

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [1-3]

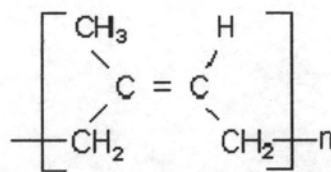
ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ทางการค้าได้จากต้นยางพารา ที่มีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า '*hevea brazilliensis*' ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จะได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% ที่เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่หากนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็กรี๊ดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จะได้ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet)

##### 2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีองค์ประกอบทางเคมีเป็น *cis*-1,4-polyisoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และเฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบ อสั่งฐาน (amorphous) แต่ในบางภาวะเช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน โดยยางมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ -26 องศาเซลเซียส การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นจะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ส่วนการเกิด

ผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) จะพบเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า

การเกิดผลึกนี้ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสงไปเป็นทึบแสง นอกจากนี้ ยังทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางมีความต้านแรงดึง (tensile strength) ความต้านการฉีกขาด (tear strength) และความต้านทานการขัดสี (abrasion resistance) สูงขึ้น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ

### 2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

**ความยืดหยุ่น (elasticity) :** ความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะคืนกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

**ความเหนียวติดกัน (tack) :** ยางธรรมชาติที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติด้านความเหนียวติดกันดีเยี่ยม ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการทำผลิตภัณฑ์ ที่ต้องการประกอบขึ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์

**ความต้านแรงดึง (tensile strength) :** เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความต้านแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใส่สารเสริมแรง (~ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) อย่างไรก็ตาม การใส่สารเสริมแรงจะช่วยให้มีค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น

**ความต้านแรงฉีกขาด (tear strength) :** เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้เมื่อถูกดึงยืด ดังนั้น จึงมีความต้านการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การใส่สารเสริมแรงจะช่วยให้มีค่าความต้านแรงฉีกขาดสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) : ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) สูงมาก

ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) : ยางธรรมชาติมีความต้านทานการขัดถูสูง แต่น้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์อื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) : ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าดีเยี่ยม โดยมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง  $10^{15}$  หรือ  $10^{16}$  ohm.cm

ความต้านทานของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) : เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกซีน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลง ถ้ายางเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงข้ามของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย โดยจะเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้ ซึ่งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่ยางธรรมชาติมีความต้านทานของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซีโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยังทนกรดและด่างเจือจางได้ดี หากแต่ไม่ทนกรดในترك และกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (ageing properties) : เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีพันธะคู่อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ยางไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีแสงหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกดึงยืดและได้รับโอโซนเป็นเวลานานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ดังนั้น ในระหว่างการผลิตจึงต้องเติมสารบางชนิด ได้แก่ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants) และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) : ยางธรรมชาติรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัติดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิด คือ ยางบิวตะไดอิน และยางซิลิโคน

การคงรูปจากการกดอัด (Compression set) : ยางธรรมชาติมีการคงรูปจากการกดอัด ค่อนข้างต่ำ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง ค่าการคงรูปจากการกดอัดที่อุณหภูมิต่ำจะสูงขึ้น

เนื่องจากยางเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเสียไป ขณะที่ค่าการคงรูปจากการกดอัดที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลให้สมบัติการคงรูปจากการกดอัด ลดลง

การกระดอน (rebound resilience) : ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยางบิวตะไดอีน) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานความร้อนน้อย (มี hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงอาจทำให้ยางระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature) : ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิ -55 ถึง 70 องศาเซลเซียส แต่หากเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้น และสูญเสียความยืดหยุ่น หรือถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินไป สมบัติเชิงกลจะลดลง เนื่องจากความร้อนทำให้ยางเสื่อมสภาพ และถ้าออกสูตρυางผสมสารเคมีได้เหมาะสม (ใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพ) ก็อาจนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส หรืออาจสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น

### 2.1.3 การใช้งานของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลัก คือ ไม่ทนความร้อน สภาพอากาศน้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทยังใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

1. ยางธรรมชาติมีความต้านแรงดึงดีเยี่ยม ถึงแม้ไม่ได้ใส่สารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะใช้ทำผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง และมีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะใช้ทำผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน ฝ่ายยาง ยางกันกระแทกท่าเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น
3. ยางธรรมชาติ มีความต้านการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับทำกระเป๋าน้ำร้อนยาง เนื่องจากการแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบ ในระหว่าง



กระบวนการผลิต ต้องดึงชิ้นงานออกจากแม่แบบในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีความต้านการฉีกขาดขณะร้อนสูง

#### 2.1.4 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีสีขาวข้นคล้ายน้ำนม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 น้ำยางที่กรี๊ดได้จะมีปริมาณน้ำมากเกินไป ยังไม่เหมาะจะนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ จึงต้องนำไปทำให้เป็นน้ำยางข้นเสียก่อน ซึ่งการทำน้ำยางข้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuging machine) เพื่อเพิ่มปริมาณยางแห้งในน้ำยางจาก 30% เป็น 60% โดยน้ำหนัก แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน และฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้เป็นแก๊สชนิดต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงเกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็น จึงต้องเติมสารละลายแอมโมเนียลงไปหรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารอื่นๆ เพื่อรักษาสภาพน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียวยังต้องใช้แอมโมเนียสูงถึง 0.7% ซึ่งน้ำยางชนิดนี้ เรียกว่า High Ammonia Latex หรือ HA latex ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเล็กน้อยเพียง 0.2% จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือกรดบอริก 0.2% หรือแซนโตไบรท์ (santobrite) 0.2% เป็นต้น ซึ่งน้ำยางชนิดนี้ เรียกว่า Low Ammonia Latex หรือ LA latex

น้ำยางข้นส่วนหนึ่งถูกส่งออกจำหน่ายยังต่างประเทศ ส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถกำจัดน้ำออกได้ง่าย โดยผลิตภัณฑ์ต้องบางหรือมีรูพรุนเพื่อให้น้ำระเหยออกได้ง่ายตามรูพรุนเหล่านั้น ได้แก่ ถุงมือยาง ลูกโป่ง จุกนม ที่นอนฟองน้ำ และหมอนฟองน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 น้ำยางธรรมชาติ

