

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



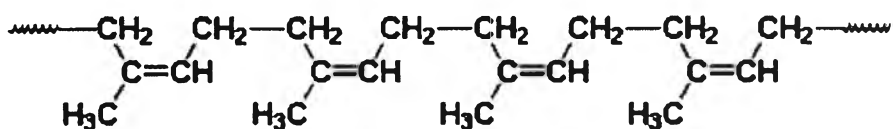
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [1]

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยในปี พ.ศ. 2545 มีปริมาณการผลิตประมาณ 2.62 ล้านตัน และมีการส่งออกในรูปร่างดิบประมาณ 2.35 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออกกว่าเจ็ดหมื่นล้านบาท และมีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าเพียงประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น แต่สามารถทำรายได้ให้ประเทศจากการส่งออกผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปถึงกว่าห้าหมื่นล้านบาท จึงเห็นได้ชัดว่าอุตสาหกรรมแปรรูปยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้น ประเทศจึงควรเร่งพัฒนาและสนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางให้ขยายใหญ่ขึ้น

ยางธรรมชาติที่ถูกนำไปใช้ในการค้าได้จากต้นยางพารา ซึ่งมีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea Braziliensis* น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ประมาณ 30-35% (โดยน้ำหนัก) แขนงลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งปริมาณเนื้อยางแห้งขึ้นกับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล เป็นต้น ประเทศไทยทำการผลิตยางธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ คือ ยางแห้ง ซึ่งได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง เอสทีอาร์ ยางเครพ และยางสгим เป็นต้น และที่อยู่ในรูปของยางเหลว ซึ่งได้แก่ น้ำยางข้น และน้ำยางคงรูป เป็นต้น

2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

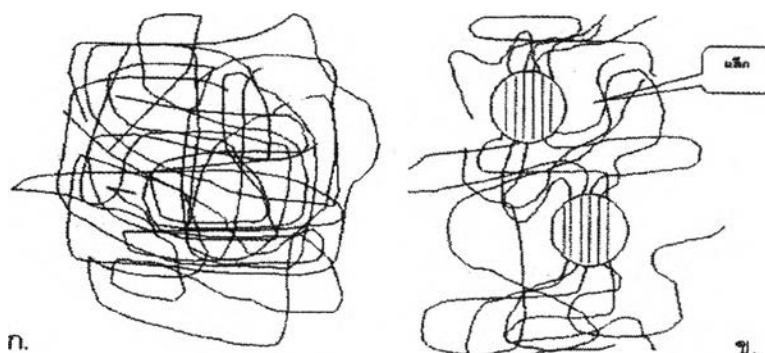
ยางธรรมชาติประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (isoprene) ต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail) ได้เป็นพอลิไอโซพรีน (polyisoprene) ซึ่งยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพาราจะมีโครงสร้างที่เป็น cis-1,4-polyisoprene (รูปที่ 2.1) ประมาณ 97% โดยยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก และมีความหนาแน่น 0.93 g/cm³ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperate, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [2]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่ และหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมะถัน ดังนั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงจำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมะถัน อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ หรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน และไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยาง (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่างๆ เหล่านี้สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืดดึง โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ (ก) ภาวะปกติ และ (ข) ภาวะที่ถูกยืดดึง [1]

การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ หรือที่เรียกว่า "low temperature crystallization" จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน โดยยางมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า -26 องศาเซลเซียส การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นจะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวและกลับสู่สภาพเดิมด้วยเหตุนี้ ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 50-70

องศาเซลเซียส เพื่อให้ยางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว หรือที่เรียกว่า "strain-induced crystallization" จะพบเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของยางทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด โดยยางเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง ไปเป็นทึบแสง ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้ ยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางมีความต้านแรงดึง ความต้านการฉีกขาด และความต้านทานการขีดถูสูงขึ้น

2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความต้านแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความสม่ำเสมอของโครงสร้าง จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงให้ยืดออก ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่ยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความต้านแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารเสริมแรงเข้าช่วย (ประมาณ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีความต้านแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้ นอกจากจะมีการเติมสารเสริมแรงเข้าไปช่วยเท่านั้น

ความต้านการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีความต้านทานการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการขัดถูสูง แต่ยังคงดีกว่ายางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์อื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมากดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจัดกลุ่มยางตามค่าความต้านทานการขั้ตดู [1]

กลุ่มที่	ความต้านทานการขั้ตดู	ยาง
1	สูงมาก	ยางพอลิยูรีเทน ยางบิวตะไดอิน ยางสไตรีนบิวตะไดอิน ยางไนไตรล์ และยางธรรมชาติ
2	สูง-สูงมาก	ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ยางคลอโรพรีน และ ยางคลอโรซัลโฟเนเตดพอลิเอทิลีน
3	สูง	ยางบิวทิล ยางเอทิลีนอะคริลิก และยางเอทิลไวนิลอะซีเตต
4	ต่ำ	ยางซิลิโคน

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

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกซีน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้ายางเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงข้ามทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะขัดขวางการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่บวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวทำสมบัติเชิงกลของยางต่ำลง แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น แอซีโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนกรดไนตริก และกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีพันธะคู่อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีแสงหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกดึงยืดและได้รับโอโซนเป็นเวลานานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ดังนั้น ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารบางชนิด ได้แก่ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants) และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

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

Compression set ยางธรรมชาติมีค่า compression set ค่อนข้างต่ำ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม ค่า compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่า compression set ที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลให้สมบัติ compression set สูงขึ้น

การกระดอน (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยางบิวตะไดอิน) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานความร้อนน้อย (มี hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต จึงเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงอาจทำให้ยางระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ตั้งแต่อุณหภูมิ -55 ถึง 70 องศาเซลเซียส แต่หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป หรือใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ จะต่ำลงเนื่องจากความร้อนทำให้ยางเสื่อมสภาพ และถ้าออกสูตรยางผสมสารเคมีได้อย่างเหมาะสม (เติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) ก็อาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส หรืออาจสูงถึง 100 องศาเซลเซียส (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

