

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต (Polymer – Clay Nanocomposites)

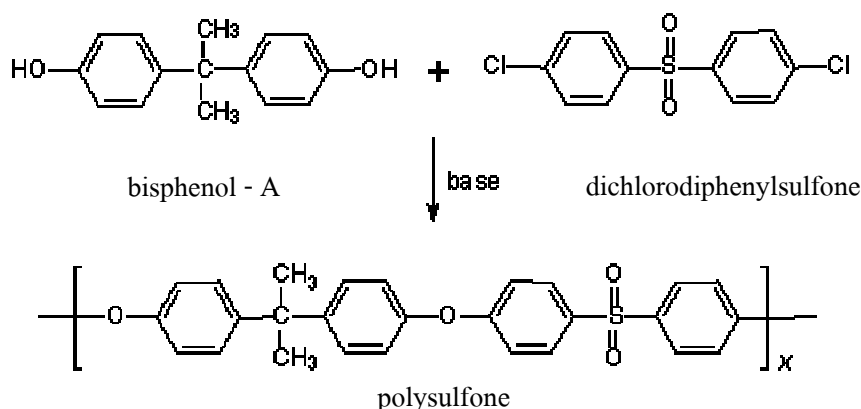
พอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ผสมหรือคอมพาวด์ที่มีองค์ประกอบของอนุภาคขนาดเล็กมากในระดับนาโน (ขนาด 10^{-9} m) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าสารตัวเติม (fillers) ทั่วไปในพอลิเมอร์หลายร้อยเท่าถึงหลายหมื่นเท่า โดยใช้อนุภาคดินเหนียวที่มีโครงสร้างขนาดเล็กมากเป็นสารตัวเติม ตัวอย่างดินเหนียวกลุ่มต่างๆ ในธรรมชาติ (ภาคผนวก ก) เช่น เนโซซิลิเกต (nesosilicates) โซโรซิลิเกต (sorosilicates) ไซโคลซิลิเกต (cyclosilicates) อีโนซิลิเกต (inosilicates) ฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicates) และเทคโทซิลิเกต (tectosilicates) เป็นต้น (<http://www.mindat.org>) แต่ดินเหนียวที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ คือ ดินเหนียวกลุ่มฟิลโลซิลิเกต สามารถแบ่งชนิดของดินเหนียวในกลุ่มนี้ได้อีกหลายชนิดตามลักษณะการจัดเรียงตัวตามโครงสร้างทางเคมี เช่น เกาลินไนท์ (kaolinite) มอนท์โมริลโลไนท์ (montmorillonite, MMT) ซาโปไนท์ (saponite) และอิลไลท์ (illite) เป็นต้น (Ray *et al.*, 2003; ไพบูลย์, 2546)

ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โครงสร้างเป็นแผ่นบางเรียงตัวเป็นชั้นๆ ซ้อนทับกัน ความกว้างหรือความยาวของแผ่นโครงสร้างมีขนาดประมาณ 1 μm และหนาประมาณ 1 nm ทำให้อนุภาคดินเหนียวชนิดนี้มีค่าอัตราส่วนขนาด (aspect ratio) ซึ่งคำนวณค่าได้จากความยาวของวัตถุที่ขยายยาวขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ที่มีค่าสูง การมีค่าอัตราส่วนขนาดสูงเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงพื้นที่ผิวสัมผัสและประสิทธิภาพของการผสมเพื่อเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์หรือเพิ่มสมบัติเชิงกลให้มากขึ้น โครงสร้างของดินเหนียวชนิดนี้สามารถขยายระยะห่างระหว่างชั้น (d - spacing) ได้แบบไม่จำกัดและบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียวแสดงประจุลบเกิดขึ้น ทำให้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออนของสารอื่นได้ โครงสร้างระดับนาโนของชั้นดินเหนียวจะนำไปสู่การปรับปรุงสมบัติ หรือสร้างพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีความโดดเด่นด้านกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการทนความร้อน ความคงรูป สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติความโปร่งแสง และการสกัดกั้นก๊าซต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น (Alexandre *et al.*, 2001; กลุ่มวิศวกรรมพลาสติกเอ็มเทค, 2547)

2.2 พอลิซัลโฟน (Polysulfone, PSF)

2.2.1 โครงสร้างทางเคมี (Smith, 2547)

พอลิซัลโฟนเกิดจากการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerizations) ระหว่างบิสฟีนอล - เอ (bisphenol - A) และไดคลอโรไดฟีนิลซัลโฟน (dichloro diphenylsulfone) ปฏิกิริยาการสังเคราะห์และโครงสร้างทางเคมีของพอลิซัลโฟนแสดงในรูปที่ 2.1



เมื่อ x คือ หน่วยซ้ำ มีค่าระหว่าง 50 – 80

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์และโครงสร้างทางเคมีของพอลิซัลโฟน (Fried, 2003)

2.2.2 สมบัติของพอลิซัลโฟน

2.2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

พอลิซัลโฟนในทางการค้ามีอยู่ด้วยกันหลายชนิด สามารถแบ่งชนิดได้ตามน้ำหนักโมเลกุล ตัวอย่างพอลิซัลโฟนชนิดต่างๆ เช่น Udel[®] P-1700 Udel[®] P-1800 และ Udel[®] P-3500 เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-1700 โดยโครงสร้างของพอลิซัลโฟนประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนหลายวงส่งผลให้โครงสร้างมีความเคาะสูง เมื่อมีการจัดเรียงสายโมเลกุลจึงไม่สามารถพับทบให้เป็นระเบียบได้ โครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous polymer) ไม่มีความเป็นผลึกภายในโครงสร้าง เมื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทำให้มีลักษณะใสและมีความเหนียวสูง ทนทานต่อแรงกระทำได้ดี มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรงสูง และคงทนต่อสภาวะแวดล้อม สมบัติทางกายภาพของพอลิซัลโฟนแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของพอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-1700

สมบัติทางกายภาพ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย SI	ผลการทดสอบ
Density	ASTM D 792	g/cm ³	1.24
Water Absorption, 24 h @ 23°C	ASTM D 570	%	0.3
Melt Flow Index (343°C, 2.16 kg)	ASTM D 1238	g/10 min	5.0 - 9.0
Molecular Number Average, 10 ³	GPC		18.6
Molecular Weight Average, 10 ³	GPC		66
Polydispersity			3.5

ที่มา : Udel[®] polysulfone Design Guide

2.2.2.2 สมบัติความต้านทานสารเคมี

พอลิซัลโฟนจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความต้านทานสารเคมีสูง เสถียรในช่วง pH กว้าง ตั้งแต่ 2 - 13 ทนทานต่อสารเคมี สารละลายกรด สารละลายเกลือ สารประกอบอัลคาไล สารละลายคลอรีน น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบนซิน แอลกอฮอล์ และโอโซน เป็นต้น เสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเสถียรต่อปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสในสารละลายกรดและเบส เนื่องจากโครงสร้างของพอลิซัลโฟน มีพันธะออกซิเจนระหว่างวงแหวนเบนซีนจึงทำให้เสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ข้อด้อยของพอลิซัลโฟน คือ ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และตัวทำละลายกลุ่มไดโพลาร์อะโพรติก ดังนั้นตัวทำละลายดังกล่าวเหมาะสมสำหรับกระบวนการเตรียมพอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคสารละลาย สมบัติความต้านทานสารเคมีของพอลิซัลโฟนแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความต้านทานสารเคมีของพอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-1700