### 2.1.5 ข้อดีและข้อเสียของน้ำยางข้น [4]

#### ข้อดีของน้ำยางข้น

- ผลิตภัณฑ์บางลักษณะไม่สามารถขึ้นรูปได้จากยางแห้งหรือสารละลายยาง แต่จะขึ้นรูปได้ง่ายและสะดวกเมื่อนำน้ำยางข้น เช่น ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตด้วยเทคนิคการจุ่ม (dipping process)
- น้ำยางข้นเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ จึงสามารถผสมกับสารเติมแต่งของยางได้ง่าย สามารถใช้สารเติมแต่งในรูปของเหลว และใช้พลังงานในการผสมต่ำ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องผสมราคาแพงที่มีขนาดใหญ่เหมือนการขึ้นรูปยางแห้ง
- ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้นมีสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากน้ำยางข้นมีความหนืดต่ำ ใช้เวลาในการผลิตน้อย เพราะไม่ต้องทำการบดย่อย (mastication) ให้ยางนิ่มตัวก่อนทำการผสมเหมือนยางแห้ง ซึ่งการบดย่อยมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออก หรือน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำใหยางมีสมบัติเชิงกลต่ำลง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของยางมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ยางในน้ำยางข้นมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเกิดการพันกันของสายโซ่ (chain entanglement) ทำใหยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด เป็นต้น
- มีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่าใช้สารละลายยางหรือยางแห้ง เนื่องจากน้ำยางข้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงไม่ติดไฟได้ง่าย

### ข้อเสียของน้ำยางข้น

- น้ำยางข้นไม่เหมาะกับการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก เนื่องจากในน้ำยางจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (มีน้ำประมาณ 40% และมีเนื้อยาง 60%) ถ้าทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาจะหุดตัวมากเมื่อวางแห้ง ทำให้เสียรูปหรือไม่คงขนาด

- กระบวนการผลิตจากน้ำยางข้นต้องดูแลการผลิตที่พิถีพิถันมากกว่ายางแห้ง เนื่องจากน้ำยางข้นมีเสถียรภาพต่ำ อาจเกิดการจับตัวแยกวัฏภาค หรือตกตะกอนเสียสภาพได้ถ้าขาดการควบคุมการผลิต เช่น สูตรผสม ลักษณะของสารตัวเติม และความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นต้น

#### 2.1.6 การเตรียมสารกระจายในน้ำ (ดิสเพอร์สชัน)

สารเคมีทุกชนิดที่ใช้กับน้ำยาง จะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของผงที่ละเอียดกระจายในน้ำหรือดิสเพอร์สชัน (dispersion) เสียก่อน และถ้าสารเคมีนั้นเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ จะทำเป็นดิสเพอร์สชันได้โดยการผสมในหม้อบด (ball mill) ซึ่งภายในหม้อบดบรรจุลูกหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน คือ ประมาณ  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  และ 1 นิ้ว ตัวอย่างสูตรการเตรียมดิสเพอร์สชัน 50% ได้แก่

|                    |    |      |
|--------------------|----|------|
| สารที่เป็นของแข็ง  | 50 | กรัม |
| สารช่วยกระจาย      | 1  | กรัม |
| สารปรับความเป็นเบส | 1  | กรัม |
| น้ำ                | 48 | กรัม |

โดยบรรจุสารเหล่านี้ในหม้อบดที่ใส่ลูกหินไว้ประมาณครึ่งหม้อ ทำการบดสารเคมีในหม้อบดเป็นเวลา 28-48 ชั่วโมง (ยกเว้นกำมะถัน เนื่องจากแตกละเอียดยากจึงต้องใช้เวลาบดประมาณ 72 ชั่วโมง) จึงจะได้สารเคมีที่มีขนาดผงละเอียดที่สามารถผสมกับน้ำยางได้ดี

#### 2.2 แป้งมันสำปะหลัง [3,5-7]

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) มีอยู่ในพืชแทบทุกชนิด ซึ่งพืชสังเคราะห์และเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ที่บริเวณราก เมล็ด และผลของพืชในรูปเม็ดแป้ง แป้งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 กรัม/ลบ.ซม. เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือเป็นแท่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-1,000 ไมโครเมตร

### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรโมเลกุลเป็น  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรต หน่วยกลูโคสในสายโซ่สามารถแสดงได้เป็นหน่วยของกลูโคสที่ปราศจากน้ำ (anhydroglucose unit) น้ำในโมเลกุลของกลูโคสนั้นหายไปขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้น (step polymerization) พันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วยในโมเลกุลของแป้ง เรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งพันธะนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรด

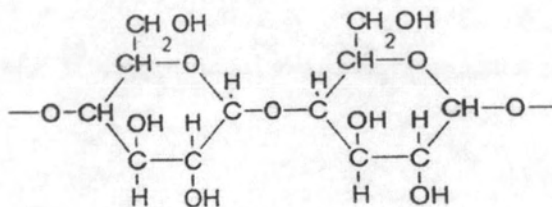
แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) คือ แป้งที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง ประกอบด้วย เม็ดแป้ง 2-8 เม็ด รวมตัวกัน แต่ละเม็ดมีความยาว 5-35 ไมครอน เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมนด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านแบนไม่สม่ำเสมอ เม็ดแป้งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจน และบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลส 18% และ อะไมโลเพกติน 82% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโล-เพกตินมีค่าประมาณ  $2.10 \times 10^5$  และ  $3.0 \times 10^6$  ตามลำดับ