2.1.3 การใช้งานของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติจัดเป็นยางอเนกประสงค์ (general purpose rubber) ที่สามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี ผลิตภัณฑ์บางประเภทต้องใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

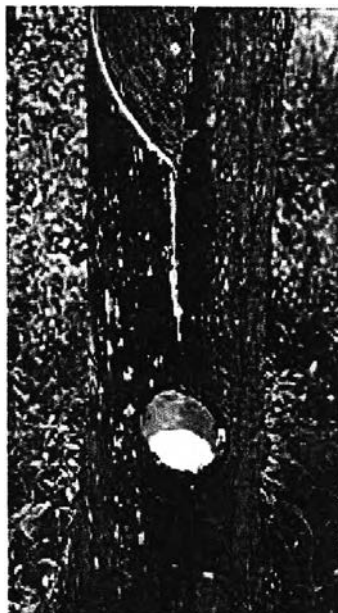
1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความต้านแรงดึง ถึงแม้ไม่ได้ใส่สารเสริมแรงและยังมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกล และเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง และมีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำ นอกจากนี้ ยังมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ฝ่ายยาง ยางกันกระแทกทำเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

3. ยางธรรมชาติมีความทนทานการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับผลิตกระเปาะน้ำร้อนยาง ทั้งนี้เนื่องจากการแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากแม่แบบในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีความต้านการฉีกขาดขณะร้อนสูง

2.1.4 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีสีขาวข้นคล้ายน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งน้ำยางที่กรี๊ดได้นี้จะมีปริมาณน้ำมากเกินไป จึงไม่เหมาะที่จะนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปทำให้เป็นน้ำยางข้นเสียก่อน ซึ่งการทำน้ำยางข้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuging machine) เพื่อแยกยางซึ่งเบากว่า (ความถ่วงจำเพาะ 0.92) ออกจากของเหลวที่หนักกว่า (ความถ่วงจำเพาะ 1.02) โดยวิธีนี้ น้ำยางจะถูกแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 61.5% และเป็นเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง 60% อีกส่วนเป็นหางน้ำยางที่มียางแห้งปนอยู่ประมาณ 3-5% แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน และฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ผสมอยู่ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเชื้อแบคทีเรียได้เป็นแก๊สชนิดต่างๆ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน หรือสารประกอบ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงเกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารละลายแอมโมเนียลงไปหรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียวต้องให้แอมโมเนียปริมาณสูงถึง 0.7% ซึ่งน้ำยางชนิดนี้ เรียกว่า High Ammonia Latex หรือ HA latex ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเล็กน้อยเพียง 0.2% จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือ กรดบอริก 0.2% หรือแซนโตไบรท์ (santobrite) 0.2% เป็นต้น ซึ่งน้ำยางชนิดนี้ เรียกว่า Low Ammonia Latex หรือ LA latex

น้ำยางข้นส่วนหนึ่งถูกส่งออกจำหน่ายยังต่างประเทศ ส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้นจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถกำจัดน้ำออกได้ง่าย กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์จะต้องบาง หรือมีรูพรุนเพื่อให้น้ำระเหยออกได้ง่ายตามรูพรุนเหล่านั้น ซึ่งได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกนม เบ้าหล่อปูนปลาสเตอร์ ที่นอนฟองน้ำ และหมอนฟองน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 น้ayangธรรมชาติ [3]

2.1.5 ข้อดีและข้อเสียของน้ayangชั้น [4]

ข้อดีของน้ayangชั้น

- ผลิตภัณฑ์บางลักษณะไม่สามารถขึ้นรูปได้จากยางแห้งหรือสารละลายยาง แต่สำหรับน้ayangจะขึ้นรูปได้ง่าย
- ผลิตภัณฑ์ทำจากน้ayangชั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากน้ayangชั้นมีความหนืดต่ำ จึงสามารถผสมกับสารเติมแต่งของยางได้ง่าย สามารถใช้สารเติมแต่งในรูปของเหลว เกิดการผสมได้ง่าย ใช้พลังงานในการผสมต่ำ ใช้เวลาในการผลิตน้อย และไม่ต้องใช้เครื่องมือผสมราคาแพงที่มีขนาดใหญ่เหมือนการขึ้นรูปยางแห้ง เพราะไม่ต้องทำการบดย่อย (mastication) ให้น้ayangนิ่มตัวก่อนทำการผสมเหมือนยางแห้ง ซึ่งการบดย่อยมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออก หรือน้ayangโมเลกุลลดลง ทำให้น้ayangมีสมบัติเชิงกลต่ำลง ซึ่งน้ayangโมเลกุลของยางจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ยางในน้ayangชั้นมีน้ayangโมเลกุลสูง จึงเกิดการพันกันของสายโซ่ (chain entanglement) ทำให้น้ayangมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง การยืดตัว ณ จุดขาด เป็นต้น
- มีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่าใช้สารละลายยางหรือยางแห้ง เนื่องจากน้ayangชั้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงไม่ติดไฟได้ง่าย

ข้อเสียของน้ำยางข้น

- น้ำยางข้นไม่เหมาะกับการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นมาก เนื่องจากในน้ำยางจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ถึงร้อยละ 40 ถ้าใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาจะเกิดปัญหาการหดตัวสูงเมื่อยางแห้ง ทำให้เสียรูปหรือไม่คงขนาด
- กระบวนการผลิตจากน้ำยางข้นต้องดูแลการผลิตที่พิถีพิถันมากกว่ายางแห้ง เนื่องจากน้ำยางข้นมีเสถียรภาพต่ำ อาจเกิดการจับตัวแยกตัววิฤภาค หรือตกตะกอนเสียสภาพได้ถ้าขาดการควบคุมการผลิต เช่น สูตรผสม ลักษณะของสารตัวเติม และความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นต้น

2.1.6 การทำให้ยางคงรูป [4]

