมี และวัตถุดิบส่วนใหญ่มาจากกากของเหลือในอุตสาหกรรมอาหารทะเลเช่นแข็ง อาทิ เปลือก-หัวกุ้ง กระดองปูและแกนหมึก โดยสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของไคตินและไคโตซานที่ได้มีความหลากหลาย ขึ้นอยู่ กับสายพันธุ์ (Species) ของสัตว์เหล่านี้ รวมถึงกรรมวิธีการผลิต ดังนั้น กระบวนการผลิตที่นำเอาเทคโนโลยีชีวภาพ เข้ามาผสมผสานกับกระบวนการผลิตทางเคมี จึงมีการพัฒนาขึ้นเพื่อให้ได้สมบัติของผลิตภัณฑ์ไคตินและไคโตซาน ตามต้องการและเหมาะสมกับการนำไปใช้



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการผลิตไคตินและไคโตซาน (Hon, 1996)

2.3.1 ลักษณะเฉพาะของไคโตซาน (Characteristics of chitosan)

2.3.1.1 คุณสมบัติการยังยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial properties)

(Harish & Tharanathan, 2007) ไคโตซานและอนุพันธ์ของไคโตซานมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา ไคโตซานจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดระยะเวลา ในการเก็บรักษาอาหารหลายชนิด เช่น อาหารทะเล เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ นม ขนมปัง และน้ำผลไม้

จากการศึกษาฤทธิ์ของไคโตซาน (94% DD, 43 kDa) ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในอาหารที่ความเข้มข้น 40-750 mg/l (Devlieghere et al., 2004) พบว่า แบคทีเรียแกรมลบมีความไวสูงต่อไคโตซาน ในขณะที่ความไวของแบคทีเรียแกรมบวกจะแตกต่างกันมากและยีสต์มีความไวปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของไคโตซานลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูงขึ้น องค์ประกอบของอาหาร เช่น แป้ง โปรตีน และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีผลเสียต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนไขมันไม่พบว่ามีผลกระทบใด ๆ งานวิจัยของ บุญศรี จงเสรีจิตต์ และคณะ (2547) พบว่าไคโตซานที่ความเข้มข้น 100-3000 ส่วนในล้านส่วน (part per million, ppm) สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus, E. coli, S. typhimurium* ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าความเข้มข้น

น้อยที่สุด ของไคโตซาน (minimal inhibitory concentration, MIC) ในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียเท่ากับ 100, 500 และ 1000 ppm ตามลำดับ แต่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *V.parahaemolyticus* ได้เพียง 70% และยับยั้งเชื้อ *V. cholera* ได้ต่ำมาก

สำหรับกลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ได้มีผู้รวบรวมเสนอไว้หลากหลาย Harish and Tharanathan (2007) ศึกษาไคโตซานอาจยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยอนุภาคประจุบวกบนโมเลกุลของไคโตซานสามารถจับกับอนุภาคประจุลบบนผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ทำให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหายขึ้นจนไม่สามารถควบคุมการผ่านเข้าออกของสาร จึงเกิดการรั่วไหลของสารต่างๆ ในเซลล์และทำให้เซลล์ตายในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าฤทธิ์ในการต้านจุลินทรีย์อาจเป็นผลมาจากการขัดขวางสารอาหารเข้าสู่เซลล์ไคโตซานบางชนิดโดยเฉพาะชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เมื่อเคลื่อนเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์จะไปจับกับ DNA จึงยับยั้งการสังเคราะห์ RNA และโปรตีน หรืออาจจับกับไอออนของโลหะ (chelation) และสารอาหารที่จำเป็น นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับขนาดน้ำหนักโมเลกุล ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติลชนิดของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย ชนิดของสารละลายกรดที่ใช้ ชนิดของอาหารและอุณหภูมิ ในการเก็บรักษา องค์ประกอบของอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ เกลือ อาจทำปฏิกิริยากับไคโตซานและส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ (นภาพร เชี่ยวชาญ และธนารัตน์ ศรีธุระวานิช, 2547) การดัดแปลงโมเลกุลของไคโตซานมีผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ด้วยเช่นกัน อนุพันธ์ของไคโตซานหลายตัวเช่นdietylmethylchitosan, N,O-acylchitosan และ hydroxypropychitosan มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราได้ดีกว่าไคโตซาน

2.3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน

2.3.2.1 การละลาย (Solubility)

โคโตซานไม่ละลายน้ำ ด่างและตัวทำละลายอินทรีย์แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์ เกือบทุกชนิดที่มี pH น้อยกว่า 6 กรดอะซิติกและกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลาย ไคโตซาน กรดอนินทรีย์ บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายไคโตซานได้เช่นกัน แต่ต้องอยู่ภายใต้การกวนที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจมีตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น

สารละลายไคโตซานมีความเหนียว ใส มีพฤติกรรมแบบนอน-นิวโตเนียน (non-newtonian) ในสารละลายหมู่อะมิโนของไคโตซานจะแตกตัว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัว (pK_a) ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุของพอลิเมอร์โดย pK_a ของไคโตซานมีค่าอยู่

ในช่วง 6.2 ถึง 6.8 โดยความสามารถในกรละลายของไคโตซานในสารละลายชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสามารถในกรละลายของไคโตซานในสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นของกรด ต่าง ๆ กัน (Hon, 1996)

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (v/v)				
	1%	5%	10%	50%	มากกว่า 50%
Acetic	+	+	+	+	
Adipic	+				
Citric	-				
Formic	+	+	+	+	+
Lactic	+	+	+		
Malic	+	+	+		
Tartaric	-		+		
Hydrochloric	+	-	-		
Nitri	+	-	-		
H_3PO_4*	-	-	-		
Sulfuric*	-	-	-		

หมายเหตุ + แสดงว่าไคโตซานสามารถละลายได้

- แสดงว่าไคโตซานไม่สามารถละลายได้

* แสดงว่าไคโตซานไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก แต่สามารถละลายไดในกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.5%

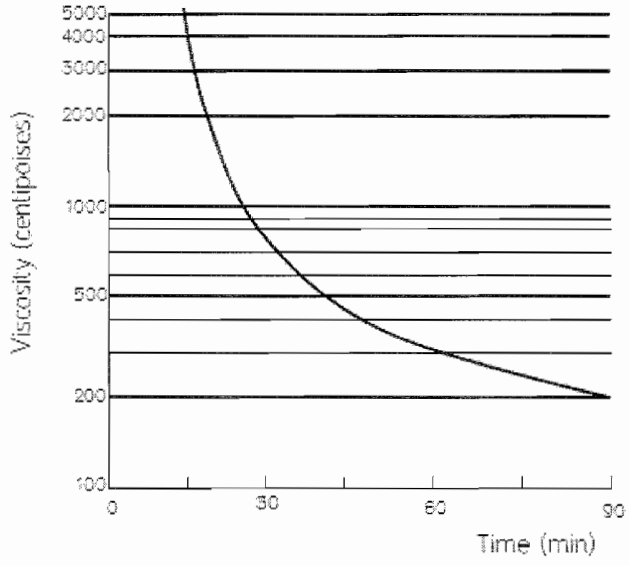
2.3.2.2 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

ไคโตซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง $1x10^5$ ถึง $1.2x10^6$ ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการผลิต

2.3.2.3 ความหนืด (Viscosity)

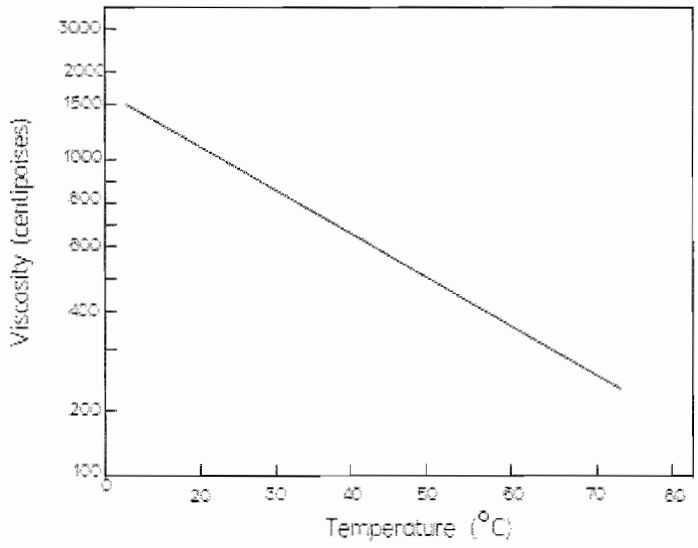
ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น degree of deacetylation น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ionic strength ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ

อุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืด ที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่า pH ลดลง ในขณะที่ความหนืด ของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริก (กรดเกลือ) จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ความเป็นกรดด่างและชนิดของกรด เป็นต้น ในการกำจัดหมู่อะซิติลของไคติน การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นมากและเวลาในการกำจัดหมู่อะซิติลนานขึ้น จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 7



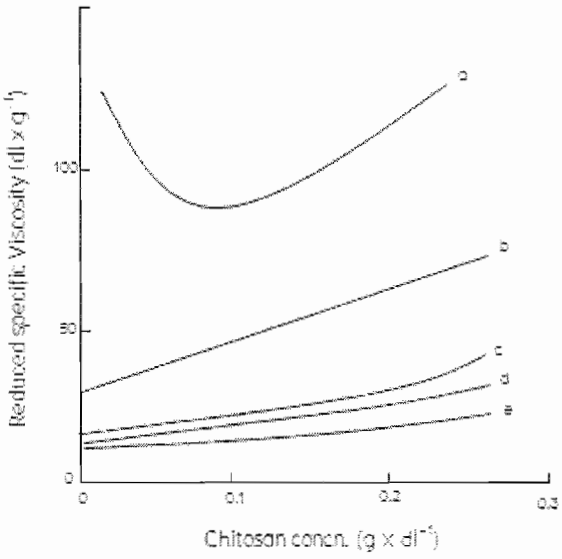
ภาพที่ 7 ผลของเวลาในการกำจัดหมู่อะซิติล (ในสารละลาย NaOH 50%, อุณหภูมิ 118°C) ที่มีต่อความหนืดสารละลายไคโตซาน (Muzzarell, 1977)

เมื่ออุณหภูมิของสารละลายไคโตซานเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายย่อมลดลงและจะกลับเข้าสู่สภาพความหนืดเดิมเมื่อปล่อยให้สารละลายเย็นลง และอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน ๆ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบนสายโซ่โมเลกุล ทำให้ความหนืดไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิม แม้ปล่อยให้สารละลายเย็นลง โดยทั่วไปสารละลายไคโตซานมีคุณสมบัติการไหลสม่ำเสมอในช่วงอุณหภูมิที่กว้างโดยไม่เกิดเจลหรือตกตะกอน ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของความหนืดและอุณหภูมิของไคโตซาน (McNeely, 1959)