### 2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ

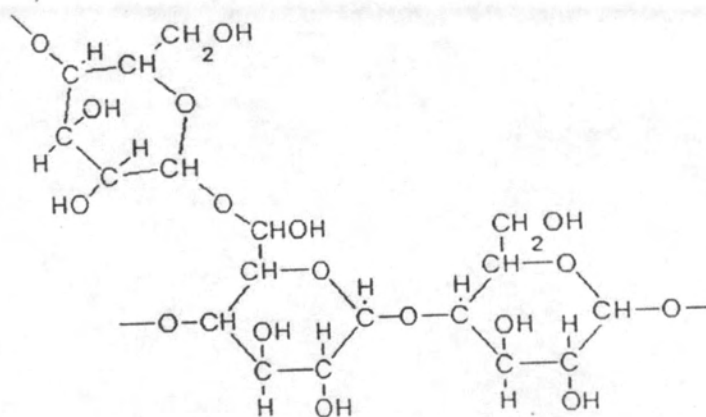
**อะไมโลส (amylose):** เป็นพอลิแซคคาไรด์แบบโซ่ตรง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง  $\alpha$  1,4-glucosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีสมบัติชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ดังนั้น อะไมโลส สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ดี การจัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบและไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะไมโลสจะละลายออกจากเม็ดแป้ง และเมื่อเย็นลงโมเลกุลของอะไมโลสจะรวมตัวกัน กรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งต่ำ อะไมโลส จะตกตะกอน (precipitation) แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูง โมเลกุลของอะไมโลสจะรวมตัวกันทำให้เกิดเจล (gelation) เมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินในแป้งมีอะไมโลสประมาณ 20-25%





รูปที่ 2.3 โครงสร้างอะไมโลส[3]

**อะไมโลเพกติน (amylopectin)** : เป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบโซ่กิ่ง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง  $\alpha$  1,4-glycosidic linkage ส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างสายโซ่หลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ  $\alpha$  1,6-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.4 อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าอะไมโลส ~ 1,000 เท่า มีการจัดเรียงโมเลกุลไม่เป็นระเบียบและว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งที่มีอะไมโลเพกตินสูง แป้งสุกมีลักษณะใส เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีลักษณะใหญ่และมีกิ่งก้านมาก ทำให้การจับกันของโมเลกุล อะไมโลเพกตินมีโอกาสน้อย โดยทั่วไปอะไมโลเพกตินจะไม่ละลายน้ำ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย  $\geq 1,000,000$  เมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีม่วงแดง ในแป้งมีอะไมโลเพกตินประมาณ 75-80%



รูปที่ 2.4 โครงสร้างอะไมโลเพกติน[3]

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะและสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

| อะไมโลส  | อะไมโลเพกติน   |
|--|--|
| 1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยกลูโคส 200-1,200 หน่วย | 1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันและมีกิ่งก้านสาขาแต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย |
| 2. ละลายน้ำได้ดี   | 2. ละลายน้ำได้น้อย   |
| 3. เมื่อต้มในน้ำจะข้นหนืดน้อยและขุ่น   | 3. เมื่อต้มในน้ำจะข้นหนืดมากและใส  |
| 4. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน  | 4. ให้สีม่วงแดงกับสารละลายไอโอดีน  |
| 5. ต้มแล้วทิ้งไว้จับตัวเป็นก้อน  | 5. ต้มแล้วทิ้งไว้ไม่จับตัวเป็นก้อน   |
| 6. จัดเรียงตัวเป็นผลึก   | 6. จัดเรียงตัวเป็นอสัณฐาน  |

### 2.2.3 สมบัติของแป้ง

สมบัติโดยทั่วไปของแป้ง คือ ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ดูดน้ำไว้ 25-30% การจัดเรียงโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งจะมีทั้งส่วนที่เป็นระเบียบ และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการจัดเรียงโมเลกุลในส่วนที่เป็นระเบียบคลายความหนาแน่นลง เป็นผลให้โมเลกุลของแป้งสามารถรับน้ำได้มากขึ้น แป้งจะพองตัวมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งสูงกว่าจุดพองตัวของแป้ง แป้งจะแตกตัว ทำให้ละลายน้ำได้

สมบัติที่สำคัญมากที่สุดของแป้ง คือ การเกิดความหนืดเมื่อรวมตัวกับน้ำ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ในแป้ง กล่าวคือ นำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของแป้งในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวไม่มีระเบียบ ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส แป้งจะเกิดการพองตัว อุณหภูมิช่วงนี้เรียกว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature) ที่อุณหภูมินี้ โมเลกุลของแป้งในส่วนที่เป็นระเบียบจะคลายตัวลง เกิดการดูดน้ำได้เป็นสารละลายแป้งที่มีความหนืดและใสขึ้น ความหนืดของแป้งเป็นผลมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืด

## 2.3 แร่ดินเหนียว (Clay minerals) [8]

แร่ดินเหนียวเกิดจากการผุพังของหิน โดยมีขนาดอนุภาคระดับไมครอน มีธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างของแร่ดินเหนียว หรือ สารประกอบแอนไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกต (anhydrous aluminosilicate) มีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมินา (alumina) และ ซิลิกา (silica) โดยระหว่างชั้นมีไอออนบวกของโลหะ เช่น โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) หรือเหล็ก (Fe) เป็นต้น แทรกอยู่ จากการมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกแร่ดินเหนียวออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. Kaolinite มีสูตรเคมีทั่วไป คือ  $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  และมีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเรียงสลับกับชั้นของอะลูมินา
2. Illite เป็นแร่ดินชนิด 2:1 ในหน่วยโครงสร้างมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอะลูมินาและในแต่ละหน่วยมีไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินในกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้
3. Smectite โครงสร้างเป็นชนิด 2:1 เหมือนกลุ่มอิลไลต์ แต่ในชั้นโครงสร้างมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ และไอออนบวกที่พบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และโซเดียม แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดี
4. Vermiculite มีโครงสร้างเหมือน smectite แต่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า เมื่อเผาแล้วอนุภาคมีลักษณะคล้ายตัวหนอน
5. Palygorskite มีโครงสร้างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่