ประเภทตัวทำละลาย	ตัวอย่างตัวทำละลาย	ผลการทดสอบ
Aliphatic hydrocarbons	n-butane, iso-octane	E
Aromatic hydrocarbons	benzene, toluene	A
Alcohols	ethanol, isopropanol	E
Ketones	acetone, methyl ethyl ketone	A
Esters	ethyl acetate	A
Chlorinated hydrocarbons	1.1.1 trichloroethane, chloroform	A
Non - oxidizing acids	sulfuric acid (20%), acetic acid (20%)	E
Bases	sodium hydroxide, potassium hydroxide	E

หมายเหตุ : E คือ ต้านทานสารเคมีได้

A คือ ไม่ต้านทานสารเคมี

2.2.2.3 สมบัติด้านการละลาย

พอลิซัลโฟนโดยโครงสร้างทางเคมีจัดเป็นโมเลกุลมีขั้ว ดังนั้นตัวทำละลายที่ใช้ในการละลายพอลิซัลโฟนต้องเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วเช่นกัน และค่าการละลายต้องมีค่าใกล้เคียงกัน จึงจะทำให้การละลายเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ตัวทำละลายที่เหมาะสมกับพอลิซัลโฟน คือ ตัวทำละลายที่มีขั้วสูงพวกไดโพลาร์อะโพติก เช่น ไดมethylฟอร์มมาไมด์ (dimethyl formamide, DMF) ไดมethylอะซีตาไมด์ (dimethyl acetamide, DMAc) และเมทิลไพร์โรลิโดน (n-methyl pyrrolidone, NMP) เป็นต้น ค่าความสามารถในการละลายของพอลิซัลโฟนและตัวทำละลายชนิดต่างๆแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิซัลโฟนและตัวทำละลายชนิดต่างๆ

(Hansen Solubility Parameters of Representative Liquids at 25 °C)

Solvent	Solubility parameters at 25°C, (J/cm ³) ^{1/2}			
	δ_d	δ_p	δ_h	δ_t
PSF	21.3	5.8	4.3	22.5

DMF	17.4	13.7	11.3	24.8
DMAc	16.8	11.5	10.2	22.7
NMP	18.0	12.3	7.2	23.0
Water	15.5	16.0	42.4	47.9

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

Solvent	Solubility parameters at 25°C, (J/cm ³) ^{1/2}			
	δ_d	δ_p	δ_h	δ_t
Acetone	15.5	10.4	7.0	20.1
Chloroform	11.0	13.7	6.3	18.7
Ethanol	15.8	8.8	19.4	26.6
Methanol	15.1	12.3	22.3	29.7
Toluene	18.0	1.4	2.0	18.2

เมื่อ δ_d = solubility parameter of nonpolar interaction, δ_p = solubility parameter of polar interaction,
 δ_h = solubility parameter of hydrogen bonding, δ_t = total solubility parameter ($\delta_t = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2$)

ที่มา : www.taminco.com

2.2.2.4 สมบัติเชิงกล

โครงสร้างของพอลิซัลโฟนประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนจำนวนสี่วงแหวน ส่งผลให้โมเลกุลหมุนได้ยากและมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง แข็งแรงและไม่โค้งงอได้ง่าย ส่วนออกซิเจนอะตอมที่อยู่ระหว่างวงแหวนเบนซีนที่ตำแหน่งพารา ส่งผลให้โมเลกุลอ่อนตัวและทนต่อแรงกระแทกได้ดี สมบัติของพอลิซัลโฟนที่พิเศษต่องานวิศวกรรมคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 174°C (345°F) และความดัน 2.45 psi (1.68 MPa) โมเลกุลจึงจะอ่อนตัวและสามารถใช้งานได้นานที่อุณหภูมิสูงในช่วง 150°C - 174°C (300 - 345°F) พอลิซัลโฟนเป็นเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรมที่มีค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) สูงถึง 10.2 psi (\cong 70 MPa) และมีโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเมื่อให้แรงกระทำมากขึ้นต่ำและมีความทนทานต่อการยืดได้ดี สมบัติเชิงกลของพอลิซัลโฟนด้านอื่นๆแสดงในตารางที่ 2.4

2.2.2.5 สมบัติทางความร้อน

วงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของพอลิซัลโฟน เชื่อมต่อพันธะกันอย่างแข็งแรง ด้วยออกซิเจนอะตอมและซัลเฟอร์อะตอม ส่งผลให้โครงสร้างมีความเกาะกันสูง เมื่อได้รับความร้อน

การนำพาความร้อนและการกระจายความร้อนเกิดขึ้นได้ยาก พอลิซัลโฟนจึงทนความร้อนได้ดีและมีความเสถียรทางความร้อนสูง ต้องใช้พลังงานในกระบวนการทำลายพันธะมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) มีค่าสูงประมาณ $180^{\circ}\text{C} - 190^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิการเสื่อมสลายของโครงสร้างของพอลิซัลโฟน (decomposition temperature, T_d) สูงกว่า 500°C สมบัติทางความร้อนของพอลิซัลโฟนแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-1700

สมบัติเชิงกล	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย SI	ผลการทดสอบ
Tensile Strength at Yield	ASTM D 638	psi	10,200
		MPa	70
Tensile Strength at Break	ASTM D 638	psi	8,500
		MPa	59
Tensile Elongation at Yield	ASTM D 638	%	5.7
Tensile Elongation at Break	ASTM D 638	%	50 - 100
Tensile Modulus	ASTM D 638	kpsi	360
		MPa	2,480
Flexural Strength	ASTM D 790	psi	15,400
		MPa	106
Flexural Modulus	ASTM D 790	kpsi	390
		MPa	2,690

ที่มา : Udel[®] polysulfone Design Guide

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-1700

สมบัติทางความร้อน	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย SI	ผลการทดสอบ
-------------------	-----------------	----------	------------

Glass Transition Temperature	ASTM D 3418	°C	180 - 190
Heat Deflection Temperature 264 psi (1.8 MPa)	ASTM D 648	°C	174
Relative Thermal Index	UL-746B	°C	160

ที่มา : Udel[®] polysulfone Design Guide

2.3 ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite, MMT)

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนผสมที่เป็นของแข็ง น้ำ และอากาศ ในส่วนที่เป็นของแข็งประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุประมาณ 1 – 5% โดยน้ำหนัก ส่วนอีก 95 – 99 wt% เป็นอนินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยธาตุต่างๆเป็นองค์ประกอบหลักดังต่อไปนี้

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| - ออกซิเจนอะตอม (O) | - ซิลิกาอะตอม (Si) |
| - อะลูมิเนียมอะตอม (Al) | - เหล็ก (Fe) |
| - แคลเซียมอะตอม (Ca) | - โซเดียมอะตอม (Na) |
| - โพแทสเซียมอะตอม (K) | - แมกนีเซียมอะตอม (Mg) |