ไคโตซานในสารละลายกรด จะแสดงสมบัติเป็น cationic polyelectrolyte ความหนืดของสารละลายจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและความเป็นกรดด่าง รวมถึงปริมาณสารละลายบัฟเฟอร์และเกลือที่ใส่ลงไปในสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อความหนาแน่นและการผลักกันของไฟฟ้าสถิตของประจุบวกบนสายโซ่โมเลกุล โดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานมากขึ้น ความหนืดจำเพาะ (specific viscosity) ของสารละลายจะเพิ่มขึ้นตามในทางกลับกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานลดลง ความหนืดจำเพาะของสารละลายก็จะลดลงด้วยเช่นกัน แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานต่ำกว่าร้อยละ 0.1 พบว่า ความหนืดจำเพาะกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการยืดออกของโมเลกุลเนื่องจากการผลักกันของประจุบวกบนสายโซ่โมเลกุล ทำให้โอกาสในการเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุลสูงขึ้นเมื่อสารละลายได้รับแรงกระทำ ความหนืดจำเพาะจึงกลับเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานกับความหนืดในสารละลายต่าง ๆ : a= 0.2 M acetic acid; b= 0.2 M acetic acid + 0.01 M sodium acetate; c= 0.2 M acetic acid + 0.1 M sodium acetate; d= 0.2 M acetic acid + 0.2 M sodium acetate; e= 0.2 acetic acid + 0.5 M sodium acetate (Muzzarelli, 1977)

2.3.2.4 ความสามารถในการจับตัว (Coagulating ability)

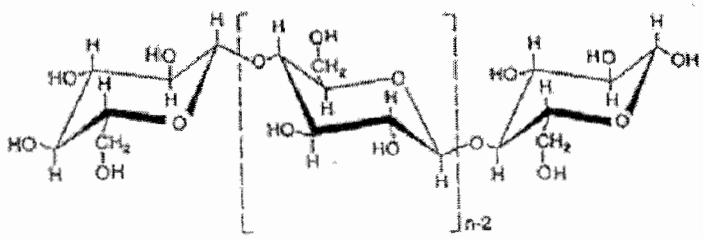
ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน (flocculant and coagulating agent) ที่ดี เนื่องจากการมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่น ๆ จากการวิจัยประสิทธิภาพของไคโตซานในการแยกโปรตีนออกจาก cheese whey พบว่าความสามารถในการจับโปรตีนเป็นสัดส่วนผกผันกับน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถจับกับโลหะหนักได้โดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ไอออนของโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อน (coordinate) กับหมู่อะมิโนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าหมู่อะมิโนในไคโตซานมีประสิทธิภาพในการจับกับ ไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมู่อะซิติลในไคติน ดังนั้นไคโตซานที่มี degree of deacetylation สูงจะมีอัตราการดูดซับหรือความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะสูง ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะของไคโตซานยังขึ้นกับอีกหลายปัจจัย เช่น ความเป็นผลึก และความสามารถในการดึงดูดน้ำของไคโตซาน (Li et al., 1992)

2.3.2.5 การเสื่อมสลาย (Degradation)

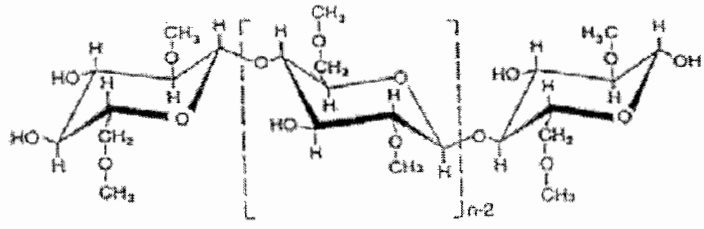
ไคติน-ไคโตซานก็เหมือนกับ พอลิเมอร์หรือโพลิแซคคาร์ไรด์อื่นทั่วไป คือ เมื่อเกิดการเสื่อมสลายจะให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเป็น โอลิโกเมอร์ (oligomer) หรือ โอลิโกแซคคาร์ไรด์ (oligosaccharide) และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดที่เรียกว่าโมโนเมอร์ (monomer) หรือ โมโนแซคคาร์ไรด์ (monosaccharide) โอลิโกเมอร์/โอลิโกแซคคาร์ไรด์ ของไคตินและไคโตซาน คือ N-acetyl-chitooligosaccharide และ chitooligosaccha-rides ตามลำดับ ส่วนโมโนเมอร์/โมโนแซคคาร์ไรด์ของไคตินและไคโตซานคือ *N*-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ตามลำดับ

2.4 เมทิลเซลลูโลส (Methyl cellulose, MC)

เมทิลเซลลูโลสจัดเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสและอยู่ในกลุ่มของเซลลูโลสอีเทอร์ โดยมีโครงสร้างสายโซ่หลักเหมือนกับเซลลูโลส ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กันของ anhydroglucose มาเรียงต่อกัน และมีการแทนที่ไฮดรอกซิลบางหมู่ในเซลลูโลสด้วยหมู่เมทอกซิล (methoxyl group) ด้วยปฏิกิริยาอีเทอริฟิเคชัน (etherification) ดังภาพที่ 10



Cellulose



Methyl Cellulose

ภาพที่ 10 โครงสร้างทั่วไปของเซลลูโลส และเมทิลเซลูโลส (Fedderson & Thorp, 1993)

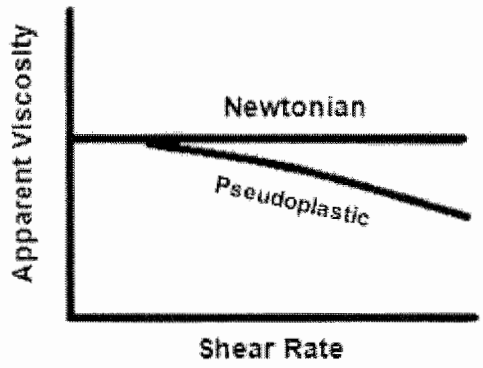
DS (degree of substitution) หมายถึง จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลหรือตำแหน่งเฉลี่ยที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแทนที่อีเทอริฟิเคชันต่อ anhydroglucose 1 หน่วย แต่ละหน่วยของ anhydroglucose ในโมเลกุลจะมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยนิวคลีโอไทด์ (neucleophilic substitution reaction) เมื่อเกิดการแทนที่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ จะหมายถึง DS=1 และถ้าหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ทั้ง 3 หมู่จะมี DS=3 ดังนั้น ค่า DS จะมีค่าไม่เกิน 3 และในทางการค้าเมทิลเซลลูโลสจะมีค่าเฉลี่ย DS=1.5-2.0

เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงเนื่องจากในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน การละลายน้ำจึงต่ำมาก การแทนที่ของหมู่เมทอกซิลในเซลลูโลส จะทำให้ลดปริมาณพันธะไฮโดรเจน และเพิ่มความไม่เป็นระเบียบในสายโซ่โมเลกุลส่งผลให้น้ำหรือตัวทำละลายอื่น ๆ สามารถเข้าล้อมรอบสายโซ่ได้ง่ายเกิดการพองตัวและละลายในที่สุด

2.4.1 สมบัติของเมทิลเซลลูโลส

2.4.1.1 สมบัติสารละลาย (Solution Properties)

เมทิลเซลลูโลสเมื่อละลายน้ำให้สารละลายใส มีความหนืดและไหลได้เป็นสายต่อเนื่องกัน พฤติกรรมการไหล (rheology) ของสารละลายเมทิลเซลลูโลสจะขึ้นกับความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุลและสารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในสารละลาย เช่น อิเลกโตรไลท์ (clectrolytes) เอทานอล โพรพิวลีนไกลคอล เมื่อความเข้มข้นหรือความหนืดของสารละลายสูงขึ้น สารละลายจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ pseudoplastic กล่าวคือ ความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate, γ) โดยไม่ขึ้นกับเวลา (time-independence) และพฤติกรรมการไหลเข้าใกล้แบบ Newtonian มากขึ้นเมื่อสารละลายมี ความหนืดและความเข้มข้นต่ำ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ความหนืดปรากฏและอัตราการเฉือนของของเหลวที่พฤติกรรมการไหลต่าง ๆ (Fedderson & Thorp, 1993)

สารละลายเมทิลเซลลูโลสโดยทั่วไปจะเสถียรที่พีเอช 3 ถึง 10 เมื่อพีเอชน้อยกว่า 3 จะเกิดปฏิกิริยา acid-catalyzes hydrolysis ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดที่บริเวณเชื่อมต่อของ anhydroglucose แต่ละหน่วย และที่พีเอช มากกว่า 10 จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง (oxidative degradation) โดยมีเบสเป็นคะตะลิสท์ ด้วยเช่นกัน

2.4.1.2 สมบัติการเกิดเจล (Gelation Properties)

เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเมทิลเซลลูโลสสูงขึ้น ความหนืดของสารละลายจะลดลงและสามารถเกิดเจล (thermal gelation) ได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง ในขณะเดียวกันเมื่อปล่อยทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง เจลดังกล่าวจะกลับมาอยู่ในภาพสารละลายที่มีความหนืดคงเดิม (Grover, 1993)

ลักษณะการเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อนนี้ อธิบายโดยเกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำ (dehydration) ตามด้วย การเกิดรวมกันของสายโซ่พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic association of chain) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงาน ที่ทำให้โมเลกุลน้ำเกิดการสั่นสะเทือนและเคลื่อนไหวมีมากกว่าพลังงานของพันธะไฮโดรเจนน้ำที่ล้อมรอบสายโซ่พอลิเมอร์ โมเลกุลน้ำที่มีพลังงานสูงจึงพยายามแยกตัวออกจากสายโซ่โมเลกุล ในขณะเดียวกันบางส่วนของพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำเริ่มหันเข้ามารวมกันเอง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือให้เวลาที่อุณหภูมิสูงนานขึ้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ จะเกิดแรงกระทำต่อกันมากขึ้นและได้เจลที่มีโครงสร้าง 3 มิติ (three dimensional structure) ลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีแนวโน้มมาอยู่รวมกันและเกิดเป็นเจลที่มีโครงสร้างมิตินี้เป็นปรากฏการณ์ของ

thixotropy ซึ่งจะแสดงอย่างชัดเจนเมื่อถึงอุณหภูมิการเกิดเจล โครงสร้างของเจลดังกล่าวถูกทำลายลงได้เมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องโดยเจลเปลี่ยนกลับ เป็นของเหลวหนืดที่มีสมบัติคงเดิม

การเกิดเจลและความแข็งแรงของเจลนี้ขึ้นกับปริมาณการแทนที่ (DS) น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้นและ ปริมาณเกลือของโลหะ เมื่อปริมาณของหมู่เมทอกซิลลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจล (gelation temperature) และความ แข็งแรงของเจลจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ได้มีการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลพบว่า ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงของเจลเริ่มคงที่เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของเมทิลเซลลูโลสมากกว่า 15000 ขึ้นไป (Grover, 1993)

โดยทั่วไปเกลือของโลหะหรืออิเล็กโตรไลท์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ สามารถผสมเข้ากันได้กับสารละลายเมทิลเซลลูโลสเนื่องจากความเป็นพอลิเมอร์ไร้ประจุ (nonionic polymer) อย่างไรก็ดีเมื่ออิเล็กโตรไลท์เพิ่มขึ้นมากเกินขีดจำกัดจะส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลดลงและสารละลายพอลิเมอร์แยกตัวออกมา ทั้งนี้เนื่องจาก อิเล็กโตรไลท์สามารถดึงโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบเมทิลเซลลูโลส ทำให้เมทิลเซลลูโลสอุ้มน้ำได้น้อยลง อุณหภูมิการเกิดเจลลดลง นอกจากนี้การเติมเอทานอลหรือโพรพิวลีนไกลคอลสามารถเพิ่มอุณหภูมิการเกิดเจลได้ถึง 20 องศาเซลเซียสด้วยเช่นกัน