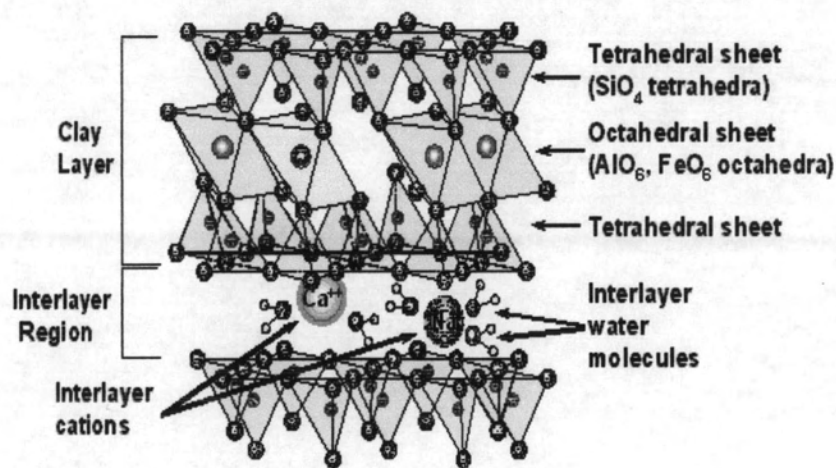
แร่ดินเหนียวที่นิยมนำมาใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม kaolinite และกลุ่ม smectite โดยกลุ่ม kaolinite นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น กระเบื้อง ถ้วยชาม และเครื่องสุขภัณฑ์ เป็นต้น สำหรับกลุ่ม smectite ที่รู้จักดี ได้แก่ เบนโทไนต์ (bentonite) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระดาษ หรือใช้เป็นโคลนขุดเจาะ (drilling mud) และเป็นสารหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์พยายามพัฒนาสมบัติแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้เพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้งานให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการปรับสภาพพื้นผิวของดินให้ชอบสารอินทรีย์ หรือที่เรียกว่า organophillic clay ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ใช้เป็นสารปรับความหนืดในสี หมึกพิมพ์ และจาระบี เป็นต้น

แร่ดินเหนียวที่นำไปสู่นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) และนาโนคอมโพสิต (nanocomposites) เป็นแร่ที่มีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกแผ่นเป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้

มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ

### 2.3.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [9]

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่กลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกตที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้เตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต โดยมีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไป คือ  $M_x(\text{Al}_{4-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  ซึ่งโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นหรือเป็นแผ่นซ้อนกันแบบ 2:1 กล่าวคือ ประกอบด้วยชั้นของซิลิกา 2 ชั้น และมีชั้นของอะลูมินา 1 ชั้น แทรกอยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยแต่ละชั้นมีความบางมาก มีความหนาประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร แต่มีความยาวประมาณ 1,000 เท่า ทำให้มีค่า aspect ratio สูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ ช่องว่างระหว่างชั้น เรียกว่า gallery พื้นผิวของชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตมีประจุลบ จึงยึดเกาะกันด้วยประจุบวกของโลหะไอออน เช่น โซเดียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น



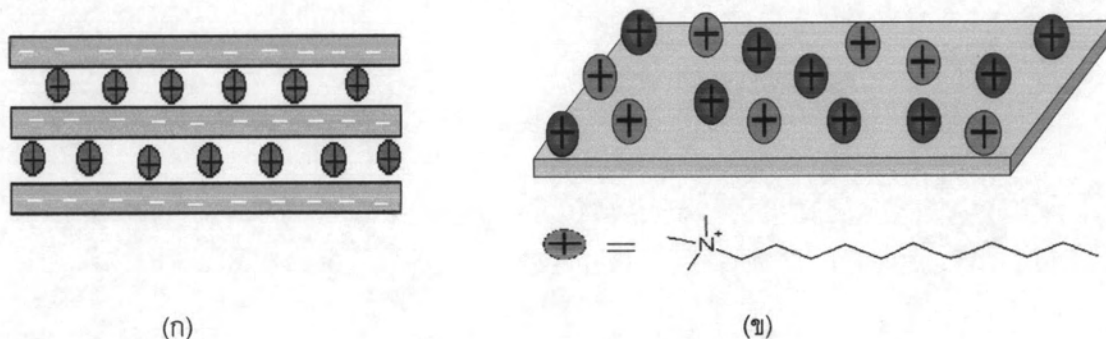
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์

### 2.3.2 ออร์กาโนเคลย์ (organoclay)

จากการที่มอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งมีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์ โดยการแทนที่ประจุต่างๆ (รูปที่ 2.6) ด้วยประจุของสารอินทรีย์ จะทำให้ได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า โมดิฟายด์เคลย์ (modified clay) หรือออร์กาโนฟิลลิกเคลย์ (organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆว่า ออร์กาโนเคลย์ (organoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ มีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ เมื่อเกิดการ



ขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึก ทำให้ชั้นผลึกห่างกัน เกะก้างอย่างหลวมๆ เป็นอนุภาคขนาดนาโนเมตรของซิลิเกต (เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร) ที่มี aspect ratio (สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา) สูงมาก



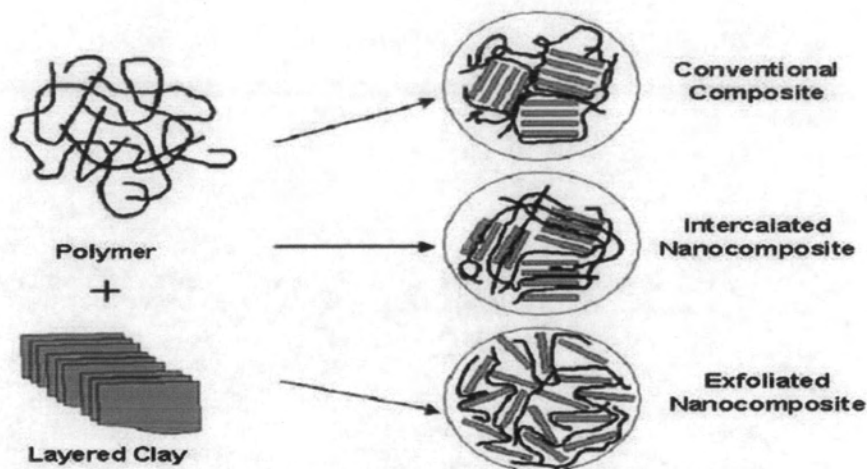
รูปที่ 2.6 (ก) แร่ดินเหนียว และ (ข) ออร์กาโนเคลย์[10]