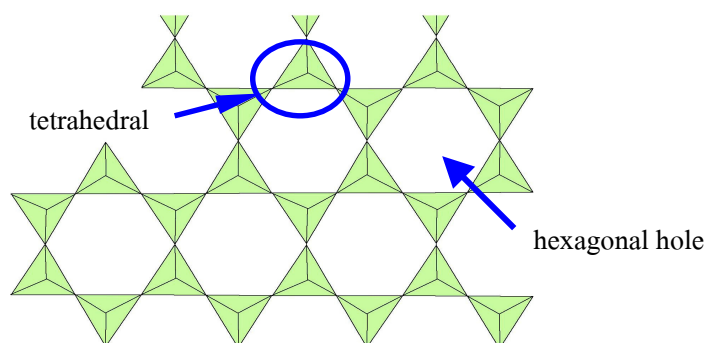
นอกจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างและธรรมชาติของแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่เรียกว่า “พันธะเคมี” เป็นตัวกำหนดที่สำคัญของสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินเหนียว (ไพบูลย์, 2546)

2.3.2 หน่วยโครงสร้างพื้นฐาน

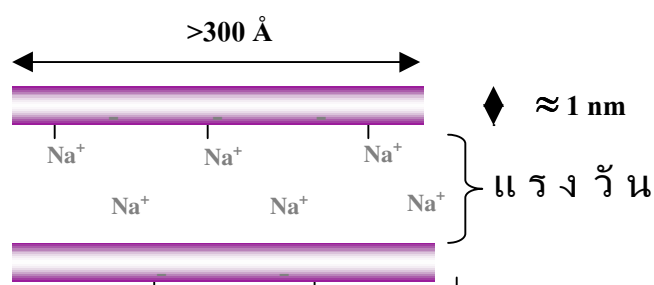
โครงสร้างของดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ ประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ 2 หน่วย ดังนี้

- (ก) หน่วยของซิลิกาเตตระฮีดรอล (silica - oxygen tetrahedral (SiO_4))

ซิลิกาเตตระฮีดรอลประกอบด้วยซิลิกาแคทไอออน (Si^{4+}) 1 อะตอม เป็นอะตอมกลางล้อมรอบด้วยออกซิเจนแอนไอออน (O^{2-}) 4 อะตอม ในลักษณะที่สมมาตรโดย O^{2-} แต่ละไอออนอยู่ห่างจากซิลิกอนเป็นระยะทางเท่าๆกัน ดังรูปที่ 2.2 (a) และถ้าลากเส้นตรงระหว่างจุดศูนย์กลางของออกซิเจนแต่ละไอออนถึงกัน จะทำให้เกิดคาน้ำตัดสามเหลี่ยมด้านเท่าเหมือนกันทั้งสี่ด้านรอบซิลิกอนที่อยู่ใจกลางเกิดเป็นโครงสร้างเรียกว่า เตตระฮีดรอล (tetrahedral) ดังรูปที่ 2.2 (b)



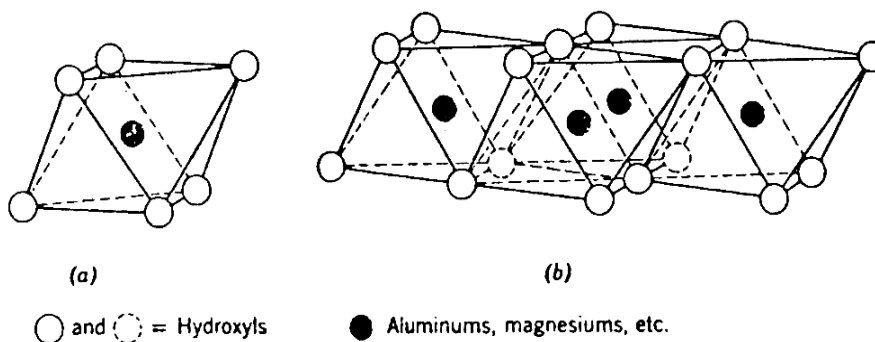
รูปที่ 2.3 โครงสร้างแผ่นแฮกซะโกนอลและช่องว่าง (Sivakugan, 2001)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของชั้นดินเหนียว (Sivakugan, 2001)

(ข) หน่วยของอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล (aluminium octahedral (Al(OH)₆⁻³))

อะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลประกอบด้วยอะลูมิเนียม 1 อะตอม และออกซิเจน 6 อะตอม อะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลหนึ่งหน่วยจะมีอิเล็กตรอนที่เหลือของออกซิเจน ทำให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงกับอิเล็กตรอนของออกซิเจนในอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลข้างเคียงได้ เกิดการเชื่อมต่อพันธะกันเป็นแผ่นยาวต่อเนื่อง เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า แผ่นออกตะฮีดรอล (octahedral) โครงสร้างของแผ่นอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล ประกอบด้วยออกซิเจนและไฮดรอกซีแอนไอออน (hydroxyl anion (OH⁻)) มีอะตอมกลางคือ Al³⁺, Mg²⁺, Fe³⁺ หรือ Fe²⁺ อยู่ภายในโครงสร้าง แต่ละแผ่นออกตะฮีดรอลเชื่อมติดกันด้วยอิเล็กตรอนของออกซิเจนที่ไม่ได้เกิดพันธะ ดังรูปที่ 2.5 การจัดเรียงโครงสร้างแบบแผ่นออกตะฮีดรอลอาจเรียกอีกชื่อได้ว่า แผ่นกิบไซท์ (gibbsite sheet)

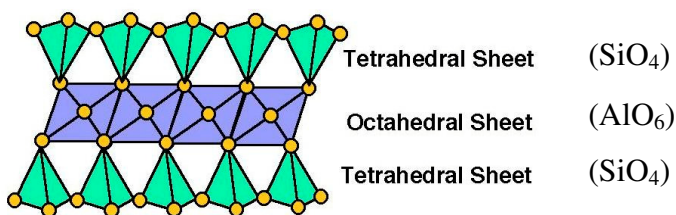


รูปที่ 2.5 (a) หน่วยของอะลูมิเนียมออกไซด์รอลหนึ่งหน่วย (b) การเกิดพันธะระหว่างแผ่นออกไซด์รอล (www.ethomas.web.wesleyan.edu)

2.3.3 ชนิดและรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้าง

ดินเหนียวกลุ่มฟิลโลซิลิเกตโดยปกติสามารถจำแนกได้ 2 กลุ่มหลัก แบ่งตามจำนวนชั้นของโครงสร้างการจัดเรียงตัวระหว่างแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอล และแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์รอล คือ การจัดเรียงโครงสร้าง แบบ 1 : 1 และแบบ 2 : 1

ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์จัดอยู่ในการจัดเรียงโครงสร้างแบบ 2 : 1 แต่ละชั้นของดินเหนียวประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอลจำนวนสองแผ่นมีสูตรคือ $(Si_8O_{20})^{8-}$ ต่อหน่วยเซลล์ ประกบเชื่อมยึดติดกับอะลูมิเนียมออกไซด์รอลจำนวนหนึ่งแผ่น ซึ่งอยู่ระหว่างกลางแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอลสองแผ่น ในการเชื่อมยึดพันธะระหว่างกันพบว่า แต่ละหน่วยของแผ่นเตตระฮีดรอลจะใช้เอพิคอดออกซิเจน (apical O) ไปแทนที่ไฮดรอกซีแอนไอออน (OH⁻) ของแผ่นออกไซด์รอลส่งผลให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นยึดติดกันอย่างแข็งแรง และบริเวณผิวหน้าของชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอลยังคงแสดงประจุลบเกิดขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนของออกซิเจนอะตอมในแผ่นเตตระฮีดรอลที่ไม่ได้เกิดพันธะกับอะตอมใกล้เคียง ลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างแบบ 2 : 1 แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงโครงสร้างแบบ 2 : 1 ของมอนท์โมริลโลไนท์ (Sivakugan, 2001)

การจัดเรียงโครงสร้างแบบ 2 : 1 ของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ มีสมบัติพิเศษอีกด้านหนึ่งคือ โครงสร้างเป็นแบบขยายตัวได้อย่างอิสระ (freely expanding type) โดยผลรวมของประจุลบทั้งในแผ่นเตตระฮีดรอล และแผ่นออกตะฮีดรอลมีปริมาณต่ำสุดในบรรดาดินเหนียวประเภท 2 : 1 ด้วยกัน คือ อยู่ในช่วงประมาณ 0.5 - 1.2 ต่อเซลล์หน่วย ทำให้แรงดึงดูดระหว่างประจุลบดังกล่าวกับแคทไอออนภายในระหว่างชั้นเป็นแรงที่อ่อนมาก จากแรงดึงดูดที่อ่อนมากในโครงสร้างดังกล่าวนี้ ทำให้ชั้นของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์สามารถยืดหดตัวและขยายตัวได้อย่างอิสระเต็มที่และระยะห่างระหว่างชั้น (d - spacing) มีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแคทไอออนและหมู่แทนที่แคทไอออน (Pinnavaia and Beall, 2001)

2.3.4 ค่าการแลกเปลี่ยนแคทไอออน

โครงสร้างของชั้นดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์บริเวณผิวหน้าของชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอลแสดงประจุลบ เกิดจากอิเล็กตรอนที่เหลือของออกซิเจนอะตอมที่ไม่ได้เกิดพันธะกับอะตอมใกล้เคียง ทำให้แอนไอออนบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียวสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับแคทไอออนอื่นๆได้ ลักษณะของประจุลบบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียวแสดงในรูปที่ 2.7 โดยแคทไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนประจุต้องมีประจุที่เหมาะสมกับแอนไอออนบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแอนไอออนกับแคทไอออนสามารถรายงานได้ในรูปของความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน (*cation exchange capacity, CEC*) ในระบบ SI มักใช้หน่วยเป็น cmol.kg^{-1} ($c = \text{centi} = 10^{-2}$) ซึ่งเท่ากับ meq ต่อดินเหนียว 100 g ค่า CEC ของมอนท์โมริลโลไนท์ผันแปรได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโครงสร้าง และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประจุภายในโครงสร้าง เช่น ความเป็นกรด - เบส ค่า pH ที่เหมาะสม ความสามารถในการดูดซับไอออน ขนาดและประจุของแคทไอออน และความสมดุลในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน เป็นต้น ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของดินเหนียวในกลุ่มฟิลโลซิลิเกตแสดงในตารางที่ 2.6 พบว่า ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุด ประมาณ 70 - 120 meq ต่อดินเหนียว 100 g และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงประมาณ 700 - 750 m^2/g ซึ่งความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงแสดงว่าสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคทไอออนอื่นๆได้ดี และการมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจะช่วยให้ชั้นของดินเหนียวสามารถสัมผัสกับสารอื่นๆได้มากขึ้น (Grim, 1968; <http://www.tulane.edu>)

หน่วยในระบบ SI ของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 แบบ คือ cmol.kg^{-1} และ $\text{meq}/100 \text{ g}$ สามารถแปลงหน่วย cmol.kg^{-1} เป็นหน่วย $\text{meq}/100 \text{ g}$ ได้ดังนี้

$$\text{cmol.kg}^{-1} = \text{meq}/100 \text{ g}$$

$$10^{-2} \text{ mol}/1000 \text{ g} = \text{meq}/100 \text{ g}$$

$$10^{-5} \text{ mol}/\text{g} = \text{meq}/100 \text{ g}$$

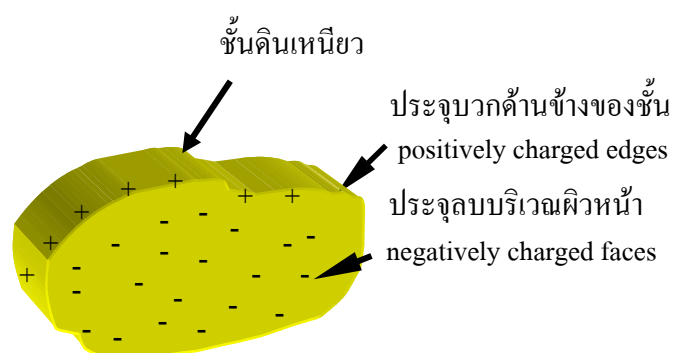
ดังนั้น meq มีค่าเท่ากับ $10^{-3} \text{ mol}/\text{g}$ หรือเท่ากับ mmol/g

เมื่อ $c = \text{centi}$ (10^{-2}) และ $m = \text{milli}$ (10^{-3})

ตารางที่ 2.6 พื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของดินเหนียวชนิดต่างๆ

ชนิดดินเหนียว	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	CEC ($\text{meq}/100 \text{ g MMT}$)
Kaolinite	10 - 20	3 - 10
Illite	80 - 100	20 - 30
Montmorillonite	800	70 - 120
Chlorite	80	20 - 30