2.4.1.3 สมบัติเมื่อเป็นผงและฟิล์ม (Powder and Film Properties)

โดยทั่วไปเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นผงสีขาวแข็ง ขนาดอนุภาคเล็ก เพื่อการละลายที่รวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีลักษณะเป็นแบบแกรนูลเพื่อลดการฟุ้งกระจายของผงเมทิลเซลลูโลส และง่ายต่อการละลายโดยการเติมสารจำพวกไกลคอล เช่น โพรพิวลีนไกลคอล วิธีการละลายผงเมทิลเซลลูโลสโดยส่วนใหญ่จะละลายในน้ำร้อนอุณหภูมิสูงกว่าการเกิดเจลพร้อมกับการกวน เพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนและให้ผงเมทิลเซลลูโลสกระจายตัวอุ้มน้ำได้อย่างทั่วถึงแล้วปล่อยให้สารละลายเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องจะได้สารละลายใส

ฟิล์มเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะใส ไม่มีสี มีความแข็งแรงสูง เปราะ ความยืดหยุ่นต่ำ และละลายน้ำ แต่ไม่ละลายในไขมันและน้ำมัน สามารถลดความเปราะบางโดยการเติมพลาสติไซเซอร์ เช่น โพรพิวลีนไกลคอล โพลิเอทิลีนไกลคอล กลีเซอลีน เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของฟิล์มที่ไม่ใส่พลาสติไซเซอร์แสดงดังตารางที่ 4 ฟิล์มเมทิลเซลลูโลสสามารถทำให้ไม่ละลายน้ำได้โดยการเกิดโครงร่างตาข่ายที่หมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่อัลดีไฮด์ เช่น Glyoxal, Urea-formaldehyde, Melamine-formaldehyde และ Poltphenolic compound

ตารางที่ 4 สมบัติของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสที่ไม่ใส่พลาสติไซเซอร์ (Grover, 1993)

Specific gravity	1.39
Refractive index	1.49
Equilibrium moisture	6.5%
Melting point	290-605 °C (554-561 °F)
Tensile stren th	58.6-78.6 MPa
Elongation	10.15%
Moisture vapor transmission rate 100 °F, 90-100%RH	10.5 g/100 cm^2 per 24 h per 25.4 μm
Oxygen transmission rate 75 °F	3.9 mL/100 cm^2 per 24 h per 25.4 μm
Ultraviolet transmission 400 nm	54.6%
Ultraviolet transmission 210 nm	25.7%

2.5 เปลือกไข่ (Egg Shell, ES)

2.5.1 ลักษณะภายในของไข่ (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

โครงสร้างของไข่ไก่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เปลือกไข่ (eggshell) ไข่ขาว (egg white) และไข่แดง (egg yolk) แต่ละส่วนมีปริมาณร้อยละ 9-11 ร้อยละ 60-63 และร้อยละ 28-29 ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักของไข่แต่ละฟองจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ และอายุของแม่ไก่ ส่วนที่อยู่ใต้เปลือกไข่ทั้งหมดนอกจากเยื่อหุ้มไข่จะใช้เป็นอาหาร เมื่อคิดหักจำนวนของเปลือก และเยื่อติดเปลือกแล้วจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 89 ของน้ำหนักไข่มีเปลือก หน้าที่ของเปลือกไข่นอกจากจะเป็นที่อากาศผ่านเข้าออก และน้ำระเหยออกจากไข่ เปลือกไข่ หรือโครงสร้างของไข่ยังช่วยเก็บรักษาไข่แดง และไข่ขาวที่อยู่ภายในให้สะอาดบริสุทธิ์ ฉะนั้นหน้าที่สำคัญของเปลือกไข่ข้อแรกก็คือ ช่วยรักษาคุณภาพภายในของไข่ไม่ให้เสื่อมเสียได้ง่าย

เปลือกไข่เป็นพวกหินปูนแข็งเรียบติดแน่นอยู่กับเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอก จะแยกเปลือกไข่ออกจากเนื้อเยื่อได้ยาก ความหนาของเปลือกมักขึ้นอยู่กับขนาดของไข่ ไข่ใหญ่มีเปลือกหนากว่าไข่เล็ก ทั้งนี้ย่อมแล้วแต่ไก่แต่ละตัว พันธุ์ อาหาร และฤดูกาลอีกด้วย ไก่พื้นเมือง ไก่ป่า มีเปลือกไข่หนากว่าไก่พันธุ์แท้ต่าง ๆ หรือไก่สายพันธุ์ใหม่

หน้าที่ของเปลือกไข่โดยธรรมชาติต้องทนรับน้ำหนักแม่ไก่เวลากกฟักไข่ และมี

ความบางพอที่ลูกไก่จะเจาะดิ้นออกจากเปลือกนี้ได้ เปลือกไข่ยังจะต้องโปร่งพอที่จะให้เชื้อลูกไก่ได้อากาศมาหายใจ และต้องหนาพอที่จะป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ไม่ให้ผ่านเข้าไปในไข่ได้ และยังมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความชื้นหนีหายได้ง่าย นอกจากนี้โดยธรรมชาติเปลือกไข่ยังต้องมีสารอนินทรีย์ต่าง ๆ มากพอที่จะเป็นแร่ธาตุไปหล่อเลี้ยงเชื้อลูกไก่ให้เติบโตได้อีกด้วย ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ดังแสดงในตารางที่ 5

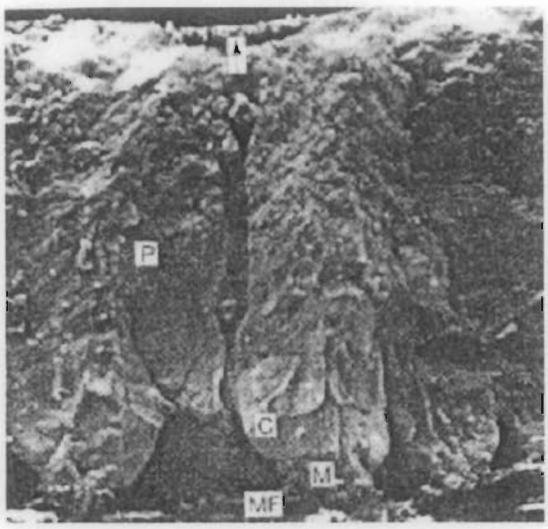
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

ชนิดองค์ประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณ(%)
น้ำ	0.1	1.6
วัตถุแห้ง	6.0	98.4
อินทรียวัตถุ	0.2	3.3
โปรตีน	0.2	3.3
ลิปิด	น้อยมาก	0.03
อนินทรีย์วัตถุ	5.8	95.1
รวม	6.1	100.0

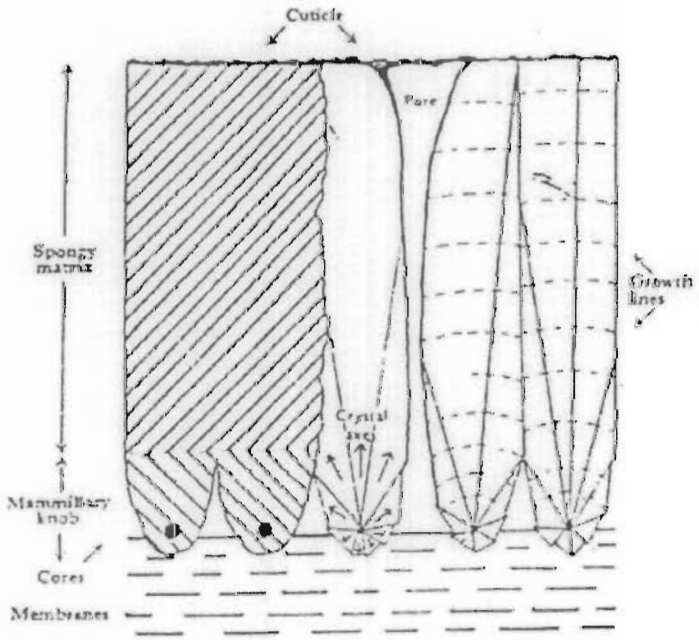
2.5.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของเปลือกไข่

เปลือกไข่มีลักษณะโค้งลดหลั่นหันตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางไข่ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนอินทรียสาร ทำหน้าที่ เชื่อมระหว่างเซลล์ (organic matter) เป็นโปรตีนแบบเดียวกับพังผืดและกระดูก (collagen-like) (ส่วน MF ในภาพที่ 12) อีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนประกอบของอนินทรียสารพวก แคลเซียมคาร์บอเนตในภาพผลึก 6 เหลี่ยม (ส่วน P และ C ในภาพที่ 12) และส่วนประกอบของแมกนีเซียมกับฟอสเฟต (ส่วน M ในภาพที่ 12) เมื่อขยายเปลือกไข่ (ภาพที่ 12) ทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ (ภาพที่ 13) ได้เป็นส่วน ๆ จากด้านบนลงล่าง ได้ดังนี้

1. เคลือบผิวไข่ (culticle)
2. เปลือกไข่ชั้นนอก (spongy หรือ palisade layer)
3. เปลือกไข่ชั้นใน (mammillary layer)
4. เยื่อเปลือกไข่ (shell membrane)

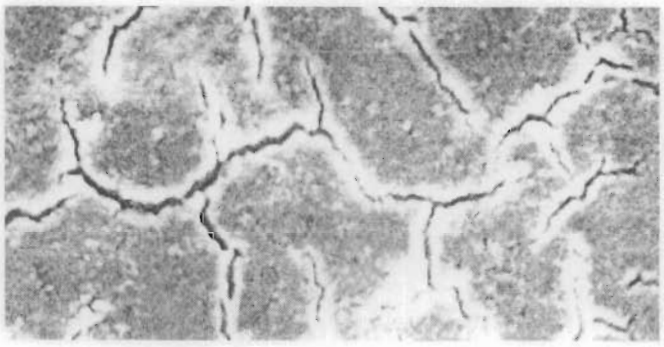


ภาพที่ 12 ลักษณะของเปลือกไข่ (ภาคตัดขวาง) ส่วนเคลือบผิวไข่ (cuticle) ตามลูกศร, P: เปลือกชั้นนอก (palisade layer), C:ปุ่มพื้นเปลือก (cone layer), M:เปลือกชั้นใน (mammillary) และ MF:เยื่อเปลือกไข่ (membrane fibers) (Board & Fuler, 1994)



ภาพที่ 13 โครงสร้างภาคตัดขวางของเปลือกไข่ (Tullet, 1987)

2.5.2.1 ส่วนเคลือบผิวไข่ (cuticle) เป็นชั้นที่อยู่บนผิวนอกของเปลือกไข่ หนาประมาณ 0.5-12.8 ไมโครเมตร (Tullet, 1987) เมื่อขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน จะปรากฏรอยแยกจำนวนมากบนพื้นผิว (ภาพที่ 14) เพราะเคลือบผิวไข่มีหน้าที่อุดรูพรุนที่ผิวด้านนอกป้องกันการสูญเสียน้ำและการบุกลุกของจุลินทรีย์ ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 85-87 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3.5-4.4 ไขมันร้อยละ 2.5-3.5 และเถ้าร้อยละ 3.5 ทั้งหมดประกอบกันเป็นอินทรียสารทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529) โดยมีประเภทและชนิดของสารอินทรีย์ ดังนี้