#### 2.4 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites)

นาโนคอมพอสิตเป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่ช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตแบบทั่วไป ทั้งในด้านความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานต่อสารเคมี สมบัติการสกัดกั้น (barrier properties) และความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น นาโนคอมพอสิตที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างหลากหลายในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เป็นวัสดุที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยการเติมสารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ เพราะจะเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงให้มากยิ่งขึ้น

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้พัฒนาสำเร็จสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D laboratory [9] โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposite) เนื่องจากเมื่อได้ผสมพอลิเมอร์กับ organoclay แล้วทำให้ชั้นซิลิเกตขยายห่างออกจากกัน จึงเรียกว่า พอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต (polymer-clay nanocomposites) ซึ่งการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์แบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์ [11]

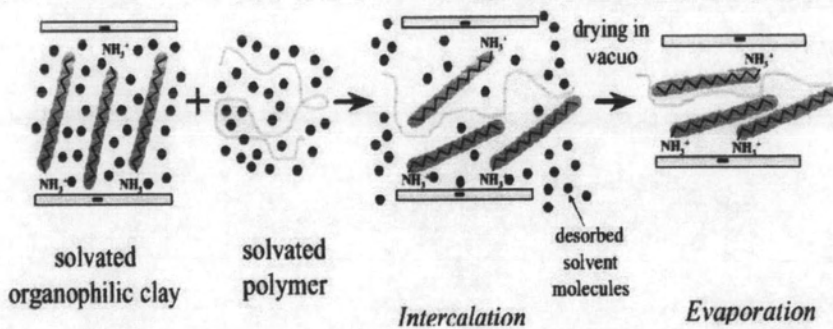
จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์-เคลย์สามารถเกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตได้ 3 แบบ ดังนี้

1. **คอมพอสิตแบบทั่วไป** (conventional composites) : อนุภาคของเคลย์จะเกาะกันเป็นกลุ่ม พอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. **Intercalated nanocomposites** : เคลย์จะเกาะกันเป็นกลุ่มแต่ระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวโดยที่สายโซ่พอลิเมอร์จะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์
3. **Exfoliated nanocomposites** หรือ **delaminated nanocomposites** : ชั้นของเคลย์จะกระจายออกจากกัน โดยไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน C ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง และมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี

#### 2.4.1 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

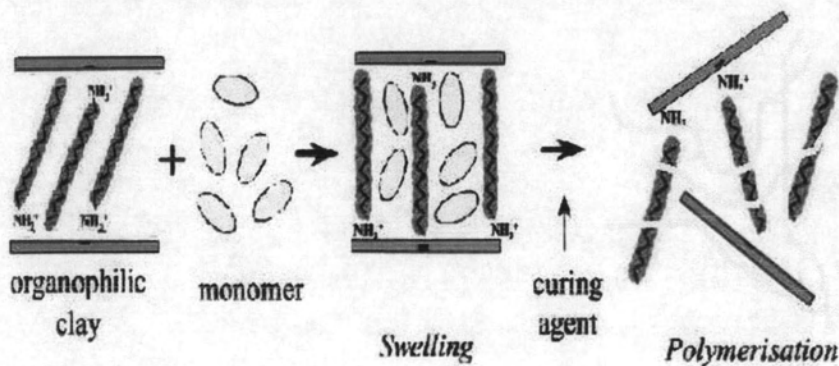
การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิตในปัจจุบันมี 3 วิธี คือ

1. **Solution intercalation** : โดยสารละลายพอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



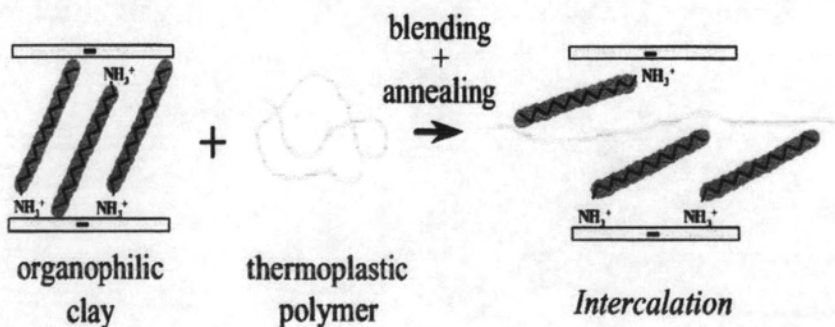
รูปที่ 2.8 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี solution intercalation [12]

2. In situ polymerization : โดยการแทรกมอนอเมอร์เข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ แล้วจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี in situ polymerization [12]

3. Melt intercalation : โดยการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแทรกเข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี melt intercalation [12]

#### 2.4.2 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [10]

1. มีความใส เพราะอนุภาคนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
2. มีความแข็งแรง มอดุลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต
3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊ส เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์มีพื้นที่ผิวและมี aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของแก๊สเพิ่มมากขึ้น
4. ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับรวดเร็ว
5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรือนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดุดมากขึ้น

#### 2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ [5]

พอลิเมอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส แป้ง และโปรตีน เป็นพอลิเมอร์ที่สิ่งมีชีวิตเช่นจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ แต่พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่ไม่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ เนื่องจากสารสังเคราะห์เหล่านี้เพิ่งเกิดขึ้นมาไม่นานมานี้ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยังไม่นานพอที่สิ่งมีชีวิตจะเกิดวิวัฒนาการเพื่อให้ความสามารถในการย่อยสลายได้ ดังนั้น การเพิ่มความสามารถของการถูกย่อยสลายให้มากขึ้นที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

1. การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) แทนพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การใช้เซลโลเฟน (cellophane) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลสแทนพอลิเอทิลีนในการห่อสิ่งของ แต่เซลโลเฟนยังขาดสมบัติบางอย่าง เช่น สมบัติในการกันและเก็บความชื้น ความสามารถเชื่อมให้ติดกันด้วยความร้อน มีความแข็งแรงต่ำ และมีอายุการใช้งานสั้น
2. สังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งมีหลายชนิดเช่น acrolein-acrylic acid polymers, polyamidotriazoles, polyphosphazenes พอลิเมอร์เหล่านี้ได้มาจาก amino acid ester และ acrylonitrile copolymer ที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้ว
3. การใช้พอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ธรรมชาติผสมกับพลาสติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมใช้ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และโปรตีน เป็นต้น โดยการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อให้พลาสติก



สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งเมื่อสารเหล่านี้ถูกจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติบริโภคไปจะเป็น การเพิ่มพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ ทำให้จุลินทรีย์สามารถแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ ซึ่ง เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นเอง

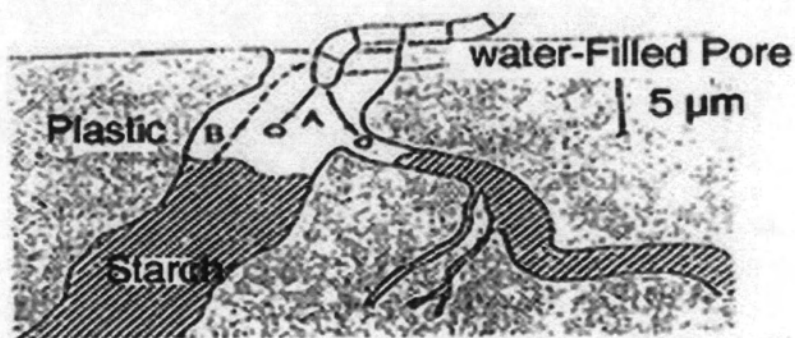
การสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์ เป็นการสลายตัวเนื่องจากสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ ได้แก่ จุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรียและเชื้อรา สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีความสามารถในการย่อยสลายสารได้หลายประเภท และสามารถปรับความสามารถนี้ได้ มาก เพราะสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสารได้หลายชนิด ขณะเดียวกันก็เกิดมีจุลินทรีย์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการผ่าเหล่า และกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ อัตราการย่อย สลายจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก จุลินทรีย์ที่เหมาะสมต้องมีปริมาณอยู่พอเพียง และ ควรมีมากกว่า 1 ชนิด การที่จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาพแวดล้อมต้องมีอุณหภูมิ และระดับความชื้นที่พอเหมาะสม มีออกซิเจนและสารอาหารพอเพียง ถึงแม้ว่าจุลินทรีย์สามารถใช้พอลิเมอร์ที่เป็นแหล่งของธาตุคาร์บอน แต่ก็จำเป็นต้องหาธาตุอื่นมาใช้ด้วย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และโลหะอื่นๆ ส่วนใหญ่ธาตุเหล่านี้มักไม่มีอยู่ในพอลิเมอร์สังเคราะห์ จึง จำเป็นต้องหาจากสภาพแวดล้อม

การย่อยสลายพอลิเมอร์โดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์ออกมานอก เซลล์และเอนไซม์เหล่านี้จะผ่านไปถึงพอลิเมอร์ได้ทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์ดังกล่าวจะย่อย สลายโมเลกุลของพอลิเมอร์ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ เพื่อ ทำการย่อยให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กต่อไปอีก

จากขั้นตอนของการย่อยสลายข้างต้น จะพบว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีสมบัติที่ยากต่อการ ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เพราะไม่เปียกน้ำ ไม่ยอมให้น้ำผ่านเข้าออก และไม่เป็นที่รูพรุน จึงทำให้ โอกาสที่เอนไซม์เข้าย่อยสลายน้อยลง ดังนั้น การย่อยสลายพอลิเมอร์ประเภทนี้จึงต้องเริ่มที่ผิว ด้านนอกก่อน ซึ่งการแบ่งพอลิเมอร์ออกเป็นชั้นเล็กๆ จะช่วยให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น

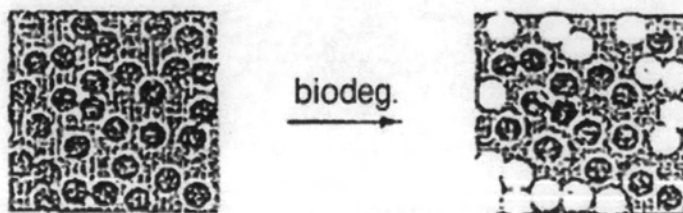
พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่ไม่ถูกย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิต ยกเว้นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอส เทอร์ในสายโซ่โมเลกุล เช่น อะลิฟาติก พอลิเอสเตอร์ (aliphatic polyesters) และพอลิยูรีเทน (polyurethanes) เป็นต้น นอกจากนี้ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับการปรับเปลี่ยนแล้ว เช่น เรยอน (rayon) เซลลูโลสแอซิเตต (cellulose acetate) เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) และ ไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส (hydroxypropyl cellulose) เป็นต้น จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เป็นผลจากการที่วัสดุถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ที่เรียกว่า microbial degradation โดยจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์หลากหลายชนิดที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ การทำลายพอลิเมอร์ด้วยเอนไซม์จัดเป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งถูกเหนี่ยวนำด้วยจุลินทรีย์เพื่อให้ได้อาหาร เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาผสมกับพลาสติกคือ แป้ง โดยแป้งจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของพลาสติก ซึ่งกลไกการย่อยสลายตัวของพลาสติกในขั้นแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ ทำให้แป้งมีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12



(A คือ การแพร่ของอะไมเลสไปยังแป้ง, B คือ การแพร่ของแป้งที่ถูกย่อยไปยังจุลินทรีย์)