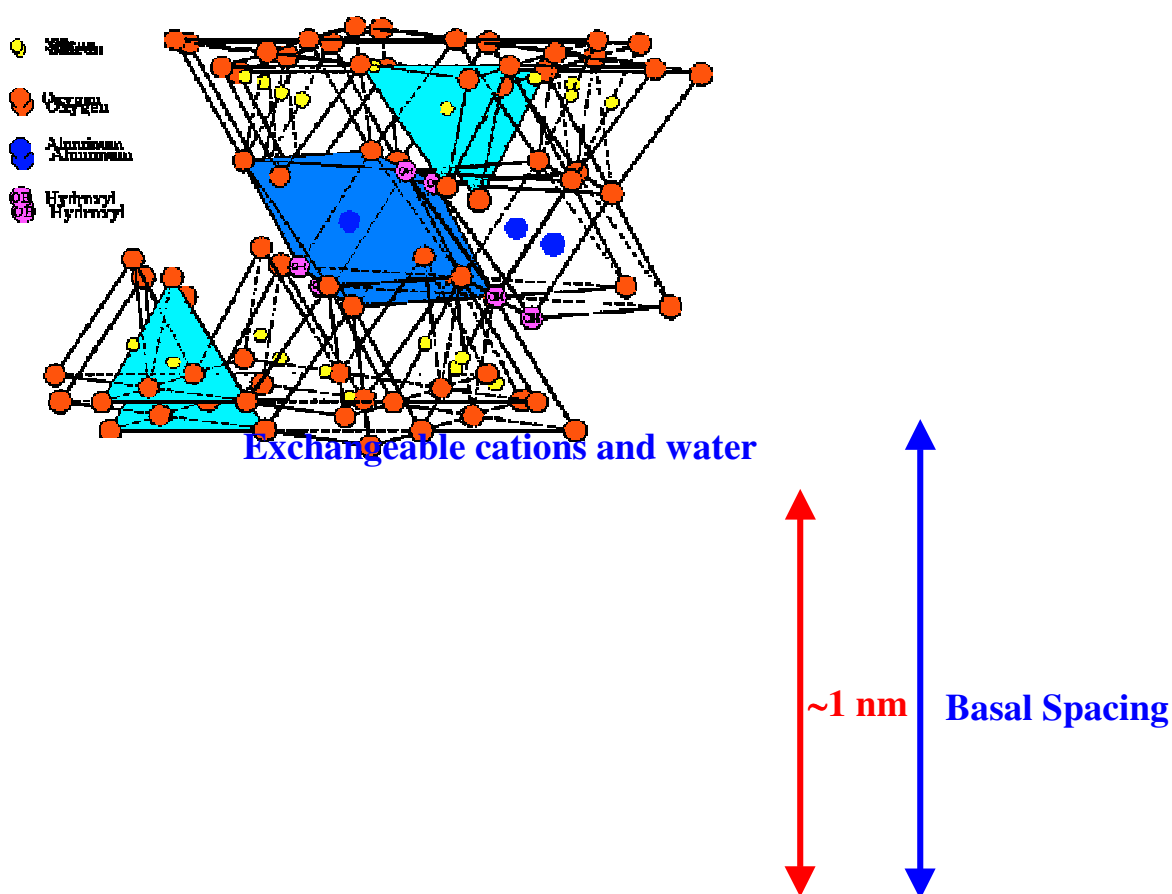
ที่มา : <http://www.state.as.us/agc/clay.html>



รูปที่ 2.7 พื้นผิวและประจุลบบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว (Sivakugan, 2001)

2.3.5 สมบัติทางกายภาพ

มอนต์โมริลโลไนท์โดยโครงสร้างมีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งภายในและภายนอกระหว่างชั้นสูงประมาณ $800 \text{ m}^2/\text{g}$ พื้นที่ผิวสัมผัสบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียวแสดงประจุลบ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคตไอออนของสารอื่นๆ ได้ สูตรโครงสร้างทางเคมีของมอนต์โมริลโลไนท์อย่างง่ายมีดังนี้ $M_x(\text{Al}_{4-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ เมื่อ x คือ ระดับชั้นของการแทนที่ (degree of isomorphous substitution) (มีค่าระหว่าง 0.5 - 1.3) และ M คือ แคตไอออนของอะตอมกลาง (Alexandre *et al.*, 2000) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 540.46 g/mol ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.35 g/cm^3 (www.READE.com) โครงสร้างอนุภาคมีความหนาประมาณ 1 nm มีความยาวประมาณ $1 \mu\text{m}$ ทำให้อนุภาคมีค่าอัตราส่วนขนาด (aspect ratio) สูงมากมีค่าประมาณ 1,000 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นผลึกซ้อนทับกันหลายๆชั้นระหว่างชั้นยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ลักษณะทางกายภาพเป็นผงดินเหนียวสีขาว โครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ 2 : 1 ของมอนต์โมริลโลไนท์แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ 2 : 1 ของมอนต์โมริลโลไนท์ (Ray *et al.*, 2003)

ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์กำลังได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน เพราะเหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น จึงมีการจำหน่ายในทางการค้ามากขึ้นทั้งที่มีการปรับสภาพโครงสร้างและไม่มี การปรับสภาพโครงสร้าง มอนท์โมริลโลไนท์มีชื่อทางการค้าคือ “เบนโทไนท์ (bentonite)” ตั้งชื่อตามบุคคลที่ค้นพบดินเหนียวชนิดนี้คือ “ฟอรัท เบนตัน (Fort Benton)” เขาศึกษาดินเหนียวชนิดนี้ซึ่งเป็นดินเหนียวที่อยู่ในยุคครีเทเชียสเป็นหินยุคไครโนเสาร์ (cretaceous rocks) ภายในเมืองไวโอมิง (Wyoming) มลรัฐมิชิแกนทางภาคตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศอเมริกา จากการค้นพบทำให้มอนท์โมริลโลไนท์มีชื่อได้หลายชื่อ ทั้งชื่อทางการค้าและชื่อที่แบ่งจากโครงสร้างทางเคมี ตัวอย่างชื่อทางเคมี เช่น montmorillonite, smectite, nanoclay, sodium montmorillonite, calcium montmorillonite เป็นต้น ส่วนชื่อทางการค้า เช่น sodium bentonite (Wyoming bentonite (US), swelling bentonite (Western bentonite (US)), sodium-activated bentonite (Bentonite (UK)) เป็นต้น (<http://www.READE.com>, 2005)

2.4 ดินเหนียวปรับสภาพ (Organoclay)

การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ และอนุภาคดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์เป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากสมบัติทางเคมีของมอนท์โมริลโลไนท์มีความเป็นขั้ว จึงไม่สามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ทั่วไปได้ซึ่งมีความเป็นขั้วน้อยมากหรือไม่มีเลย ทำให้อนุภาคของมอนท์โมริลโลไนท์รวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไม่สามารถกระจายในพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของมอนท์โมริลโลไนท์ยังมีลักษณะเป็นแผ่นๆวางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นที่สม่ำเสมอและมีค่าน้อยมาก ($\approx 1.1 - 1.5$ nm) ระหว่างชั้นยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อนๆ ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในระหว่างชั้นได้ จึงต้องมีการปรับสภาพดินเหนียวเพื่อให้มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้น โดยการเติมโมเลกุลของสารอินทรีย์จำพวกสารลดแรงตึงผิวเข้าไปภายในระหว่างชั้นดินเหนียว เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแอนไอออนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว และแคทไอออนของสารลดแรงตึงผิว แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของมอนท์โมริลโลไนท์ช่วยทำให้การยึดติดระหว่างเฟสของพอลิเมอร์และพื้นผิวของอนุภาคดินเหนียวเกิดได้ดีขึ้น และเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเตรียมพอลิ

เมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคต่างๆ (Alexandre *et al.*, 2000; Ray *et al.*, 2003; Pospisil *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2003) ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมแคทไอออน (Na^+) และแคทไอออนของสารลดแรงตึงผิวแสดงในรูปที่ 2.9

เมื่อ $d_0 = d$ - spacing เริ่มต้น
 $d = d$ - spacing หลังการเกิดการแลกเปลี่ยนแคทไอออน

รูปที่ 2.9 การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ และแคทไอออนของสารลดแรงตึงผิว