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาตินั้น ต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยงข้ามหรือวัลคาไนซ์ (crosslinking หรือ vulcanize) หรืออาจเรียกว่า การบ่มยาง (curing) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางแบบเชิงเส้น (linear chain) เป็นแบบร่างแหสามมิติ (3-dimensional network) ยางจึงจะมีสมบัติที่ดีขึ้น กล่าวคือ เปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด (sticky) ไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง (dimensional stability) และไหลได้เมื่อทิ้งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง ไม่เหนียวติด และทนอุณหภูมิสูง การเชื่อมโยงข้ามสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมี ได้แก่ สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents) เช่น กำมะถัน (sulphur) หรือสารเปอร์ออกไซด์ (peroxides) นอกจากนี้ ยังใช้สารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerators) และ สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (activators) ผสมเข้าไปด้วย แล้วทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง ความร้อนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางแบบเชิงเส้นเป็นแบบร่างแหสามมิติ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีเสถียรภาพของรูปร่าง และมีสมบัติที่ดีตามต้องการ

2.1.7 การขึ้นรูปน้ำยาง [4]

น้ำยางข้น (concentrated latex) จากยางธรรมชาติ สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆได้มากมาย สามารถใช้เทคนิคการจุ่ม (dipping process) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางฟิล์มบางเช่น ถุงมือแพทย์ (examination glove) ถุงมือแม่บ้าน (household glove) ลูกโป่ง (ballon) ถุงยางอนามัย (condom) ฯลฯ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เทคนิคการหล่อแบบ (casting) ในการผลิตเช่น ตุ๊กตายางชนิดกลวง และเทคนิคการทำฟองน้ำยาง เช่น ที่นอนฟองน้ำ หมอนเบาะรองนั่ง เป็นต้น

2.1.8 การเตรียมสารกระจายในน้ำ (ดิสเพอร์ชัน) [4]

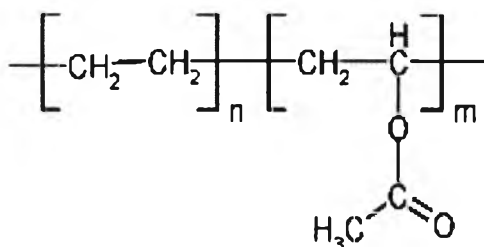
สารเคมีทุกชนิดที่ใช้เป็นส่วนผสมกับน้ำยาง จะต้องถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของเหลวเพื่อช่วยให้การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย ถ้าหากนำสารเคมีแห้งๆ ใส่ลงไปลงในน้ำยางโดยตรง สารเคมีจะตกตะกอน อาจเกิดเป็นก้อนในน้ำยางได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมสารเคมีที่จะใส่ลงไปลงในน้ำยาง โดยเตรียมให้ผิวของสารเคมีห่อหุ้มด้วยน้ำ และจะต้องบดในเครื่องบดให้มีอนุภาคขนาดเล็กเพื่อไม่ให้ตกตะกอน ถ้าสารเคมีนั้นเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำจะต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของผงละเอียดกระจายในน้ำ หรือดิสเพอร์ชัน (dispersion) เสียก่อน โดยการบดผสมในหม้อบด (ball mill) ซึ่งบรรจุลูกหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน คือ ประมาณ ¼, ½ และ 1 นิ้ว ตัวอย่างสูตรการเตรียมดิสเพอร์ชัน 50% ได้แก่

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

ทำการบรรจุสารเหล่านี้ลงในหม้อบดที่ใส่ลูกหินไว้ประมาณครึ่งหม้อ ทำการบดสารเคมีในหม้อบดเป็นเวลาประมาณ 28-48 ชั่วโมง (ยกเว้นกำมะถัน เนื่องจากแตกละเอียดยากจึงต้องใช้เวลาดบประมาณ 72 ชั่วโมง) จึงจะได้สารเคมีที่มีขนาดผงละเอียดที่สามารถผสมกับน้ำยางได้ดี

2.2 เอทิลีนไวนิล อะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) [4-7]

อีวีเอ คือ โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการโคโพลิเมอไรเซชันแบบ continuous bulk หรือแบบ solution ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตต (vinyl acetate) ซึ่งไวนิลอะซิเตตจะจัดเรียงตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในสายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยปกติอีวีเอที่นำมาใช้จะมีปริมาณไวนิลอะซิเตตอยู่ในช่วง 2-50% และมีค่า melt index (MI) อยู่ที่ 5-25 กรัม/10 นาที ซึ่งมีการจัดกลุ่มของอีวีเอตามปริมาณของไวนิลอะซิเตตที่มีอยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ดังนี้ ถ้ามีปริมาณไวนิลอะซิเตตอยู่ในช่วง 9-18% จะจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสติก (plastics) ถ้ามีไวนิลอะซิเตตอยู่ในช่วง 28-33% จะจัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers) และถ้ามีไวนิลอะซิเตตถึง 45% จะจัดอยู่ในกลุ่มของยาง (rubbers) โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของอีวีเอ

สมบัติของอีวีเอขึ้นอยู่กับปริมาณไวนิลอะซีเตตที่อยู่ในโคพอลิเมอร์ ถ้าปริมาณไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง ซึ่งมีผลให้ความเป็นผลึกลดลง และถ้ามีปริมาณไวนิลอะซีเตตต่ำ (7-8 mole%) อีวีเอจะมีลักษณะคล้าย LDPE ที่ถูกดัดแปร (modified LDPE) และถ้ามีปริมาณไวนิลอะซีเตต (10-15 mole%) จะมีความยืดหยุ่นคล้ายพลาสติกไซดพิวีซี (plasticised PVC) คือ มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นโดยไม่จำเป็นต้องใส่พลาสติกไซเซอร์ ซึ่งอาจเป็นข้อดีในการใช้งานบางอย่าง เพราะความยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับพลาสติกไซเซอร์ที่อาจสูญเสียไประหว่างการใช้งาน สำหรับอีวีเอที่มีไวนิลอะซีเตตประมาณ 11 mole% อาจถูกใช้เป็นสารเติมแต่งใน hot melt coating และ adhesives