ภาพที่ 14 ภาพอิเล็กตรอนแบบสแกนของพื้นผิวด้านนอกของชั้นเคลือบผิวไข่ (Board & Fuler, 1994)

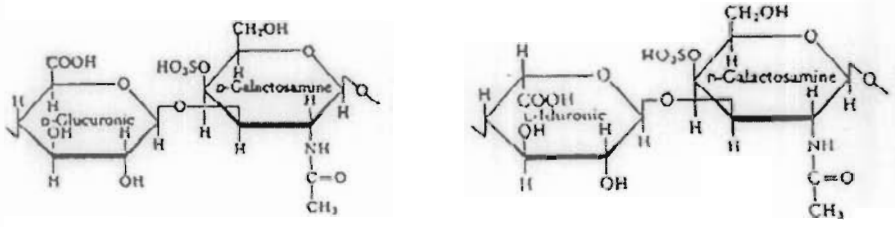
Protein		Unspecified
Carbohydrate		Hexosamines – Glucosamine, Galactosamine, Sialic acid
		Neutral sugars – Galactose, Glucose, Mannose, Fucose
		Pentose – Xylulose, Unspecified pentose
Fat		Neutral lipids – Mono-, di-, and tri- glyceride, Free fatty acid, Cholesteral, Cholesterol ester
		Phospholipids – Lysolecithin, Lecithin, Cephalin, Sphingomyelin

นอกจากนี้บนชั้นเคลือบผิวไข่ ยังพบเม็ดสี (pigment) ที่เกิดจากวัตถุสีของเม็ดเลือดแดง (porphyrin) กระจายอยู่จำนวนมาก ซึ่งเม็ดเหล่านี้จะปะปนกับเกลือแคลเซียมและ

เยื่อเปลือกไข่ด้วย แต่ปริมาณการกระจายจะลดลงจากชั้นเคลือบผิวไข่ลงมา ทำให้เปลือกไข่ชั้นนอกมีเม็ดสีมากกว่าเปลือกไข่ชั้นในและเยื่อเปลือกไข่ (Board & Fuler, 1994; สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

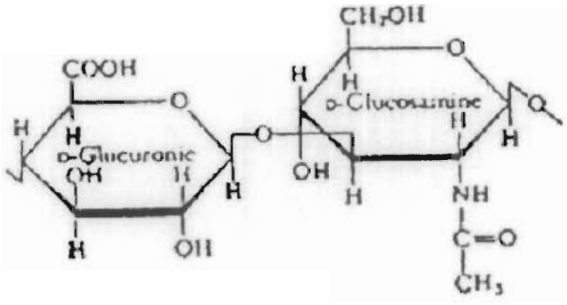
2.5.2.2 เปลือกไข่ชั้นนอก (spongy layer) เป็นชั้นที่แคลเซียมคาร์บอเนตเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในภาพของผลึก Calcite และจัดเรียงตัวตามแนวตั้งอยู่บนเมตริกซ์อินทรีย์ (organic matrix) ซึ่งเป็นสารพวก protein acid mucopolysaccharide complex ที่ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 70 พอลีแซคคาไรด์ร้อยละ 11 ที่แบ่งเป็น chondroitin sulphate A และ B (ดังภาพที่ 15) ประมาณร้อยละ 35 และกรดยูโรนิก ในภาพกรดไฮยาลูโรนิก (ดังภาพที่ 16) ประมาณร้อยละ 20 โดยมีชนิดและประเภทของสารอินทรีย์ (Tullet, 1987) ดังนี้

Protein	Unspecified but non-collagenous
Carbohydrate	Hexosamines – Glucosamine, Galactosamine, Sialic acid
	Neutral sugars – Galactose, Glucose, Mannose, Fucose, Xylulose
	Hexuconic acid – Glucuronic cid, Tduronic acid
	Mucopolysaccharides – Hyaluronic acid, Chondroitin sulphate A, Chondroitin sulphate B
Fat	Unspecified
Calcium-binding	Unspecified except for ovocacin component

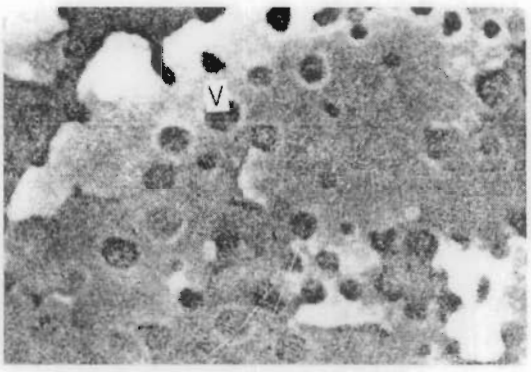


(ก.) (ข.)

ภาพที่ 15 ก. โครงสร้างสารครอนดรอยทิน ซัลเฟต เอ (Chondroitin sulphate A)
ข. โครงสร้างสารครอนดรอยทิน ซัลเฟต บี (Chondroitin sulphate B)
(ดาวัลย์ ฉิมภู่, 2538)



ภาพที่ 16 โครงสร้างกรดไฮยารูโรนิก (Hyaluronic acid) (ดาวัลย์ ฉิมภู่, 2538)



ภาพที่ 17 ลักษณะรูพรุนแบบฟองน้ำของเปลือกไข่ชั้นนอก (Board & Fuler, 1994)

เปลือกไข่ชั้นนอกมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (ภาพที่ 17) เพราะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก (v) ตั้งแต่ 7000-17000 รู ที่เชื่อมโยงจากผิวนอกเข้าไปถึงเยื่อเปลือกไข่ เพื่อเป็นทางผ่านของอากาศ โดยที่แต่ละบริเวณของเปลือกไข่จะมีจำนวน รูต่อตารางเซนติเมตรไม่เท่ากัน คือ ด้านป้าน ด้านกลาง และด้านแหลม มีจำนวนรูเท่ากับ 125.6, 106.1-113.4 และ 73.7 รูต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และขนาดของรูขนาดใหญ่ เท่ากับ 0.022-0.029 มิลลิเมตร รูขนาดเล็กเท่ากับ 0.0038-0.0054 มิลลิเมตร (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529)

2.5.2.3 เปลือกไข่ชั้นใน (mammillary knob layer) เป็นปุ่มครึ่งทรงกลมของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต 6 เหลี่ยม (hexagonal plates) สูง 1/3 ของความหนาเปลือกไข่ (Parkhurst & Mountney, 1988) ภายในมี mammillary core ซึ่งเป็นมวลสารอินทรีย์ขนาดเล็กและเป็นยุดเริ่มต้นของการสร้างผลึกที่เรียกว่า seeding sites ประกอบด้วย protein acid mucopolysaccharide complex ที่มี neutral sugar และ neutral mucopolysaccharide ถูก

ล้อมรอบด้วย sialomucin ซึ่ง เป็นสารที่มีกรดอ่อน และ mammillary core ยังจับแน่นกับชั้นเยื่อเปลือกไข่ ด้วยการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนกับเส้นใยของเยื่อเปลือกไข่ชั้นนอก (Tullet, 1987)

2.5.2.4 เยื่อเปลือกไข่ (shell membrane) เป็นชั้นบาง 2 ชั้นแนบติดกันโดยตลอด ยกเว้นด้านป้านของไข่ที่ ถูกแยกกันด้วยช่องอากาศ (air sac) หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร ประกอบด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ร้อยละ 95, 2 และ 3 ตามลำดับ (ไม่คิดปริมาณเถ้า) (Board & Fuler, 1994) มีประเภทและชนิดของสารอินทรีย์ ดังนี้

Protein	Keratin
	Collagen
	Elastin
Carbohydrate	Hexosamines – Glucosamine, Galactosamine, Sialic acid
	Neutral sugars – Galactose, Glucose, Mannose, Fucose
	Aldopentoses – Xylulos
Fat	Neutral lipids – Mono-, di-, and tri- glyceride, Free fatty acid,
	Cholesteral,
	Cholesterol ester
	Phospholipids – Lysolecithin, Lecithin, Cephalin, Sphingomyelin

หรือคิดรวมปริมาณเถ้า ซึ่งประกอบด้วย ฟอสฟอรัส แคลเซียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม สังกะสี แมงกานีส เหล็ก ทองแดง โบรอน และอลูมิเนียม อีกร้อยละประมาณ 2 (Charrier et al., 1996) โดยเยื่อเปลือกไข่แต่ละชั้นประกอบด้วย เส้นใยโปรตีน เคราติน, อิลาสติน และคอลลาเจน เชื่อมต่อกัน แล้วถูกห่อหุ้มด้วย mucopolysaccharide หนาประมาณ 0.5 ไมโครเมตร (Board & Fuler, 1994) แบ่งย่อยได้เป็น 2 ชั้น คือ

เยื่อเปลือกไข่ชั้นนอก (out shell membranes) อยู่ติดกับส่วน true shell จึงมีเส้นใยบางส่วนยื่นเข้าไปในส่วนฐานของเปลือกชั้นใน แล้วรวมตัวเป็น mammillary core เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 3 ไมโครเมตร เฉลี่ย 1.3 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 15 ไมโครเมตร (Board & Fuler, 1994; Tullet, 1987)

เยื่อเปลือกไข่ชั้นใน (inner shell membranes) มีผิวเรียบ บาง หนาประมาณ 2.7 ไมโครเมตร เส้นใยยาว มากกว่า 23 ไมโครเมตร เพราะปลายเส้นใยที่เรียวแหลมสามารถ

ซ้อนเกย (overlap) รวมกับเส้นใยใกล้เคียงภายใต้ชั้นห่อหุ้มเดียวกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด เท่ากับ 1.5 ไมโครเมตร เฉลี่ย 0.9 ไมโครเมตร เป็นชั้นที่แยกไข่ขาว ออกจากส่วนของเปลือก เรียกว่า "limiting membrane" ทั้ง 2 ชั้น มีรูพรุนที่ผิวจำนวนมาก เพื่อนเป็นทางผ่านของอากาศ โดยเยื่อชั้นในมีรูพรุนมากกว่าเยื่อชั้นนอก (Board & Fuler, 1994; Tullet, 1987)

เปลือกไข่ประกอบด้วยแร่ธาตุประมาณร้อยละ 95 ในส่วนนี้จะมีแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 98 สารอนินทรีย์อื่น ๆ จะรวมถึงฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และเหล็ก กับซัลเฟอร์ปริมาณน้อยมาก เกลืออนินทรีย์ที่อยู่ในเปลือกไข่ส่วนมากจะเป็นคาร์บอเนต และฟอสเฟสของแคลเซียมและแมกนีเซียม ผลึก calcite ที่มีอยู่ในเปลือกไข่จะประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และผลึก dolomite จะประกอบด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยโครงสร้างผลึก dolomite จะแข็งแรงกว่าผลึก calcite เปลือกไข่จะประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน โพลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย galactosamine, glucosamine, galactose, fructose, glucose, sialic acid และไขมัน ปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้เยื่อหุ้มเปลือกไข่ยังประกอบด้วยส่วนที่เป็นเม็ดสี คือ protoporphyrin ปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเปลือกไข่ไก่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 94 แมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 แคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 1 และสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอีกร้อยละ 4 เปลือกไข่ไก่จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตเป็นแหล่งของแคลเซียมคาร์บอเนต

2.6 สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer) (ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์, 2551)