2.4.1 การขยายระยะห่างระหว่างชั้น

การขยายระยะห่างระหว่างชั้นขึ้นอยู่กับการจัดเรียงโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่เข้าไปแทนที่โซเดียมแคทไอออน (Na^+) การแทนที่ไอออนของสารลดแรงตึงผิวบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียวแบ่งเป็น 3 แบบ คือ การแทนที่แบบเบาบาง (lower coverage) การแทนที่แบบปานกลาง (medium coverage) และการแทนที่แบบหนาแน่น (high coverage) การแทนที่แบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.10

การแทนที่แบบเบาบาง คือ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียวมีปริมาณน้อย เมื่อมีการจัดเรียงโมเลกุลภายในระหว่างชั้นดินเหนียว โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถจัดเรียงโมเลกุลได้อย่างอิสระ เพราะมีพื้นที่ภายในระหว่างชั้นมากเพียงพอสำหรับการจัดเรียงโมเลกุลจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินเหนียว ทำให้ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของชั้นดินเหนียวมีการขยายต่ำ และโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ภายในระหว่างชั้นดินเหนียวนั้นสามารถจัดเรียงโครงสร้างแบบพับทบไปมาได้ดังรูปที่ 2.10 (a) (He *et al.*, 2005; Ray *et al.*, 2003; Paul *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2003)

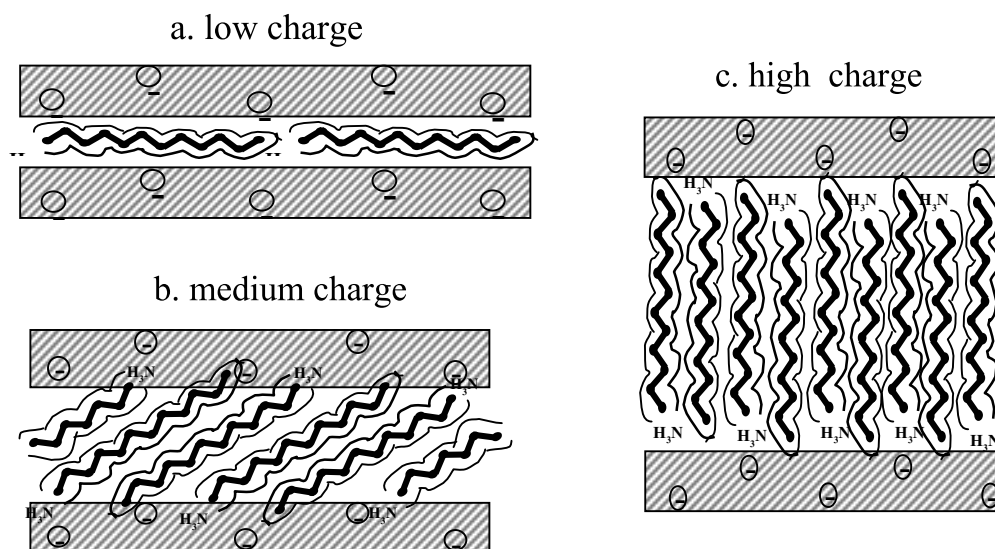
การแทนที่แบบหนาแน่น จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวขยายกว้างขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวต้องการจัดเรียงโมเลกุลให้มีอิสระ เมื่อมีโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

แลกเปลี่ยนกับแอนไอออนเป็นจำนวนมากที่บริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว โมเลกุลจำเป็นต้องยึดออกเพื่อลดความเครียดภายในโมเลกุล การจัดเรียงโมเลกุลไปในทิศทางเดียวกันในแนวตั้ง ส่งผลให้แรงวันเตอร์วาล์วระหว่างชั้นอ่อนลง ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวจึงกว้างขึ้นดังรูปที่ 2.10 (c)

การคำนวณปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนแคทไอออน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.1 (Yeh *et al.*, 2003)

$$CEC \times Y \times Z = (X / M_w \text{ of Intercalating agent}) \times 1000 \quad (2.1)$$

เมื่อ	CEC	=	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่อ 100 g ของ MMT
	Y	=	ปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ (g)
	Z	=	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว
	X	=	ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (g)
	M_w	=	น้ำหนักโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว



รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (a) การแทนที่แบบเบาบาง (lower coverage) (b) การแทนที่แบบปานกลาง (medium coverage) (c) การแทนที่แบบหนาแน่น (high coverage) (Grim, 1968)

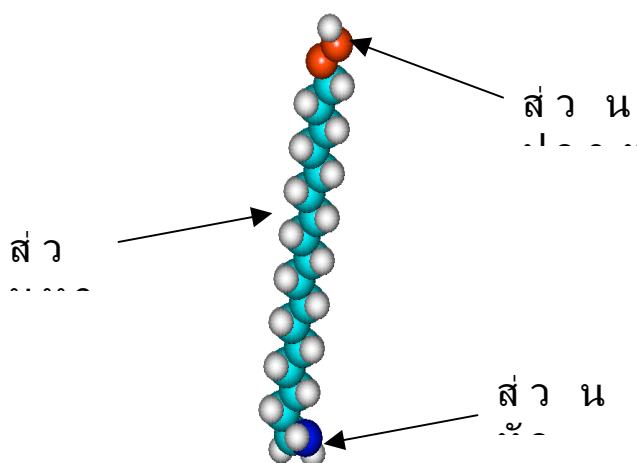
2.4.2 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพ และกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต สารลดแรงตึงผิวประกอบด้วยส่วนสำคัญทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนหัว (attachment) ส่วนหาง (bulk) และส่วนปลาย (surface) โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวแสดงในรูปที่ 2.11

1. ส่วนหัว เป็นส่วนสำคัญในการแทนที่ไอออนบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว ทำหน้าที่ในการเพิ่มความเสถียร ความยืดหยุ่น ดึงดูดและยึดติดกับแอนไอออนอย่างเหนียวแน่น
2. ส่วนหาง ทำหน้าที่ในการรับแรงเฉือนและแรงกระทำ
3. ส่วนปลายทำหน้าที่ในส่วนของพื้นผิวหน้าสัมผัสในการยึดติด เชื่อมต่อและสัมผัสกับสารอื่นๆ

โมเลกุลสารลดแรงตึงผิวมีได้หลายแบบ เช่น แบบหนึ่งหาง หมายถึง มีไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวเพียงหนึ่งโมเลกุล ส่วนแบบสองหาง หมายถึง มีไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวจำนวนสองโมเลกุลมีส่วนหางสองตำแหน่ง ส่วนแบบสามหาง หมายถึง มีไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวจำนวนสามโมเลกุลมีส่วนหางสามตำแหน่ง ลักษณะของสารลดแรงตึงผิวทั้งสามชนิดแสดงในรูปที่ 2.12

โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวทำหน้าที่ในการขยายระยะห่างระหว่างชั้นให้กว้างขึ้น และเกี่ยวข้องกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ระหว่างการสังเคราะห์พอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต (เต็มศักดิ์, 2548)



รูปที่ 2.11 ลักษณะและส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิว (VV Tsukruk, 2001)