ยางอีวีเอจะมีปริมาณไวนิลอะซีเตตอยู่ 40-70 mole% เนื่องจากสายโซ่ของยางอีวีเอมีความอึดตัวสมบูรณ์ ทำให้ยางชนิดนี้ทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน โอโซน และ สภาพอากาศได้เป็นอย่างดี (สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิสูงถึง 125 องศาเซลเซียส) ส่วนหมู่อะซีเตตซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จะทำให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี แต่ยางอีวีเอมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และเนื่องจากยางมีความเป็นขั้วสูง จึงมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่ดี ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายเคเบิลเฉพาะกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน สภาพอากาศ ความร้อน และน้ำมันเท่านั้น และเนื่องจากสายโซ่หลักของยางอีวีเอเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน แต่สามารถคงรูปด้วยสารเปอร์ออกไซด์ และการเลือกใช้สารตัวเติม สารทำให้ยางนิ่ม และสารช่วยในกระบวนการผลิตควรทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากสารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรด หรือสารประกอบที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลสามารถรบกวนการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากยางอีวีเอมีความทนทานต่อสภาพอากาศสูง จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป แต่ในกรณีที่ต้องการนำยางคงรูปไปใช้ที่อุณหภูมิสูงมากๆ ก็อาจเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปได้ ส่วนสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กับ

ยางชนิดนี้ ได้แก่ น้ำมันพาราฟินที่ระเหยได้น้อย หรือน้ำมันในกลุ่มเอสเทอร์ นอกจากการคงรูปด้วยระบบเปอร์ออกไซด์แล้ว ยังอาจสามารถทำให้คงรูปได้ด้วยการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง

นอกจากนี้ สมบัติของอีวีเอยังขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย โดยอีวีเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีความเหนียวต่ำ จึงง่ายต่อการผลิตหรือขึ้นรูป ส่วนอีวีเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะเหมาะกับงานยึดติดที่ต้องการความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และยืดหยุ่นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ การขึ้นรูปอีวีเอสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอัดแบบ (compression molding) การฉีดแบบ (injection molding) และการอัดรีด (extrusion) ให้เป็นแผ่น (sheets) แล้วใช้บล็อกมีดตัดให้มีรูปร่างตามต้องการ

ปัจจุบันมีการนำอีวีเอมาใช้งานหลากหลายมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติที่ดี ดังนี้

- ชิ้นงานของอีวีเอมีลักษณะใส หรือมีสีขาว ง่ายต่อการให้สี
- มีความยืดหยุ่นและทนต่อการโค้งงอได้ดี
- สามารถละลายได้มากขึ้นเมื่อมีปริมาณไวโนลอะซีเตตเพิ่มขึ้น
- สามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำ และเกลือได้ดี ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านจะน้อยลงถ้ามีปริมาณไวโนลอะซีเตตเพิ่มขึ้น
- มีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี
- มีความต้านแรงกระแทก (impact strength) สูง
- มีราคาถูก
- สามารถต้านทานการเกิดรอยแตกหักได้ดี
- สามารถต้านทานแสง UV และโอโซนได้ดี
- ไม่มีกลิ่น ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เพราะสามารถปิดผนึกได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถสัมผัสกับอาหารได้ตามกฎของ FDA
- สามารถทำการเชื่อมโยงข้าม (crosslinking) ได้ ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี
- อีวีเอมีความเป็นขั้วสูงจากหมู่อะซีเตต ทำให้ทนน้ำมัน (oil resistance) และสามารถยึดเกาะกับวัสดุอื่น และมีความแข็งแรงยึดเกาะที่ดี

2.3 แร่ดินเหนียว (Clay minerals) [8]

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ทุติยภูมิที่เกิดจากการผุพังของหิน โดยอนุภาคมีขนาดเล็กระดับไมครอน มีธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี โครงสร้างของแร่ดินเหนียว หรือสารประกอบแอนไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกต (anhydrous aluminosilicates) ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมินา (alumina) และซิลิกา (silica) และ

ระหว่างชั้นจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม หรือ เหล็กแทรกอยู่ จากโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันนี้ ทำให้สามารถจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียวออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. Kaolinite มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1 : 1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเรียงสลับกับชั้นของอะลูมินา
2. Illite เป็นแร่ดินชนิด 2 : 1 ในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอะลูมินาอยู่ และในแต่ละหน่วยมีไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินในกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้
3. Smectite โครงสร้างเป็นชนิด 2 : 1 เหมือนกลุ่มอิลไลต์ แต่ในชั้นโครงสร้างมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ และไอออนบวกส่วนใหญ่ที่พบเป็น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และ โซเดียม แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ดี
4. Vermiculite มีโครงสร้างเหมือน smectite แต่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า เมื่อเผาแล้วอนุภาคมีลักษณะคล้ายตัวหนอน
5. Palygorskite มีโครงสร้างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่

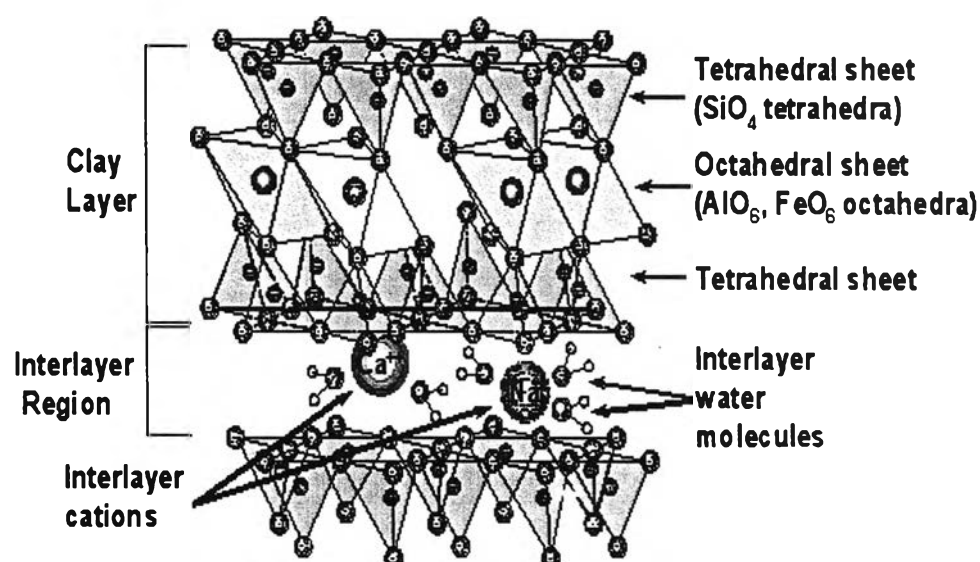
สมบัติต่างๆ ทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ของแร่ดินเหนียวแต่ละกลุ่มที่แตกต่างกัน จะทำให้มีการใช้งานแตกต่างกันด้วย