สารเพิ่มความยืดหยุ่น (plasticizer) คือสารที่เติมลงไปเพื่อทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อสภาพความเป็นกรด ด่าง และสามารถบิดโค้งงอให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้น สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์โดยแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์และเกิดพันธะทุติยภูมิกับสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นพันธะอ่อน ๆ ได้แก่ พันธะแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ แล้วส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์แยกออกจากกัน หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือ เป็นสารที่ไปลดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ ส่งผลให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวตัวได้ดีขึ้น ทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัว เหนียว ยืดหยุ่นดีขึ้นและสามารถขึ้นรูปให้เป็นรูปต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการบิดงอพอลิเมอร์ สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เติมลงไปจะทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวลง โดยไปลด T_g ของพอลิเมอร์และไม่ทำให้พอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์เข้มข้นมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่ถ้าเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ไม่ดี (poor plasticizer) จะทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ในทาง

อุตสาหกรรมนิยมใช้เพราะประหยัด สะดวก และต้นทุนต่ำ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ได้นาน เพราะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์เมื่อทิ้งไว้นานๆ ตัวสารเพิ่มความยืดหยุ่นก็จะหลุดออกจากตัวพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะ แข็งกระด้าง ฉะนั้นปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เราควรเลือกใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีคุณภาพ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้นาน ตัวสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. จะต้องมีมวลโมเลกุลสูง ซึ่งจะต้องสูงกว่าสารละลายเพื่อให้การระเหยของสารเพิ่มความยืดหยุ่นระเหยได้ยาก
2. จะต้องมีหมู่ หรือบริเวณที่สามารถเกิดพันธะทุติยภูมิกับพอลิเมอร์ได้ดี และแข็งแรง เช่น หมู่เอสเทอร์ (-COO-)
3. ควรมีหมู่อัลคิล (Alkyl) ที่มีสายโซ่ยาว ๆ หรือมีกิ่งสาขามาก เพื่อช่วยทำให้เกิดการหล่อลื่นที่ดีกับมวลโมเลกุล โมเลกุลในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นได้ดี
4. ควรมีความดันไอต่ำ และมีการซึมผ่านที่ต่ำ เพื่อจะได้ไม่หลุดออกจากพอลิเมอร์ได้ง่าย ๆ
5. ต้องมีความสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี (High compatibility)
6. ต้องสามารถถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ยาก (Low extractability)
7. ต้องมีความเป็นพิษน้อย หรือไม่มีความเป็นพิษเลย (Low toxicity)
8. ควรมีราคาถูก (Low cost)

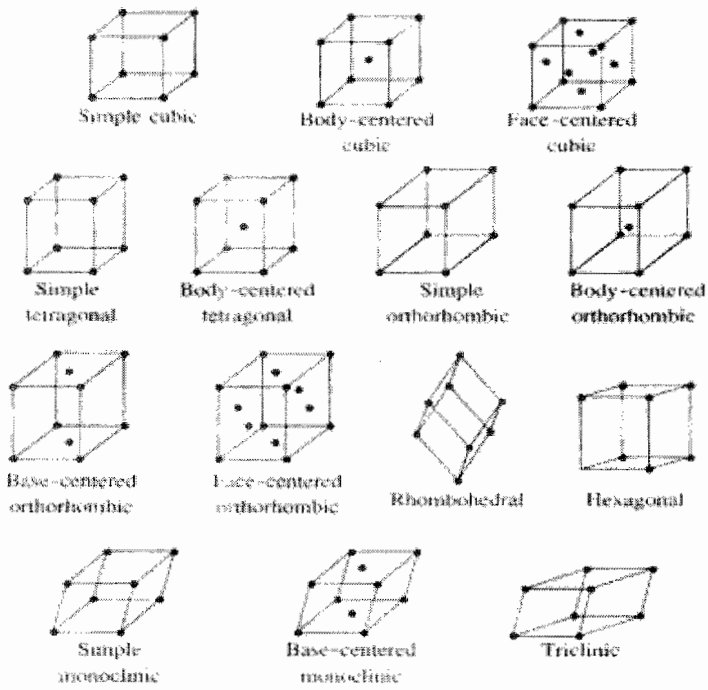
สมบัติเหล่านี้เป็นตัวกำหนดการเลือกใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ในการผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสัณฐานเป็นแบบกึ่งผลึก สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature, T_m) และในบางกรณียังช่วยลดดีกรีความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ด้วย สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ในบริเวณอสัณฐานเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่มีปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในบริเวณของผลึกทำให้เกิดสองบริเวณที่แตกต่างกันหลังจากเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ บริเวณของผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงและบริเวณอสัณฐานที่มีการผสมกันเกิดขึ้น แม้ว่าในความเป็นจริงจะเกิดสองบริเวณที่แยกกันที่อัตราส่วนการเติมต่าง ๆ แต่ก็มีความเข้ากันได้ เนื่องจากของไหลผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) ของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกสูง การหาสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์จะทำได้ยากขึ้นเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่ดีตามความต้องการ (Rudin, 1999)

2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

2.7.1 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (โสพส ไกรแสน, 2552)

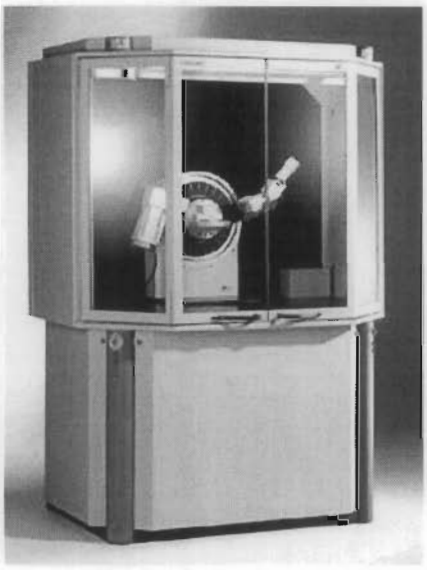
2.7.1.1 ระบบผลึก

ผลึกต่าง ๆ ประกอบขึ้นด้วยอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมีลักษณะคล้ายตารางสี่เหลี่ยมวางซ้อนกันเป็นจำนวนมาก โดยแต่ละชั้นจะมีระยะห่างเท่ากันและมีแนวของตารางขนานกัน จุดซึ่งเกิดจากการตัดกันของชั้นตารางจะแทนอะตอม โดยอะตอมทุก ๆ กลุ่มซึ่งแทนด้วยจุดดังกล่าวจะมีลักษณะการจัดเรียงอะตอมแบบเดียวกัน ตารางสี่เหลี่ยมซึ่งวางซ้อนกันเป็นชั้นนี้ จะเรียกว่า แถวลำดับแลตทิซ (lattice array) และจุดที่เกิดจากการตัดกันของเส้นตารางนี้ จะเรียกว่าจุดแลตทิซ (lattide point) จากรูปจะพบว่า ผลึกต่าง ๆ ประกอบด้วยหน่วยเซลล์สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ จำนวนมาก หน่วยเซลล์เหล่านี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ระบบ โดยจำแนกด้วยองค์สมมาตร ด้านและมุมของหน่วยเซลล์ทั้ง 7 นอกจากนี้ ระบบผลึกทั้ง 7 นี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 14 แบบบราเวส์แลตทิซ ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 บราเวส์แลตทิซทั้ง 14 แบบใน 3 มิติ (โสพส ไกรแสน, 2552)

เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) ดังแสดงในภาพที่ 19 เป็นเครื่องมือที่ใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวและใช้กับตัวอย่างแร่ที่บดเป็นผงละเอียดที่อัดลงในที่ใส่ตัวอย่างหรือฉาบบนแผ่นสไลด์ เครื่องนี้จะปล่อยรังสีให้ตกกระทบบนตัวอย่างโดยตัวอย่างจะหมุนไป โดยทำมุม กับแนวยิง หลอดสำหรับนับความเข้มข้นของรังสีที่สะท้อนออกจากผงผลึกจะหมุนไปเช่นกันเป็นมุมเท่ากับ เครื่องนับความเข้มของรังสีจะส่งข้อมูลที่ได้ไปยังเครื่องขยาย (amplified) และแปลงค่าเป็นตัวเลขหรือบันทึกบนกระดาษตารางบันทึกซึ่งเคลื่อนที่ในอัตราความเร็ว ที่ปรับได้ตามต้องการ



ภาพที่ 19 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) (โสพส ไกรแสน, 2552)

2.7.1.2 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้ คือ ส่วนที่ผลิตรังสี (X-ray generator) เครื่องเลี้ยวเบนรังสี (diffraction) และเครื่องวัดความเข้มของรังสี (detector)

2.7.1.2.1 ส่วนที่ผลิตรังสี

ประกอบด้วยหลอดรังสีเอกซ์ และเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าแรงสูง (high volted generator)

1 หลอดรังสีเอกซ์ ประกอบด้วยไส้ทังสเตนเป็นขั้วลบ ส่วนนี้จะอยู่ในทรงกระบอกเพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนรวมกันอยู่เป็นลำแสง ขั้วบวกจะเป็นโลหะที่ต้องการจะใช้

รังสีชนิดนั้น ๆ เช่น ทองแดง โมลิบดินัม เหล็ก โคบอลต์ เป็นต้น ส่วนบนของหลอดทำด้วยทองแดง เพื่อช่วยระบบระบายความร้อน เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งอยู่ระหว่าง 30 -60 กิโลโวลต์ (kV) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อน ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านออกมาทางหน้าต่าง 4 ด้าน ซึ่งทำด้วยธาตุเบริลเรียม พร้อมกับมีโลหะกรองแสงสำหรับตัดรังสีอื่น ๆ

2 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าแรงสูง เป็นเครื่องเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นอยู่ระหว่าง 20-100 กิโลโวลต์ เป็นต้นกำเนิดพลังงานที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ในหลอดรังสีเอกซ์ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงผ่าน

2.7.1.2.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสี

รังสีเอกซ์ซึ่งเป็นรังสีคลื่นเดียวที่ออกจากหลอดรังสีจะผ่าน soller slit ซึ่งทำหน้าที่ตัดแสงที่กระเจิงไปทิศทางต่าง ๆ ให้เหลือเป็นเส้นตรงเดียวแล้วผ่านหน้าต่างแยกรังสีซึ่งสามารถเลือกใช้ขนาดต่าง ๆ ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการ

เมื่อรังสีตกกระทบตัวอย่างS จะเกิดการเลี้ยวเบนผ่านหน้าต่างรับรังสี R ผ่าน soller slit RP อีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่ให้แสงเป็นเส้นตรงแล้วผ่านหน้าต่าง SS ซึ่งจะต้องมีขนาดพอดีกับหน้าต่างตัวแรก D หลังจากนั้นรังสีจะผ่านเข้าเครื่องวัดความเข้มของรังสี

F	เป็นรังสีเอกซ์ที่ออกจากหลอดรังสีเอกซ์
P และ RP	เป็นส่วนที่ทำให้รังสีเป็นเส้นตรง (soller slit)
D	เป็นหน้าต่างแยกรังสี (divergence slit)
S	เป็นตัวอย่างที่จะวิเคราะห์
R	เป็นหน้าต่างรับรังสี
SS	เป็นหน้าต่างที่กระเจิงรังสีเพื่อเข้าเครื่องวัด