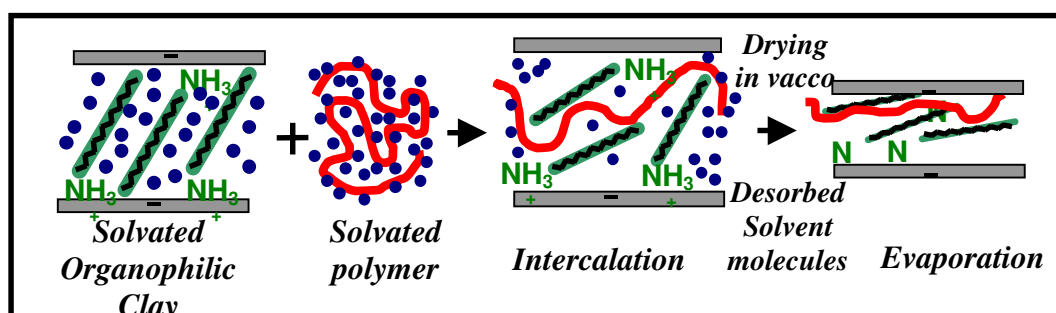
รูปที่ 2.12 ลักษณะและชนิดของสารลดแรงตึงผิว

2.5 กระบวนการเตรียมและสังเคราะห์ของพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต

2.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคสารละลาย

(Intercalation of polymer or pre-polymer from solution)

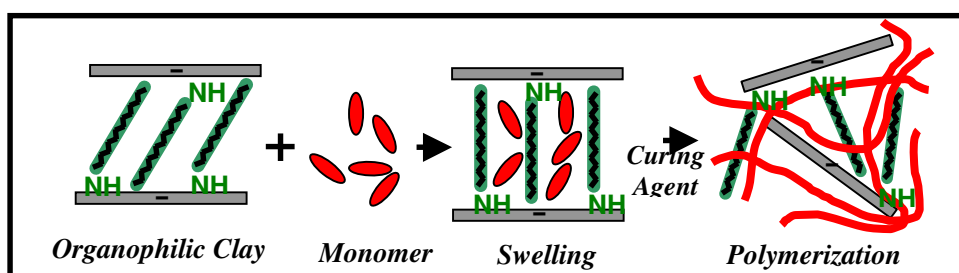
เทคนิคนี้มีตัวทำละลายเข้ามาเกี่ยวข้อง และตัวทำละลายที่เลือกใช้ต้องมีความเหมาะสมกับพอลิเมอร์และดินเหนียว ค่าการละลายต้องมีค่าใกล้เคียงกันและตัวทำละลายต้องละลายพอลิเมอร์ได้สมบูรณ์และทำให้ชั้นดินเหนียวเกิดการบวมตัว (swelling) ทำให้โครงสร้างของชั้นดินเหนียวมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่น แรงดึงดูดระหว่างชั้นดินเหนียวจึงอ่อนลง โมเลกุลของพอลิเมอร์แทรกเข้าไปภายในระหว่างชั้นของดินเหนียวได้ (Alexandre *et al.*, 2000) พอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยเทคนิคแบบนี้ เช่น พอลิอิมมิด (Zhang *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 1999; Agag *et al.*, 2001; Magaraphan *et al.*, 2001) พอลิซัลโฟน (Sur *et al.*, 2001; Yeh *et al.*, 2003) พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Hayama *et al.*, 2004) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (Baker *et al.*, 2004) เป็นต้น กระบวนการเตรียมด้วยเทคนิคนี้แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคสารละลาย

2.5.2 การเตรียมพอลิเมอร์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ (In situ intercalative polymerization)

เทคนิคการผสมแบบนี้ประกอบด้วยสามองค์ประกอบ คือ มอนอเมอร์ ดินเหนียว และตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายทำให้ชั้นดินเหนียวเกิดการบวมตัวและมอนอเมอร์เกิดการพอลิเมอร์ไรซ์เป็นพอลิเมอร์ภายในระหว่างชั้นดินเหนียว ใช้ตัวริเริ่มในการพอลิเมอร์ไรซ์ เช่น ความร้อน รังสี หรือตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์ได้ (Alexandre, 2000) ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ดังรูปที่ 2.14 พอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยเทคนิคแบบนี้ เช่น พอลิคาร์โบแลคแทม (Gorrasi *et al.*, 2003) พอลิสไตรีน (Chen *et al.*, 2001; Moet *et al.*, 1993; Okamoto *et al.*, 2000) พอลิเมทิลเมทาไครเลต (Okamoto *et al.*, 2000) พอลิเอทอกซีแอนนิลีน (Yeh *et al.*, 2002) พอลิอิมมิด (Delozier *et al.*, 2003) และพอลิแอนนิลีน (Yoshimoto *et al.*, 2004) เป็นต้น

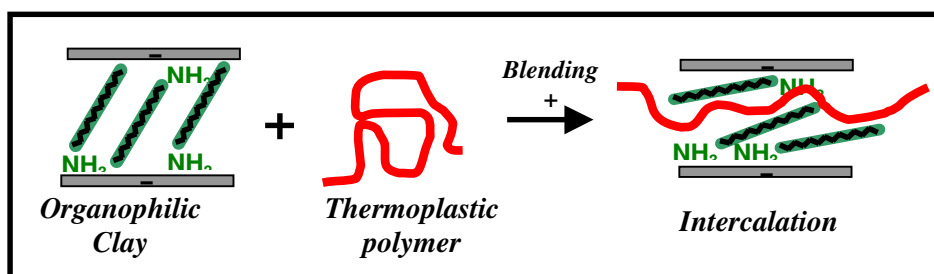


รูปที่ 2.14 การเตรียมพอลิเมอร์- ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์

2.5.3 การเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อน (Melt intercalation)

เทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อน เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้การให้ความร้อนและแรงเฉือน (ทำให้เกิดการหลอมเหลวโดยใช้ความร้อนภายใต้แรงเฉือน) แรงเฉือนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างชั้นของดินเหนียว ถ้ามีแรงเฉือนมากจะทำสูงๆ ชั้นของดินเหนียวสามารถแยกออกจากกันได้ เพราะโครงสร้างของดินเหนียวเชื่อมยึดติดระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อนๆ ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเกิดการแทรกเข้าไปภายในระหว่างชั้นดินเหนียวได้ กระบวนการ

การเตรียมด้วยเทคนิคนี้แสดงในรูปที่ 2.15 การใช้เทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อนสามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเตรียมแบบสารละลายและแบบพอลิเมอร์ไรซม่อนอเมอร์ได้ และปัจจุบันเทคนิคนี้เริ่มเป็นที่นิยมในเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น พอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยเทคนิคนี้ เช่น พอลิเอทิลีน (Hotta *et al.*, 2004; Zhai *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005; Shah *et al.*, 2006) พอลิโพรพิลีน (Zhang *et al.*, 2004; Ding *et al.*, 2004) พอลิเอไมด์ (Kim *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2003; Qin *et al.*, 2003) พอลิเอทิลีนไวไนลอะซีเตต (Tang *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2003) พอลิยูรีเทน (Xiong *et al.*, 2004) และพอลิอีเทอร์อิมมิด (Huang *et al.*, 2001) เป็นต้น