แร่ดินเหนียวที่นิยมนำมาใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม kaolinite และกลุ่ม smectite โดยกลุ่ม kaolinite นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น กระเบื้อง ถ้วยชาม และ สุขภัณฑ์ เป็นต้น สำหรับกลุ่ม smectite ที่รู้จักกันดี ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระดาษ หรือใช้เป็นโคลนขุดเจาะ (drilling mud) และเป็นสารหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามพัฒนาสมบัติของแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้เพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้งานให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวให้ได้ดินที่ชอบสารอินทรีย์ หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า ออร์แกโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น ใช้เป็นสารปรับความหนืดในสี หมึกพิมพ์ และจาระบี

แร่ดินเหนียวมีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้ว ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางและนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ (nanoclays) และนาโนคอมพอสิต (nano-composites)

2.3.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [9]

มอนต์มอริลโลไนต์ มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไป คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ จัดเป็นแร่กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้เตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นหรือเป็นแผ่นซ้อนกันแบบ 2 : 1 กล่าวคือ ประกอบด้วยชั้นของซิลิกา 2 ชั้น และมีชั้นของอะลูมินา 1 ชั้น แทรกอยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยแต่ละชั้นมีความหนาเพียง 0.7-1.0 นาโนเมตร แต่มีความยาวประมาณ 1,000 เท่า ทำให้มีค่า aspect ratio สูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ ช่องว่างระหว่างชั้น เรียกว่า gallery หรือ interlayer พื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิเกตมีประจุลบ จึงยึดเกาะกันด้วยประจุบวกของไอออนโลหะ เช่น โซเดียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น

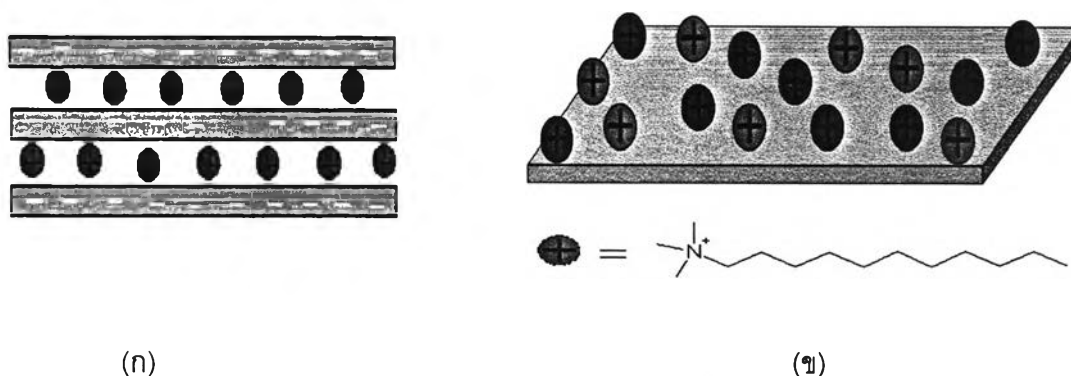


รูป 2.5 โครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ [9]

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (โดยทั่วไปพบว่าความหนาของชั้นผลึกขยายจนถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก จึงเป็นที่รู้จักดีและนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเป็นเวลานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น (ในภาคปฏิภูลของสัตว์เลี้ยง เช่น แมว) รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์แร่ดินเหนียวขึ้นมาได้โดยเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ ทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดประจุได้ เช่น ประจุบวก

2.3.2 ออร์แกโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay)

จากการที่พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นไฮโดรฟิลิก (ชอบน้ำ) จึงเป็นการยากที่จะเข้าร่วมตัวกับออร์แกนิกพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทนโดยการแทนที่ประจุต่างๆ (รูปที่ 2.6) ด้วยประจุของสารอินทรีย์ จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า ออร์แกโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) หรือ เรียกสั้นๆ ว่า ออร์แกโนเคลย์ (organoclay) ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกเกิดการขยายตัวตามขนาดและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ที่เข้าไปแทนที่ ทำให้ชั้นผลึกห่างกัน และเกาะกันอย่างหลวมๆ ซึ่งถ้าระยะห่างระหว่างชั้นมากขึ้น ยิ่งทำให้ง่ายต่อการแยกชั้นผลึกออกจากกันเป็นอนุภาคนาโนเมตร



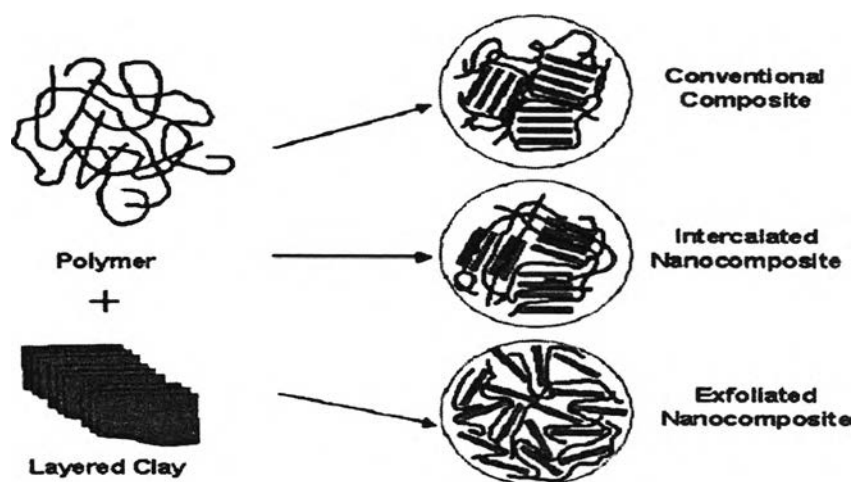
รูปที่ 2.6 (ก) แร่ดินเหนียวที่มีชั้นซิลิเกตและประจุบวก (ข) ออร์แกโนเคลย์ที่ประจุเดิมถูกแทนที่ด้วยประจุบวกของสารอินทรีย์ [10]

2.4 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites)