รูปที่ 2.11 กลไกการย่อยสลายแป้งในพลาสติกโดยจุลินทรีย์ [5]



รูปที่ 2.12 การหายไปของเม็ดแป้งในพลาสติก [5]

เมื่อเม็ดแป้งหายไปจากเนื้อของพลาสติกทำให้พลาสติกนิ่มลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ต่อจากนั้น โลหะและน้ำที่อยู่ในดินจะเกิดปฏิกิริยา auto-oxidation ได้สารเปอร์ออกไซด์ซึ่งอัตราการย่อยสลาย ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่าง และชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน รวมถึงความหนาของพลาสติกด้วย

### 2.5.1 การสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์

การสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์ เป็นการสลายตัวเนื่องจากสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ ได้แก่ จุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรียและเชื้อรา สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีความสามารถในการย่อยสลายสารได้หลายประเภท และสามารถปรับความสามารถนี้ได้มาก เพราะสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสารได้หลายชนิด ขณะเดียวกันก็เกิดมีจุลินทรีย์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการผ่าเหล่า และกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก จุลินทรีย์ที่เหมาะสมต้องมีปริมาณอยู่พอเพียง และควรมีอยู่มากกว่า 1 ชนิด การที่จุลินทรีย์จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาพแวดล้อมจะต้องมีอุณหภูมิและระดับความชื้นที่พอเหมาะสม มีออกซิเจนและสารอาหารพอเพียง ถึงแม้ว่าจุลินทรีย์สามารถใช้พอลิเมอร์ที่เป็นแหล่งของธาตุคาร์บอน แต่ก็จำเป็นต้องหาธาตุอื่นมาใช้ด้วย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และโลหะอื่นๆ ส่วนใหญ่ธาตุเหล่านี้มักจะไม่อยู่ในพอลิเมอร์สังเคราะห์ จึงจำเป็นต้องหาจากสภาพแวดล้อม

การย่อยสลายพอลิเมอร์โดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้น เมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์และเอนไซม์เหล่านี้จะผ่านไปถึงพอลิเมอร์ได้ทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์ดังกล่าวจะย่อยสลายโมเลกุลของพอลิเมอร์ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ เพื่อทำการย่อยให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กต่อไปอีก

จากขั้นตอนของการย่อยสลายข้างต้น จะพบว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีสมบัติที่ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เพราะไม่เปียกน้ำ ไม่ยอมให้น้ำผ่านเข้าออก และไม่เป็นที่รูพรุน จึงทำให้ออกาสที่เอนไซม์เข้าย่อยสลายน้อยลง ดังนั้น การย่อยสลายพอลิเมอร์ประเภทนี้จึงต้องเริ่มที่ผิวด้านนอกก่อน ซึ่งการแบ่งพอลิเมอร์ออกเป็นชั้นเล็กๆ จะช่วยให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น

พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่ไม่ถูกย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิต ยกเว้นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ในสายโซ่โมเลกุล เช่น อะลิฟาติก พอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyesters) และพอลิยูรีเทน (polyurethanes) เป็นต้น นอกจากนี้ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับการปรับเปลี่ยนแล้ว เช่น เรยอน

(rayon) เซลลูโลสแอซิเตต (cellulose acetate) เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) และ ไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส (hydroxypropyl cellulose) เป็นต้น จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้

ความสามารถของการย่อยสลายจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการย่อยสลายกับน้ำหนักโมเลกุล มีสิ่งที่ควรกล่าวถึง 2 ประการ ประการแรก คือ ถ้านำพอลิเมอร์มาทำการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาเคมี (เป็นการลดน้ำหนักโมเลกุล) จะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายขึ้น ประการที่สอง ถ้าพอลิเมอร์มีช่วงการกระจายตัวของน้ำหนักกว้าง อัตราเร็วของการย่อยสลายจะลดลง เมื่อโมเลกุลขนาดเล็กถูกย่อยสลายไปแล้ว

## 2.5.2 แนวทางการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาแนวทางการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ 3 แนวทาง คือ

1. พัฒนาวិธีการในการปรับปรุงพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ให้มีสมบัติดีขึ้นเหมาะกับการใช้งาน
2. เตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่ย่อยสลายได้โดยสิ่งมีชีวิต โดยพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สังเคราะห์ขึ้นมาและถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายมีหลายชนิด เช่น acrolien-arylic acid polymer , polyamidotriazoles , polyphosphazenes พอลิเมอร์เหล่านี้ได้มาจาก amino acid esters และ acrylonitile copolymer ที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้ว
3. ใช้สารที่สิ่งมีชีวิตย่อยสลายได้เติมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายไม่ได้เป็นการเติมสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegrading additive) ลงไปในพลาสติกสังเคราะห์

ซึ่งการเพิ่มสารที่ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์เข้าไปในพลาสติก อาจทำโดยใช้พอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีมากในประเทศและมีราคาถูกมาผสมกับวัสดุสังเคราะห์ เพื่อให้เกิดการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย และเชื้อรา โดยการย่อยสลายจะเกิดจากการที่จุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์ออกมาในระหว่างการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) เพื่อย่อยสลายอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (ในกรณีของ aerobic) หรือโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่น (ในกรณีของ anaerobic)



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Huang และคณะ [13] ได้เตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวโพดที่ถูกพลาสติกไซต์ด้วยกลีเซอรอล (GTPS) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) โดยเทคนิค melt intercalation ด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบเกลียวเดี่ยว (single screw plastic extruder) จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่า MMT มีการกระจายตัวสม่ำเสมอใน GTPS และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณ MMT อยู่ในช่วง 0-30% ขึ้นงานมีความต้านแรงดึงได้ถึง 27.34 MPa ขณะที่ความเครียดลดลงจาก 85.32 เหลือ 17.82% ส่วนยังงัดมอดูลัสมีค่าถึง 206.74 MPa และสมบัติการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ MMT เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่ใช้งานทั่วไป