2.7.1.2.3 เครื่องวัดความเข้มของรังสี แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1 เครื่องวัดชนิดที่มีก๊าซผ่าน (gas flow counter) หลอดของเครื่องวัดชนิดนี้เป็นกระบอกโลหะกลวงภายในมีไส้ทังสเตนเป็นขั้วบวกมีก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือ ซีนอน (Xe) บรรจุอยู่

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย อิเล็กตรอนของอะตอมของก๊าซหลุดออกไปเหลือเป็นประจุบวก ดังนี้

$$Ar \xrightarrow{h\nu} Ar^{+} + e$$

อาร์กอนไอออน (Ar+) และอิเล็กตรอน (e) เรียกว่าคู่ของไอออน (ion pair) จำนวนของคู่ไอออนครั้งแรกที่ถูกยิงทำให้แตกตัว (ionized) โดยรังสีเอกซ์นี้จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไป ดังสมการ

n = Eo / C1

Eo = พลังงานของรังสีเอกซ์

C1 = ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่พอดี (effective ionization potential)

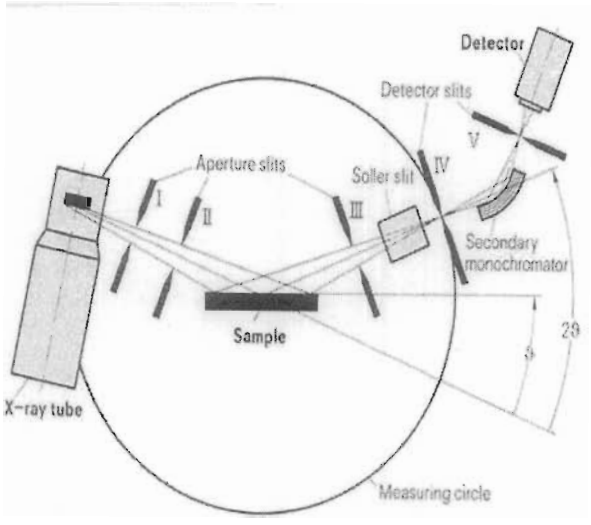
n = จำนวนของคู่ไอออนครั้งแรกที่ถูกยิงทำให้แตกตัวโดยรังสีเอกซ์

หลังจากการเกิดคู่ของไอออนในขณะความเข้มของสนามไฟฟ้าไม่สูงพอคู่ของไอออนที่เกิดขึ้นสามารถกลับไปรวมตัวกันได้ (recombination) แต่ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ให้มากขึ้นจนกระทั่งความต่างศักย์ที่ขั้วบวกสูงมากพอ (ประมาณ 1,800 โวลต์) การรวมตัวของคู่ของไอออนก็จะหยุดอิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปที่ขั้วบวกและประจุบวกจะไปที่กระบอกโลหะซึ่งต่อลงดินบริเวณใกล้กับขั้วบวกจะมีอิเล็กตรอนอยู่ประมาณ 10,000 เท่าจากปกติทำให้สามารถวัดสัญญาณได้เมื่อผ่านเครื่องขยาย

2 เครื่องวัดชนิดซินทิลเลชัน (scintillation counter) เครื่องวัดชนิดนี้เป็นการเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 2 สภาวะ คือ รังสีเอกซ์ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานแสงสีฟ้าโดยผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) ซึ่งเป็นผลึกเรืองแสง (phosphor crystal) จากนั้นแสงสีฟ้านี้จะผ่านไปยังพลวง-ซีเซียม (Sb/Cs) ซึ่งทำหน้าที่เป็น photocathode นี้ จะสามารถผลิตอิเล็กตรอนให้ไปตกบน dynode ซึ่งเรียงกันอยู่ 10 แถวโดยแต่ละแถวจะมีศักย์ไฟฟ้า (potential) ที่สามารถทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นบน dynode ชุดถัดไปเรื่อย ๆ ทั้ง 10 แถว จนได้อิเล็กตรอนจำนวนมากไปรวมกันที่ขั้วบวก ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าไปสะสมอยู่ที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (condenser) จากนั้นจะผ่านเครื่องขยายไปยังเครื่องรับสัญญาณ

2.7.1.3 การทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียวพุ่งไปตกกระทบบนตัวอย่างซึ่งบดละเอียดที่บรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างชนิดแบนหรือฉาบลงบนกระจกที่ใส่ตัวอย่างจะอยู่บนแกนที่หมุนด้วยมอเตอร์ ในขณะที่ตัวอย่างหมุนไป ทำให้เกิดมุมตกกระทบของรังสีเท่ากับแขนของเครื่องวัดความเข้มของรังสีจะหมุนไปเท่ากับ 2 ดังในภาพที่แสดง 20 ในขณะปฏิบัติการนี้ ตัวอย่างเครื่องวัดความเข้มของรังสี และกระดาษตารางบันทึกจะหมุนไปพร้อม ๆ กัน



ภาพที่ 20 แผนภาพของเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (โสพส ไกรแสน, 2552)

เมื่อให้ตัวอย่างเริ่มหมุนโดยการเพิ่มไปเรื่อยๆ ด้วยความเร็วที่สามารถควบคุมได้ เช่น 1 องศาต่อนาทีหรือ 2 องศาต่อนาที ตามความต้องการให้ช้าหรือเร็ว ถ้าช้าจะวัดค่าได้ละเอียดมากขึ้น

2.7.1.4 การดูดกลืนรังสีเอกซ์

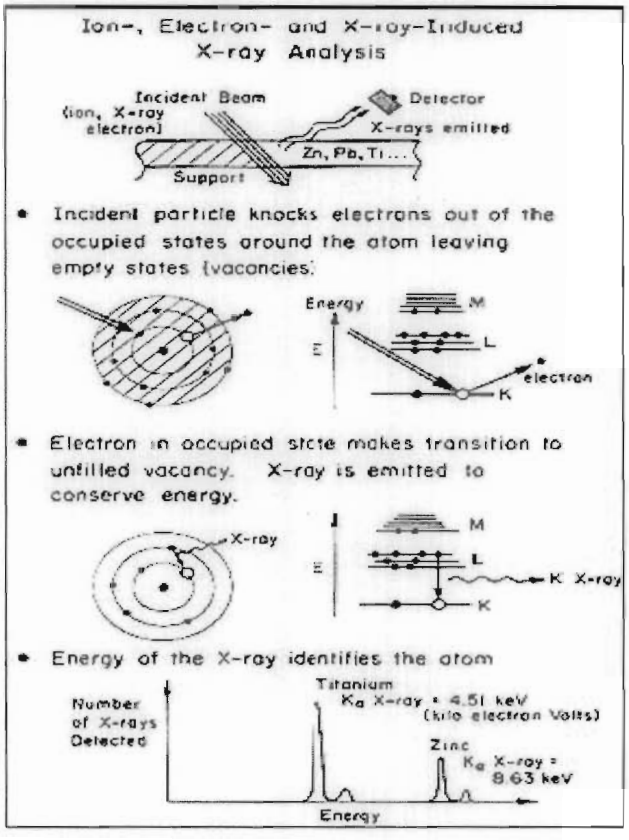
รังสีเอกซ์ที่พุ่งมาสู่วัตถุจะเกิดอันตรกิริยาได้ 2 ลักษณะ คือการดูดกลืนและการกระเจิงการดูดกลืนนั้นจะมีความสำคัญกับการกระตุ้นสารตัวอย่างและมีความสัมพันธ์กับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาส่วนการกระเจิงจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสัญญาณพื้นหลังการดูดกลืนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์

2.7.1.5 การเกิดรังสีเอกซ์มี 2 ลักษณะ คือ

1. การปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray)

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากอนุภาคหรือโฟตอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอะตอมของเป้าจนทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรอะตอมของเป้าหลุดออกจากชั้นวงโคจร จากนั้นจึงเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนชั้นวงนอกที่มีค่าระดับพลังงานสูงกว่าแล้วจึงปล่อยพลังงานส่วนเกินออกในรูปของรังสีเอกซ์เรียกว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัว รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ถูกปล่อยออกมาจะประกอบด้วยอนุกรมของรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวหลายพลังงาน แต่ละพลังงานจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานระหว่างชั้นวงโคจรเดิมกับวงโคจรที่อิเล็กตรอนเข้าแทนที่ และมีค่าเฉพาะในแต่ละธาตุซึ่งอนุกรมของ

รังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแต่ละชั้นวงโคจรจะมีชื่อเรียกตามชั้นวงโคจรที่เกิดช่องว่างและถูกอิเล็กตรอนเข้าแทนที่ เช่นอนุกรมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนชั้นวงโคจรชั้น K จะเรียกว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวอนุกรม K เช่น อิเล็กตรอนจากชั้น L เข้ามาแทนที่ว่างชั้น K เรียกว่า K และอิเล็กตรอนจากชั้น M เข้ามาแทนในที่ว่างชั้น K เรียก K เป็นต้น ในลักษณะเดียวกัน รังสีเอกซ์เฉพาะตัวอนุกรม L และ M เกิดจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้น L และ M

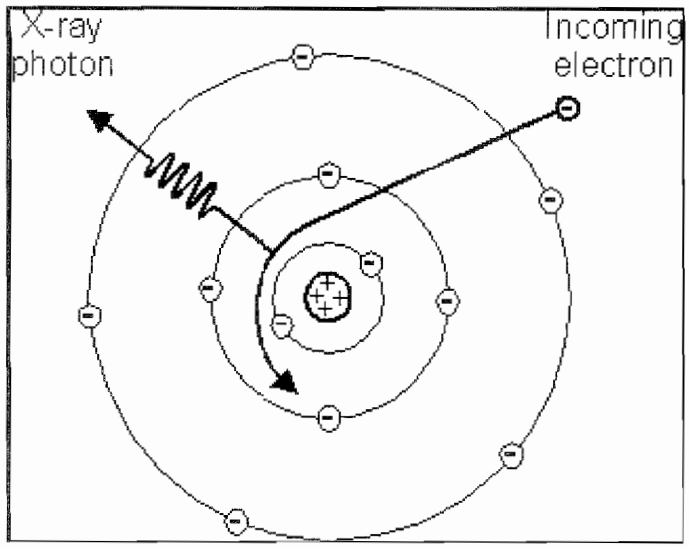


ภาพที่ 21 แสดงการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ (โสพส ไกรแสน, 2552)

2. เบรมส์ตราลุง (Bremsstrahlung)

เบรมส์ตราลุง เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูง (high energy electron) วิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของเป้า ซึ่งนิวเคลียสมีประจุเป็นบวกส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางไป และเกิดการสูญเสียพลังงานปล่อยออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ ซึ่งเรียกว่าเบรมส์ตราลุง จะมีพลังงานได้หลายค่าขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนว่าเคลื่อนที่เข้าใกล้

นิวเคลียสเพียงใดซึ่งจะส่งผลต่อการสูญเสียพลังงาน แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แสดงการเกิดเบรมส์ตราลุง (โสพส ไกรแสน, 2552)