นาโนคอมพอสิต เป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่จะช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตแบบทั่วไป ทั้งในด้านความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานต่อสารเคมี และลดความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น นาโนคอมพอสิตที่ได้รับความสนใจและพัฒนากันอย่างหลากหลายในปัจจุบันคือ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เป็นวัสดุที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยการเติมสารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ เพราะจะเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงให้มากยิ่งขึ้น

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



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์ [11]

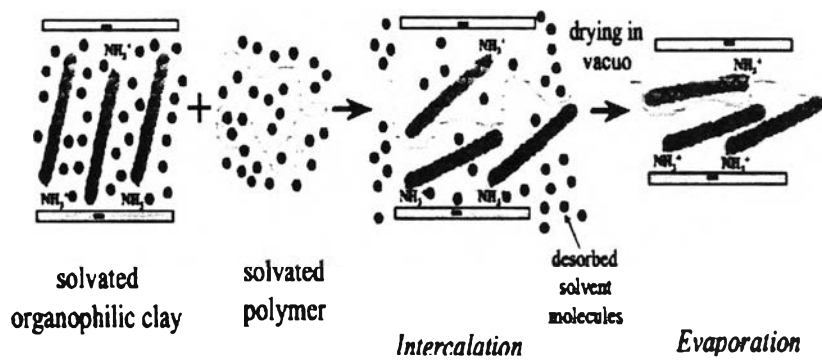
จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์-เคลย์สามารถเกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตได้ 3 แบบ ดังนี้

1. คอมพอสิตแบบทั่วไป (conventional composites) : อนุภาคของเคลย์จะมีการเกาะกันเป็นกลุ่ม พอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. Intercalated nanocomposites : เคลย์จะเกาะกันเป็นกลุ่มแต่ระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวโดยที่สายโซ่พอลิเมอร์จะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์
3. Exfoliated nanocomposites หรือ delaminated nanocomposites : ชั้นของเคลย์จะกระจายตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน C ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง และยังทำให้มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี

2.4.1 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

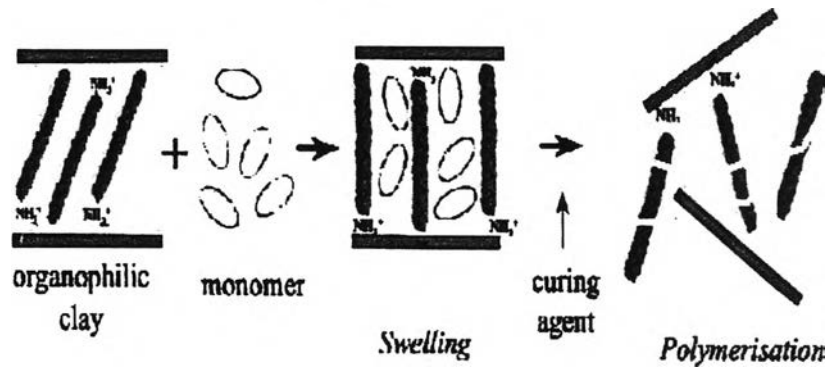
การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิตในปัจจุบันมี 3 วิธี คือ

1. Solution intercalation โดยสารละลายพอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



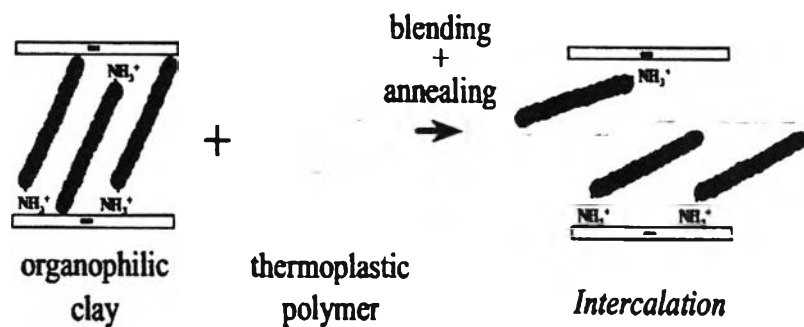
รูปที่ 2.8 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี solution intercalation [12]

2. *In situ* polymerization โดยการแทรกมอนอเมอร์เข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ แล้วจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี *in situ* polymerization [12]

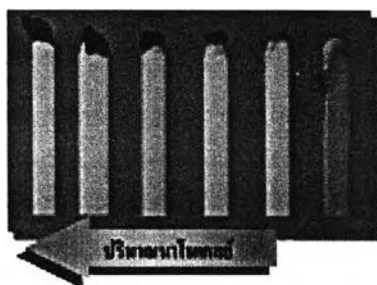
3. Melt intercalation โดยการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแทรกเข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยวิธี melt intercalation [12]

2.4.2 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [10]

1. มีความใส เพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
2. มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นซิลิเกต
3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊สเนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์มีพื้นที่ผิวและมี aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของแก๊สเพิ่มมากขึ้น
4. ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับรวดเร็ว รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าปริมาณถ่านจะสูงขึ้นตามปริมาณนาโนเคลย์



รูป 2.11 การเผาไหม้ของนาโนคอมพอสิตในลอน-เคลย์ (ที่ปริมาณนาโนเคลย์ต่างๆ) [10]

5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรือนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์สะดวกขึ้น

2.4.3 ผลิตภัณฑ์สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น timing-beltting cover โครงบูได้หลังคา คอนโซล ตัวถัง ล้อรถยนต์ และถังน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ
2. สีพ่นรถยนต์ ให้ความคงทนมากขึ้น
3. แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยา/อาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหารเสื่อมสภาพ ยืดอายุสินค้าให้ยาวนานขึ้น
4. ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
5. ลูกเทนนิส ลูกบอลล ป้องกันการสูญเสียแก๊สภายในลูกบอลล ลูกเทนนิส
6. แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ช่วยให้ทนความร้อนได้มากขึ้น การหดตัวลดลง