Wilhelm และคณะ [14] ได้เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากแป้ง Cara roots (แป้งพื้นเมืองของประเทศบราซิล) ที่ถูกพลาสติกไซต์ด้วยกลีเซอรอล และใช้แร่ดิน (clay mineral) เป็นสารเสริม แรงระดับนาโน ด้วยวิธี solution intercalation ในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยวิธีการหล่อ (casting) อัตราส่วนของแป้งและแร่ดินโดยน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 และ 70/30 ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR และ XRD พบว่า ทั้งแป้งและกลีเซอรอลได้แทรกเข้าไประหว่างชั้นของดิน และจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DMA พบว่า แป้งและกลีเซอรอลเข้ากันได้เพียงบางส่วน โดยกลีเซอรอลปริมาณเล็กน้อยที่เหลืออยู่ได้แทรกเข้าไปในชั้นของแร่ดิน และการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงผลของการเสริมแรงของแร่ดินในเมทริกซ์ของแป้ง โดยมีการเพิ่มขึ้นของ storage modulus (stiffness) ความคงขนาด (dimensional stability) และยังงัดมอดูลัส

Chen และคณะ [15] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตจากแป้งมันฝรั่งและเคลย์ 4 ประเภท เพื่อให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยใช้เทคนิค melt intercalation ด้วยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two roll mill) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เคลย์ที่ใช้ ได้แก่ MMT, kaolin, hectorite และ modified hectorite จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่า MMT และ hectorite จากธรรมชาติสามารถเกิดเป็นนาโนคอมพอสิตกับแป้งได้ ขณะที่ kaolin เกิดเป็นคอมพอสิตแบบธรรมดาทั่วไป นอกจากนี้ การศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค TEM พบว่า ขึ้นงานที่เตรียมจาก hectorite ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลระหว่าง exfoliate และ intercalated ส่วนที่เตรียมจาก modified hectorite จะเป็นคอมพอสิตแบบธรรมดาทั่วไป ซึ่งเคลย์ทุกประเภทที่ใส่เข้าไปในแป้งมีผลทำให้มอดูลัสสูงขึ้น แต่วัสดุคอมพอสิตที่เตรียมจาก kaolin และ modified hectorite มีมอดูลัสใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าที่เป็นนาโนคอมพอสิตเมื่อใส่เคลย์ในปริมาณเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับ

ผลที่ได้จากเทคนิค TEM ว่าเป็นเพียงคอมพอสิตธรรมดาทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุนาโนคอมพอสิตด้วยกัน พบว่า MMT มีผลทำให้มี มอดุลัสสูงกว่าการใส่ hectorite จากธรรมชาติเล็กน้อย

Siby และคณะ [16] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติกับ layered silicates ชนิดต่างๆ ทั้งที่ได้จากธรรมชาติ (Na bentonite) และจากการสังเคราะห์ (Na fluorohectorite) โดยผสมกับสารที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันในภาวะที่เป็นลาเท็กซ์ ซึ่งภายหลังจากวัลคาไนซ์ ชิ้นงานถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการบวมตัว พบว่า วัสดุนาโนคอมพอสิตมีมอดุลัสและความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะที่ใช้ Na fluorohectorite รวมทั้งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี กว่าเช่นกัน

Valadares และคณะ [17] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติและ Na-MMT (5, 10, 20 และ 30 phr) โดยการกวน Na-MMT ให้กระจายตัวในน้ำ แล้วจึงเติมน้ำยางธรรมชาติลงไปพร้อมทั้งกวนด้วยอัตราเร็ว 24,000 รอบ/นาที แล้วนำไปเทหล่อเป็นแผ่นบนแม่แบบพลาสติก จากการตรวจสอบด้วย เทคนิค XRD และ TEM พบว่า การใส่ Na-MMT ปริมาณ 30 phr ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างเป็นแบบ intercalate ส่วนการใส่ Na-MMT ปริมาณ 10 และ 20 phr ทำให้ได้โครงสร้างผสมของ intercalate และ exfoliate ขณะที่การใส่ Na-MMT ปริมาณ 5 phr ทำให้โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบ exfoliate ซึ่งการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติ สามารถทำได้เนื่องจากน้ำที่อยู่ในลาเท็กซ์เป็น exfoliating agent สำหรับ MMT ที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ ทั้งเคลย์และอนุภาคของยางมีประจุเป็นลบ จึงทำให้กระจายตัวได้อย่างมีเสถียรภาพในตัวกลางที่เป็นน้ำ และการทำให้ชิ้นงานแห้งมีผลทำให้อนุภาคของยางและแผ่นเคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม (cluster)

You-Ping และคณะ [18] ได้ศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากยางหลายชนิด กับแร่ดิน ซึ่งได้แก่ ยาง SBR, ยางธรรมชาติ และยาง CNBR (carboxylated acrylonitrile butadiene rubber) โดยเทคนิค co-coagulating แล้วจึงนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง พบว่า นาโนคอมพอสิตที่ได้มีทั้งแบบ intercalated และ exfoliated ที่ทนต่อความร้อนสูงขึ้น และมีค่า  $T_g$  สูงขึ้น นอกจากนี้ ยังมีค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้นด้วย

Cavalho และคณะ [20] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากแป้งข้าวโพดและน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ลิเธอรอล (20, 30 และ 40% ของน้ำหนักแป้ง) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ปริมาณเนื้อยางแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 2.5-20% ของน้ำหนักทั้งหมด ชิ้นงานถูกขึ้นรูปด้วยวิธีอัดด้วยความร้อน (hot pressed) ที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียส ให้เป็นแผ่นขนาด 10 x 10 เซนติเมตร และหนา

2.5 มิลลิเมตร ซึ่งปริมาณของยางที่ผสมกับแป้งได้ถูกจำกัดเนื่องจากจะเกิดการแยกเฟส และพบว่าปริมาณกลีเซอรอล 20% ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยนอกจากทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮดรอกซ์แล้วยังเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวของแป้งและยางอีกด้วย