2.7.2 เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence, XRF) จากอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับตัวกลาง ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ผลที่เกิดขึ้นคือ การหลุดออกไปจากชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอน ซึ่งการหลุดออกไปจากชั้นวงโคจรนั้นทำให้เกิดช่องว่างภายในวงโคจร จึงเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวงโคจรถัดไปอิเล็กตรอนจะคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์เรือง(Fluorescence X-ray) หรือรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-rays) การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวอนุกรมใด ๆ นั้น พลังงานของรังสีที่ใช้ในการกระตุ้นต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นวงโคจรนั้น ซึ่งค่าพลังงานอย่างน้อยที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป ต้องมีค่าเท่ากับค่า Binding Energy ของอิเล็กตรอนชั้นนั้น การวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence analysis) เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์ มีชื่อเรียกว่าเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence spectroscopy, XRFS) เป็นเครื่องมือที่นำมาใช้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1913 และมีการพัฒนาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์นั้นมีข้อดีหลายอยู่หลายประการ เช่น สามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกัน การวิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive)

สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย ๆ ได้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลว และเป็นวิธีที่มีความไวสูง สามารถที่จะวิเคราะห์ธาตุมีความเข้มข้นที่อยู่ในระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) นอกจากนี้เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในระยะยาว จัดว่าเทคนิคนี้เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีการวิเคราะห์แบบอื่น ในการวิเคราะห์ธาตุมีข้อมูลที่ต้องการทราบ 2 ประการ คือ

1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์แบบกระจายพลังงานจะสะดวกและรวดเร็วมาก เพราะระบบนี้จะวัดสัญญาณแบบหลายช่อง (multichanal analysis) ทำให้วัดสัญญาณได้ครอบคลุมช่วงกว้าง ๆ ได้ การตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เข้าสู่หัววัดจะกระทำได้พร้อม ๆ กันหลาย ๆ ระดับพลังงาน ครอบคลุมตลอดช่วงพลังงานที่ต้องการ แต่มีข้อเสียที่ขีดจำกัดของการแยกพลังงานซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการซ้อนทับกัน (overlaping) ของพีกที่มีพลังงานใกล้เคียงกัน

ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพแม้จะเป็นตัวอย่างเดียวกันบางครั้งกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดจะไม่เท่ากันและในการวิเคราะห์คุณภาพนี้จะสามารถทราบชนิดของธาตุได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากในเครื่องมือจะมีฐานข้อมูลสเปกตรัมของแต่ละธาตุโดยจะกำหนดไว้ที่พลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะของแต่ละธาตุจึงเป็นการสะดวกในการที่จะทราบว่ามี Scatter รบกวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หรือถ้าไม่มี สเปคตรัมของธาตุจะมีการคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งพลังงานเดิม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ปริมาณ

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นั้นทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกับความเข้มข้นของรังสีเอกซ์เรืองที่กเดขึ้น ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นของธาตุใดธาตุหนึ่งนั้นจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืน และการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของธาตุนั้นและธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่อยู่ในตัวอย่างนั้น

2.7.2.1 วิธีวิเคราะห์โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ที่สำคัญมี 2 วิธี

2.7.2.1.1 Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF) เป็นวิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีแยกความยาวคลื่น โดยผลึกวิธีนี้มีข้อได้เปรียบคือ Resolution สูง แต่มีข้อเสียเปรียบหลายประการ เช่น ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานเนื่องจากต้องหมุนหัววัดรังสีไปตามมุมตั้งแต่ 0 องศาเซลเซียสจนถึง 180 องศาเซลเซียส

2.7.2.1.2 Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) เป็นการวิเคราะห์พลังงานของ X-ray Fluorescence โดยใช้หัววัดรังสีทำหน้าที่วิเคราะห์พลังงาน วิธีนี้มีข้อได้เปรียบ คือรวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่าง แต่ Resolution จะไม่ดีเท่าระบบ WDXRF

2.7.2.2 หัววัด (Detector)

2.7.2.2.1 หัววัดแบบกึ่งตัวนำ

วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะที่นำมาใช้ทำหัววัดแบบนี้คือ ผลึกซิลิกอน (Si) ซึ่งเป็นหมู่ธาตุหมู่ที่ IV หัววัดที่ใช้กับเครื่อง EDXRF นี้จะเคลือบด้วย Li และนำไปอบให้ความร้อนอิเล็กตรอนของธาตุ Li จะสามารถเคลื่อนที่ได้ในผลึกของ Si และจะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา เพื่อยืดอายุการใช้งานของหัววัดทำได้โดยใช้ความเย็นยวดยิ่งจากไนโตรเจนเหลว ทำให้หัววัดนี้จึงจำเป็นต้องมีส่วนหนึ่งแช่อยู่ในถังไนโตรเจนเหลวตลอดเวลาโผล่มาเฉพาะส่วนที่เป็นหัววัดรังสีเท่านั้นและภายในบริเวณหัววัดต้องเป็นสุญญากาศเพื่อลดการสูญเสียความเย็นแก่บรรยากาศ

หัววัด Si(Li) ที่ใช้ในเครื่อง EDXRF นั้นในการใช้งานจะต่อแบบไบอัสกลับภายใต้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 600 โวลต์ ชั้นที่มี Li แทรกอยู่นั้นเป็นบริเวณที่ไวและมีบทบาทในการตรวจวัดรังสีที่ผ่านเข้ามา เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนเกิดเป็น electron-hole pair ภายในผลึก ในการนี้จะมีการดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอกซ์ไปครั้งละ 3.8 eV ต่อการทำให้เกิน electron-hole pair 1 คู่ ส่วนพลังงานที่เหลือของรังสีเอกซ์ก็จะทำให้เกิด electron-hole pair ไปเรื่อย ๆ โดยแต่ละครั้งใช้พลังงานไป 3.8 eV จนกว่าพลังงานจะถูกใช้หมดเป็นการถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่หัววัด ส่วน electron-hole pair ก็เปรียบเสมือนประจุ ลบ-บวก ซึ่งทำให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจากผลึกหัววัดไปสู่ส่วนขยายสัญญาณต่อไป

2.7.2.3 การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ของระบบ EDXRF

ลำรังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดรังสีเอกซ์ จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่าง โดยผ่านแผ่นกรอง ซึ่งจะทำหน้าที่ตัดหรือลดรังสีของช่วงพลังงานอื่นเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์และผ่านช่องรวมแสง ไปยังสารตัวอย่างทำให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุในสารตัวอย่างแล้วเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุขึ้นผ่านช่องรวมแสงเข้าสู่หัววัด Si(Li) เมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดแล้วนั้นแต่ละหน่วยโฟตอนของรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดไอโอไนเซชันและเกิดเป็นประจุเพื่อทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงานของโฟตอนนั้น ไอโอไนเซชันที่เกิดขึ้นภายในผลึก Si(Li) และทำให้เกิดประจุเป็นสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าสู่พรีแอมปริเออร์ ในส่วนพรีแอมปริไฟเออร์จะมีทรานซิสเตอร์แบบ

FET (Field effect transistor) มีหน้าที่ปรับสัญญาณจากหัววัดให้เป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งต่อไปที่หน่วยประมวลผลพัลส์ (pulse processor) เพื่อขยาย (amplify) และปรับรูปร่าง (shapping) สัญญาณให้เหมาะเพื่อเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลขโดยวงจรที่เรียกว่า Analog-to-Digital Converter หรือ ADC ซึ่งจะถูกส่งไปยังหน่วยความจำและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

2.7.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (แม้น อมรสิทธิ์, 2534)

การศึกษาสิ่งซึ่งมีขนาดเล็ก ๆ หรือที่เรียกว่า จุลทรรศน์ (Microscopy) นั้น นับว่าเป็นศาสตร์หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในวิทยาการหลายสาขา ในปัจจุบันเราอาจขยายภาพวัตถุในระดับ 10 เท่า โดยใช้แว่นขยาย ระดับ 10-1,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM, Optical Microscope) และระดับ 10-1,000,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (EM, Electron Microscope)

2.7.3.1 ข้อแตกต่างระหว่าง OM และ SEM

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ต่างเป็นเครื่องมือที่งานด้านวิทยาศาสตร์แทบทุกสาขา จำเป็นต้องมีไว้ใช้งาน แต่ถึงแม้ว่าเครื่องมือทั้งสองจะใช้เพื่อการขยายภาพวัตถุต่าง ๆ เช่นเดียวกัน แต่หลักการทำงานต่างกันอย่างมาก

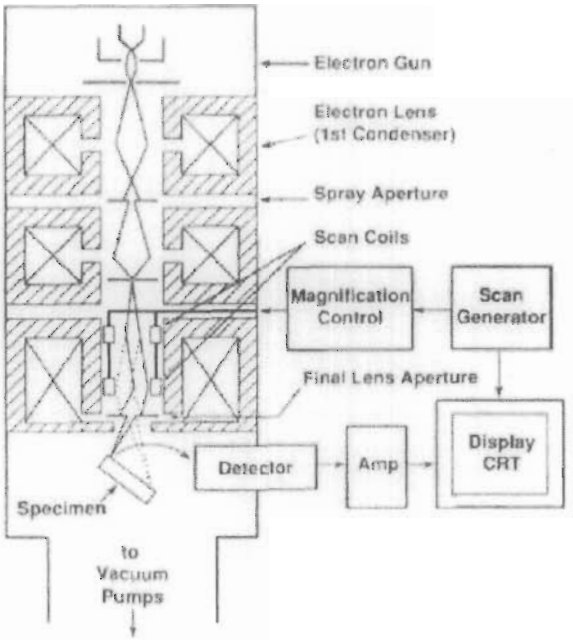
OM นั้น เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานมากกว่า เนื่องจากใช้งานง่าย สามารถศึกษาวัตถุ หรือตัวอย่างในบรรยากาศปกติ หรือในของเหลว เล่นน้ำ หรือน้ำมันได้ ภาพขยายของตัวอย่างที่ได้ จะให้สีจริงตามธรรมชาติ และสามารถขยายภาพของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 10-1,000 เท่า ซึ่งปัจจุบัน สามารถดูภาพผ่านจอทีวี หรือคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้พิมพ์ภาพ หรือเก็บข้อมูลเพื่อใช้ประมวลผล เช่น การวัดขนาดอนุภาคได้สะดวกขึ้น แต่ OM ก็มีข้อจำกัดที่ความชัดลึก (depth of field) ของภาพขยาย ยิ่งกำลังขยายมากขึ้น ระยะชัดลึกยิ่งน้อยลง

SEM มีจุดเด่น คือ มีระยะชัดลึกมากกว่า และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่า OM ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ทั้งสอง ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันเป็นตัวสร้างภาพ OM ใช้คลื่นแสง (แสงที่ตามนุษย์มองเห็น) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ทำให้ OM ไม่สามารถขยายวัตถุที่เล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ ส่วน SEM จะใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับ

เทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลด้านองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้อีกด้วย

2.7.3.2 การทำงานของ SEM

ส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของ SEM แสดงในภาพที่ 23 ส่วนบนสุด เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagtic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอพเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน



ภาพที่ 23 แสดงการทำงานของ SEM (Toya et al., 1986)

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objecttive lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่

โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons< SE) สัญญาณชนิดนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอกซ์เรย์ (X-ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave), โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

2.7.4 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) (Hashimi, 2006)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานที่สุดอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ปกติการทดสอบแรงดึงจะใช้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน แต่ขณะเดียวกันก็สามารถใช้ชิ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปได้แก่ ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (elastic limit) ร้อยละการยืด (percent elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น(modulus of elasticity) ขีดจำกัดแบบสัดส่วน (proportional limit) ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด(percent reduction in area) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) จุดจำนน (yield point) และความแข็งแรงจำนน (yield strength) เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการทดสอบแรงดึงแบบพิเศษคือการทดสอบการคราก (creep test) เป็นต้น

กระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM มีดังต่อไปนี้ E8 สำหรับวัสดุโลหะ D638 สำหรับวัสดุพลาสติก D2343 สำหรับวัสดุไฟเบอร์ D897 สำหรับวัสดุกาว D987 สำหรับวัสดุกระดาษ และ D412 สำหรับวัสดุยาง

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงชิ้นทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ในสภาวะการยืดและเป็นกระบวนที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลง

รูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำ การตรวจวัดการเสียรูปจะวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้น นั้นคือการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยความยาวระยะทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงปกติเท่ากับ 2 นิ้ว

2.7.4.1 การเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร

เมื่อชิ้นทดสอบโลหะได้รับแรงดึงในแกนเดียวจะเกิดการเสียรูปขึ้น และถ้าชิ้นทดสอบโลหะสามารถคืนกลับไปสู่ขนาดเริ่มต้นเมื่อนำแรงที่กระทำออกไป นั้นคือโลหะมีการเสียรูปแบบคืนตัว (elastic deformation) ขนาดของการเสียรูปแบบคืนตัวของโลหะจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัว อะตอมของโลหะจะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมในปริมาณที่ไม่มาก ดังนั้นเมื่อเอาแรงที่กระทำออกไปโลหะที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัว อะตอมของโลหะจะเคลื่อนกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้โลหะกลับไปสู่รูปทรงเดิม ถ้าโลหะเกิดการเสียรูปเป็นจำนวนมากจนมันไม่สามารถกลับไปสู่รูปทรงเดิมได้อย่างสมบูรณ์ แสดงว่าโลหะเกิดการเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation)

2.7.4.2 แรงเค้นและความเครียด

แรงเค้น (stress) ในการทดสอบแรงดึง น้ำหนักดึงจะแทนด้วยสัญลักษณ์ F ในหน่วยของปอนด์กิโลกรัม หรือ นิวตัน ความแข็งแรงดึงคิดเป็นน้ำหนักที่ชิ้นทดสอบสามารถทนได้ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด น้ำหนักเทียบกับพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางหน่วยเรียกว่าแรงเค้น (stress, σ) โดยแรงเค้นจะมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in.^{2}) หรือพาสคาล (Pa) ในหน่วยเมทริกน้ำหนักจะบันทึกเป็นกิโลกรัมแล้วแปลงเป็นนิวตัน ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะคิดเป็นตารางเมตรซึ่งจะได้หน่วยของแรงเค้นเป็นนิวตันต่อต่อตารางเมตรหรือพาสคาล (Pa) โดย 1 MPa เท่ากับ 145 lb/in.^{2} และ 1000 lb/in.^{2} เท่ากับ 6.985 MPa

ความเครียด (strain) เมื่อแท่งโลหะได้รับแรงดึงในทางเดียวเป็นเหตุให้แท่งโลหะเกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้น การเคลื่อนที่นี้เรียกว่าความเครียด โดยนิยามความเครียดเป็นการยืดอันเนื่องจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ดังนั้นก่อนทำการทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ โดยระยะทดสอบเริ่มต้นจะทำเป็นเครื่องหมายสองจุดบนชิ้นทดสอบ อุปกรณ์วัดการยืดหรือความเครียดจะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้นทดสอบในระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืด (elongation) หน่วยของระยะยืดใช้เป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร และถ้านำค่า

ระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่าความเครียด โดยลักษณะเครื่องมือทดสอบแรงดึงและอุปกรณ์วัดระยะยืด และดังแสดงในภาพที่ 24

ภาพที่ 24 ลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึงและอุปกรณ์วัดระยะยืด (Hashimi, 2006)

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nampoothiri et al. (2010) แนวความคิดของพลาสติกย่อยสลายได้ คือ ไม่ตกค้างในดิน ใช้วัตถุดิบธรรมชาติที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทดแทนการผลิตพลาสติกแบบดั้งเดิมที่ใช้ปิโตรเลียม (Petroleum-based tradition plastics) ในบรรดาพลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่นำมาใช้ พอลิแลคติก (ซึ่งเป็น green' eco friendly material) ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น บรรจุภัณฑ์ยา ชิ้นส่วนทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร และกระดาษเคลือบ บรรจุภัณฑ์สำหรับเคมีเกษตร และถุงย่อยสลายได้ เป็นต้น

European bioplastics (2010) ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพมีอัตราการใช้มากในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ดังนี้ **1)** ถุงขยะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Compostable waste bags) มีประโยชน์ในการช่วยลดปัญหาการฝังกลบขยะพลาสติก **2)** พลาสติกคลุมดินแบบย่อยสลายได้ (Biodegradable mulch film) **3)** ผลิตภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร (Catering products) เหมาะสำหรับงานจัดเลี้ยงสังสรรค์ เป็นพวกที่ใช้แล้วทิ้งไป เช่น ถาดใส่อาหาร แก้วจาน และถุงพลาสติก เป็นต้น **4)** บรรจุภัณฑ์ประเภทขวดน้ำ ซึ่งทำจากพลาสติกกลุ่มพอลิแลคติกแอซิดที่ใช้สำหรับบรรจุเครื่องดื่มที่ไม่ผสมโซดา และผลิตภัณฑ์นมต่าง ๆ **5)** บรรจุภัณฑ์พลาสติก

ชนิดฟิล์ม (Film packaging) ใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร เช่น ซองบรรจุอาหาร ตาข่าย และถาดสำหรับใส่เนื้อสัตว์ ผัก และผลไม้ เป็นต้น พอลิแลคติกแอซิดสามารถผสมกับวัตถุดิบอื่น ๆ ได้หลากหลาย เช่น พอลีเอทธิลีนออกไซด์ (Nijenhuis et al., 1996) พอลิเอทธิลีนไกลคอล (Sheth et al., 1997) ไคโตซาน (Se´bastien et al., 2006) เป็นต้น

Jurmkwan et al. (2008a, 2008b) มีการนำไคโตซานมาผสมกับวัตถุดิบธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ คือ ฟิล์มไคโตซานที่ผสมกับเมทิลเซลลูโลสและเติมวานิลินซึ่งเป็นสารต้านจุลินทรีย์และพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ลงไปในส่วนผสมของฟิล์ม พบว่าฟิล์มสามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำ และเมื่อนำมาใช้กับแคนตาลูป และสับปะรดหั่นชิ้นพร้อมบริโภค สามารถยับยั้งการเจริญของ*Escherichia coli* ได้ ซึ่งคุณสมบัติที่พึงประสงค์ของฟิล์มย่อยสลายได้ คือ การกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซ ลักษณะปรากฏที่ใส มีคุณสมบัติทางกลที่ดี และไม่เป็นพิษต่อผู้บริโภค

Caner et al. (1998) ศึกษาผลของกรดต่างชนิดกัน คือ กรดอะซิตริก กรดฟอร์มิก กรดแลคติก และกรดโพลพีโอนิก ต่อความสามารถในการละลายไคโตซาน พบว่ากรดอะซิตริกเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการผลิตฟิล์มและมีคุณสมบัติในการกั้นน้ำรวมไปถึงคุณสมบัติทางกลที่ดี และยังพบว่าการยืดตัวของฟิล์มจะลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา

Srinivasa et al. (2004) พบว่าผลของการอบแห้งต่อคุณสมบัติของไคโตซาน การใช้ลมร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงและโปร่งใสกว่าการใช้เตาอบแห้ง อย่างไรก็ตามเตาอบแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติในการกั้น ออกซิเจนและน้ำสูงและมีลักษณะผลึกที่ดี

Gontard et al. (1993) ได้ศึกษาผลกระทบของกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่รับประทานได้จากข้าวสาลีพบว่า กลีเซอรอลช่วยในการยืดตัวของฟิล์มทำให้เปอร์เซนต์การยืดตัวและการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น แต่จะลดความทนแรงทิ่มทะ

Shaw et al. (2002) ได้ศึกษาผลกระทบของกลีเซอรอล, ไซลิทอล และซอร์บิทอล ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่รับประทานได้พบว่า การเพิ่มกลีเซอรอล หรือซอร์บิทอลให้การซึมผ่านไอของน้ำและยืดตัวเพิ่มขึ้น แต่ค่าความทนแรงดึง มอดูลัส และอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของฟิล์ม (glass transition Temperature,T_g) ลดลง แต่การเพิ่มไซลิทอลจะไม่มีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำ และค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของฟิล์ม แต่จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ความทนแรงดึง มอดูลัสของฟิล์มลดลง

Kim et al. (2002) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว) การซึมผ่านไอของน้ำ และการละลายของฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งที่มีคาร์บอกซิลิกสูง โดยใช้พลาสติไซเซอร์คือ ซอร์บิทอล ไซลิทอล แมนนิทอล และกลีเซอรอล พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นซอร์บิทอล ไซลิทอล แมนนิทอล ทำให้ความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ ไซลิทอล แมนนิทอล และกลีเซอรอล ทำให้ค่าการซึมผ่านของไอของน้ำลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ทำให้ค่าการละลายของฟิล์มลดลง

Rasa et al. (2010) ได้ศึกษาแล้วพบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีข้อจำกัดคือ มีความทนทานต่ำ เปราะมาก มีค่าความยืดหยุ่นต่ำมาก ไม่เหมาะสำหรับแรงเค้นสูง ๆ และพอลิแลคติกแอซิดยังมีราคาสูง

Ning et al. (2008) ได้เสนอว่าแป้งมีสมบัติที่ดีในการเป็นสารเพิ่มเนื้อให้กับพอลิแลคติกแอซิด คือเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่การผสมกันระหว่างแป้งซึ่งมีโครงสร้างเป็นไฮโดรฟิลิก กับพอลิแลคติกแอซิดซึ่งมีโครงสร้างเป็นไฮโดรโฟบิก จึงไม่สามารถเข้ากันได้ดีนั้นจะทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ไม่เป็น เนื้อเดียวกัน

Mitomo (2005) ได้เสนอไว้ว่าพอลิแลคติกแอซิดเป็นไบโอพลาสติกชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ของกรดแลคติก ซึ่งได้มาจากการหมักของแป้งข้าวโพด โดยได้คาดหวังให้มาทดแทน พอลิเมอร์แบบสังเคราะห์ในอนาคตอันใกล้ พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติเด่นคือมีจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะโปร่งใส เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นภาชนะสำหรับใส่อาหาร น้ำ ยา และเครื่องสำอาง แต่พอลิแลคติกแอซิด มีข้อจำกัด สำหรับการนำไปใช้งาน คือ มีราคาสูง และมีสมบัติบางประการที่ยังไม่สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น เปราะ และแตกง่าย

Wan and Prasad (1990) ได้ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลต่ออัตราการพองตัวของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส ซึ่งพบว่า อัตราการพองตัวของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสในน้ำลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลของเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ทำให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลสูงขึ้นและเกิดเป็นเจลที่บริเวณผิวของฟิล์ม โมเลกุลน้ำจึงเข้าล้อมรอบโมเลกุลเมทิลเซลลูโลสที่อยู่ภายในยากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการพองตัวของฟิล์มทั้งหมดลดลง