2.4.4 แนวโน้มการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

ต่างประเทศ : เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาและถ่ายทอดสู่อุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น จีน เกาหลี และอีกหลายประเทศในยุโรป ได้แก่ เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี เป็นต้น โดยเน้นการนำไปใช้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ในปี 2004 บริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของโลกต่างประกาศว่าจะนำชิ้นส่วนที่ผลิตจาก PNC มาใช้ในรถยนต์ เชื่อว่าในอนาคตสามารถผลิตรถยนต์ทั้งคันที่ทำจากนาโนคอมพอสิตได้ ซึ่งจะมีความปลอดภัยสูง โดยเฉพาะจากไฟไหม้ ชะลอความสูญเสีย โดยทนความร้อนสูงขึ้น และลดการลามไฟ
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ ได้แก่ ชิ้นส่วนที่ต้องทนนํ้า ด้านการซึมผ่านของแก๊ส เช่น catheter และชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียม
3. ผลิตภัณฑ์สำหรับอาหารและยา ได้แก่ ฟิล์มป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน และแก๊สต่างๆ และขวดนํ้าอัดลม

ประเทศไทย : มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

1. อุตสาหกรรมยานยนต์ : ชิ้นส่วนรถยนต์ (สนับสนุน Detroit Thailand)
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ : สารคอมพอสิตอุดฟัน สายยางหรือท่อต่างๆ
3. ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต : ปะเก็นล้อรถ ให้ความทนทาน แก้ปัญหา ยางเสื่อมสภาพเร็ว
4. ผลิตภัณฑ์กีฬา : ลูกบอล ลูกเทนนิส
5. อุตสาหกรรมเกษตร : ฟิล์มการเกษตร ฟิล์มห่อผัก ผลไม้ ฟิล์มเลี้ยงต้นอ่อน
6. อุตสาหกรรมเสื้อผ้า แพ้ชั้น : เส้นใยนาโนคอมพอสิต ทนไฟ ให้ความอบอุ่น ย้อมสีติดได้ดี
7. พลังงานและสิ่งแวดล้อม : ตัวตรวจวัดแก๊สอันตราย บำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กทรอนิกส์ ในแบตเตอรี่ของแข็ง (solid battery) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน; lithium ion battery
8. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร : ฟิล์มด้านแก๊สออกซิเจนซึมผ่าน ลดโอกาสอาหารเสื่อมสภาพ เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Paulo และคณะ [13] ได้นำยางธรรมชาติมาผสมกับอีวีเอในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยวิธีแบบหลอมเหลว (melt intercalation) โดยใช้ poly(ethylene-co-vinyl alcohol-co-vinyl mercaptoacetate) (EVASH) เป็นสารช่วยผสม และใช้ dicumyl peroxide (DOP) เป็นสารบ่มผลจากการทดลอง พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ใช้ EVASH เป็นสารช่วยผสม จะมีสมบัติด้าน thermal ageing ดีกว่า และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่า EVASH ยังทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) อีกด้วย นอกจากนี้ พอลิเมอร์ผสม NR/EVA ที่ประกอบด้วย EVASH ยังมีค่าความทนแรงดึงสูงขึ้นหลังจากทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แต่เมื่อเวลานานขึ้น จะทำให้สมบัติเชิงกลเริ่มลดลงเนื่องจากการแตกออกของสายโซ่โมเลกุล

Riva และคณะ [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต โดยใช้เทคนิค melt intercalation จากอีวีเอที่มีไวนิลอะซีเตต 19% ผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่อง Brabender mixer ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ได้เป็น PLSN (polymer layered silicate nanocomposites) จากการทดลอง พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย methyl tallow bis(2-hydroxyethyl) ammonium จะได้วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างเป็นแบบ exfoliated ขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย dimethyl dehydrogenated tallow ammonium จะได้วัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบ intercalated และวัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีเปอร์เซ็นต์ซิลิเกตต่างๆ (10%) ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์จะสามารถลดการเกิดปฏิกิริยา thermo-oxidation ได้ รวมทั้งเพิ่มค่า storage modulus ของวัสดุอย่างเห็นได้ชัด

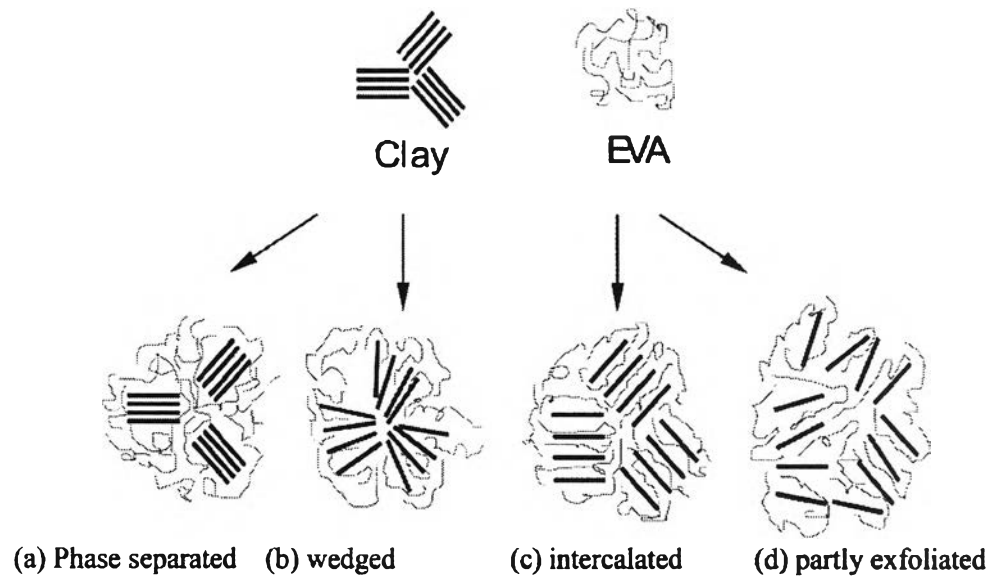
Zanetti และคณะ [15] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตประเภท PLSN จากอีวีเอที่มีปริมาณไวนิลอะซีเตต 12 และ 19 mole% โดยเทคนิค melt intercalation ด้วยเครื่องอัดรีดแบบ (extrusion moulding) ซึ่งแร่ซิลิเกตที่ใช้ คือ fluorohectorite และ organophilic clay จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่า วัสดุนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ exfoliated และผลของ TGA พบว่า วัสดุนาโนคอมพอสิตมีความต้านทานการแตกสลายด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น และจะเกิดการแตกสลายได้ช้าลง

Pramanik และคณะ [16] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากอีวีเอที่มีปริมาณไวนิลอะซีเตต 28 mole% กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรด้วย dodecyl ammonium ions ด้วยเทคนิค solution intercalation จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า ค่า interlayer spacing เพิ่มขึ้นจาก 11.94 Å เป็น 15.78 Å นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าใช้มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 2-6% จะเกิดนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบ exfoliated แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 8% จะเกิดการจับตัวของ

ซิติเกตในเมทริกซ์ของอีวีเอ และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA และการหาสมบัติด้านการดึง พบว่า วัสดุนาโน-คอมพอสิตจะทนความร้อนและมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น โดยความต้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิตเพิ่ม ขึ้นร้อยละ 36, 96 และ 99 และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้นร้อยละ 16, 37 และ 42 เมื่อผสมมอนต์มอริลโลไนต์ลงไป 2, 4 และ 6% ตามลำดับ

Tang และคณะ [17] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากอีวีเอ และมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยเทคนิค melt intercalation โดยทำการผสมอีวีเอกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ MMTa (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $38 \mu\text{m}$) และ MMTb (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $48 \mu\text{m}$) ในปริมาณ 5 และ 7% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD และ HREM พบว่า วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ intercalated และจากการศึกษาสมบัติการติดไฟด้วยเทคนิค Cone Calorimetry พบว่า วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่ได้มีอัตราการปลดปล่อยความร้อน (heat release rate, HRR) ต่ำกว่าอีวีเอบริสุทธิ์ 40% เปอร์เซนต์ และต่ำกว่าวัสดุไมโครคอมพอสิต 34% นอกจากนี้ ค่า HRR ของวัสดุนาโนคอมพอสิตที่ประกอบด้วย MMTa 5% มีค่าต่ำกว่า MMTb 5%

Zhang และคณะ [18] ได้ศึกษาและเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากอีวีเอ และเคลย์ ด้วยวิธี melt intercalation โดยใช้อีวีเอที่มีไวนิลอะซีเตตปริมาณ 28, 40, 50 และ 80% ผสมกับเคลย์ 4 ชนิด ซึ่งเป็น organophilic clay (OMMT) 3 ชนิด และอีกชนิดเป็น Na-MMT ด้วยอัตราส่วน 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณไวนิลอะซีเตตต่างๆ กันที่อยู่ในอีวีเอ และชนิดของเคลย์ที่มีต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติของวัสดุนาโนคอมพอสิตอย่างมีระบบ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วัสดุนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์/เคลย์จะมีโครงสร้างแตกต่างกัน 2 แบบ คือ เป็น intercalated และ exfoliated สำหรับงานวิจัยนี้ได้เสนอโครงสร้างระดับนาโนแบบใหม่ คือ แบบ wedged ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เพื่อให้อธิบายระดับการกระจายของเคลย์ในวัสดุนาโนคอมพอสิต กล่าวคือ แผ่นของเคลย์บางส่วนมีลักษณะเป็นลิ้ม ซึ่งโครงสร้างแบบ wedged, intercalate และ exfoliate ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ HRTEM และผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA พบว่า ค่า storage modulus ของโครงสร้างแบบ intercalated และ exfoliated มีค่าสูงกว่าโครงสร้างแบบ wedged



รูปที่ 2.12 นาโนคอมพอสิตจากอีวีเอ และเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบ intercalated, exfoliated และแบบ wedged [18]

Siby และคณะ [19] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติกับ layered silicates ต่างๆ ทั้งที่ได้จากธรรมชาติ (sodium bentonite) และที่สังเคราะห์ขึ้นมา (sodium fluorohectorite) โดยการผสมกับสารเคมีที่จำเป็นสำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันในภาวะที่เป็นลาเท็กซ์ ภายหลังจากการวัลคาไนซ์แล้ว ขึ้นทดสอบถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการบวมตัว ซึ่งพบว่า วัสดุนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/sodium fluorohectorite มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด 500% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ และยังมีค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 24 MPa เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติซึ่งมีค่าเท่ากับ 22 MPa และนอกจากนี้ยังมีค่าความทนความร้อนที่ดีกว่าเช่นเดียวกัน โดยพิจารณาจากค่า T_g ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ

You-Ping และคณะ [20] ได้ศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากยางหลายชนิดกับแร่ดิน ซึ่งได้แก่ ยาง SBR, ยางธรรมชาติ และยาง CNBR (carboxylated acrylonitrile butadiene rubber) โดยเทคนิค co-coagulating ก่อนนำไปขึ้นรูปด้วย two roll mill พบว่า นาโนคอมพอสิตที่ได้มีทั้งแบบ intercalated และ exfoliated ที่ทนต่อความร้อนสูงขึ้น และมีค่า T_g สูงขึ้น โดยนาโนคอมพอสิตของ SBR/เคลย์ จะให้ค่า T_g สูงสุด (-60°C) เมื่อเทียบกับยาง SBR (-55°C) นอกจากนี้ยังทำให้นาโนคอมพอสิตของ SBR/เคลย์, NR/เคลย์ และ CNBR/เคลย์ มีค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 14.5, 26.8 และ 18 ตามลำดับ

Sharif และคณะ [21] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติผสม EVA กับ นาโนเคลย์ ด้วยกระบวนการ melt mixing โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง NR/EVA เท่ากับ 40/60 และ ใช้ออร์แกนโอเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งการผสมทำในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแบบ (compression molding) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นแบบ intercalated และจากการตรวจสอบ สัณฐานวิทยาของผิวที่แตกหักด้วยเทคนิค TEM และ SEM พบว่า ออร์แกนโอเคลย์มีการกระจายตัว เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ และค่ามอดูลัสของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อ ปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นถึง 5 phr จะไม่มีผลต่อค่าความต้าน แรงดึง แต่ถ้าใส่เคลย์มากขึ้นกลับทำให้ค่านี้ลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเติมออร์แกนโอเคลย์เข้าไปจะมีผลทำให้อุณหภูมิสลายตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่าง NR/EVA เพิ่มขึ้นอีกด้วย