รูปที่ 2.15 การเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อน

2.6 ชนิดของโครงสร้างพอลิเมอร์ – ดินเหนียวคอมโพสิต

โครงสร้างของชั้นดินเหนียวมีขนาดเล็กและมีความหนาประมาณ 1 nm เมื่อดินเหนียวกระจายตัวภายในเนื้อพอลิเมอร์ โครงสร้างของชั้นดินเหนียวสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ อาจมีโครงสร้างแบบกระจายสม่ำเสมอทั่วเนื้อพอลิเมอร์ หรือชั้นดินเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงขยายระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปภายในระหว่างชั้นดินเหนียวได้ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินเหนียวเกิดขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในระหว่างชั้นได้ ลักษณะโครงสร้างแบบต่างๆแสดงในรูปที่ 2.16 สามารถแบ่งชนิดของโครงสร้างพอลิเมอร์ – ดินเหนียวคอมโพสิตได้ 3 แบบ ตามลักษณะการจัดเรียงอนุภาคดินเหนียว (Alexandre *et al.*, 2000; Ray *et al.*, 2003; Pinnavaia and Beall, 2001) คือ

1) ไมโครคอมโพสิต (microcomposite)

โครงสร้างของพอลิเมอร์ – ดินเหนียวคอมโพสิตแบบนี้ อนุภาคดินเหนียวไม่มีการขยายระยะห่างระหว่างชั้นเกิดขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไป

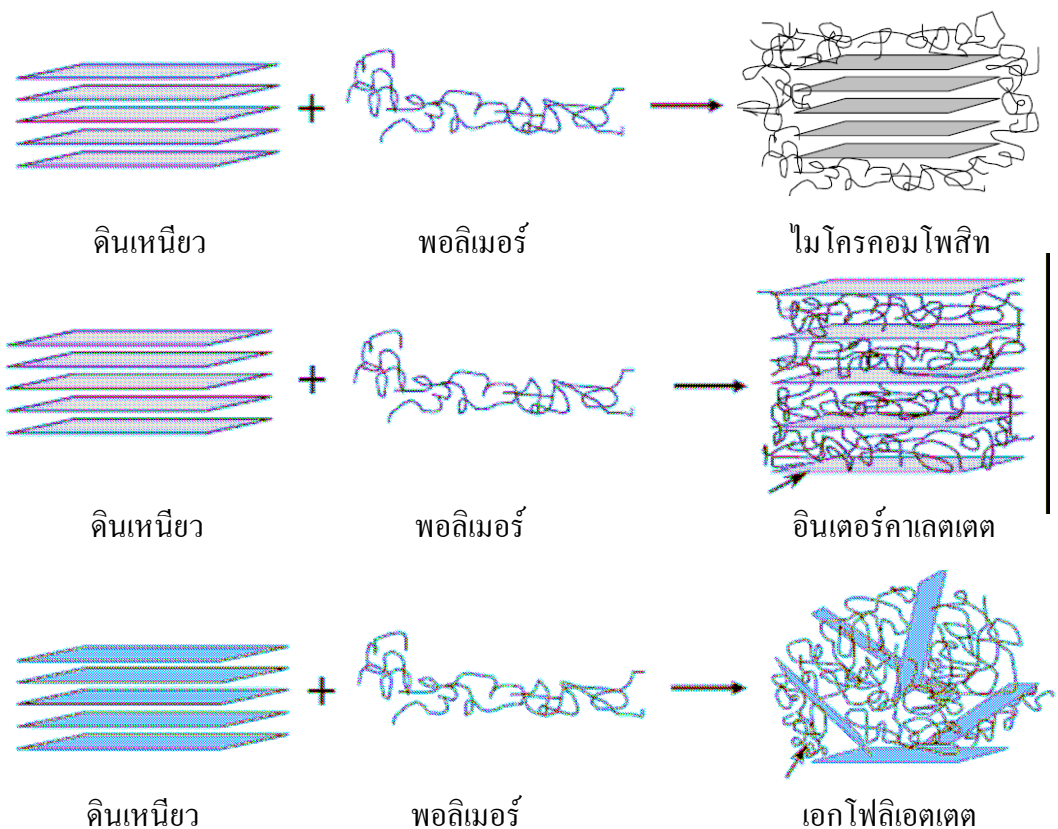
ภายในระหว่างชั้นดินเหนียวได้ และอนุภาคของดินเหนียวรวมตัวเกาะเป็นกลุ่มก้อนหลายๆชั้นภายในเนื้อพอลิเมอร์

2) อินเทอร์คาลาเตด (intercalated)

โครงสร้างของพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตแบบนี้ ชั้นดินเหนียวสามารถขยายระยะห่างระหว่างชั้นได้ เพราะโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถแทรกโมเลกุลเข้าไปภายในระหว่างชั้นดินเหนียวได้ ทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้นอ่อนลง ค่าระยะห่างระหว่างชั้นจึงเพิ่มสูงขึ้น

3) เอกโฟลิเอตเตด (exfoliated)

โครงสร้างของพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตแบบนี้ ชั้นดินเหนียวมีการขยายระยะห่างระหว่างชั้นเกิดขึ้นและชั้นดินเหนียวถูกแรงเฉือนหรือแรงกระทำ ทำให้ชั้นดินเหนียวแยกออกจากกัน ชั้นดินเหนียวที่แยกออกจะกระจายอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ

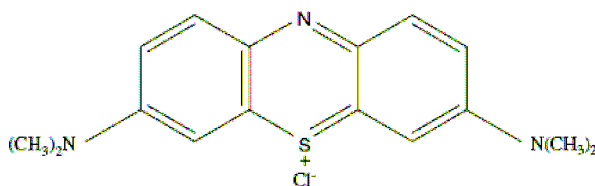


รูปที่ 2.16 ชนิดของโครงสร้างพอลิเมอร์ – ดินเหนียวคอมโพสิต (Padmanada *et al.*, 1995)

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติของดินเหนียว

2.7.1 การตรวจสอบค่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (ASTM C837-81)

การตรวจสอบค่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออน สามารถศึกษาจากค่าดัชนีเมทิลีนบลู (methylene blue index, MBI) ตามมาตรฐาน ASTM C837-81 (standard test method for methylene blue index of clay) โดยประจุลบของชั้นดินเหนียวจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออนของสารละลายเมทิลีนบลู สูตรโครงสร้างของสารละลายเมทิลีนบลูแสดงในรูปที่ 2.17 เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนสารละลายดินเหนียวเกิดการเปลี่ยนสี เนื่องจากมีการดูดซับสีของอะโรมาติกแคตไอออนิก (aromatic cationic dyes) ในโครงสร้างของเมทิลีนบลู ปฏิกิริยาทางเคมีของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารละลายดินเหนียว และสารละลายเมทิลีนบลูแสดงในสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.17 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารละลายเมทิลีนบลู (Ozacar *et al.*, 2006)



2.7.2 การตรวจสอบการบวมตัวของดินเหนียวและดินเหนียวปรับสภาพ (ASTM D5890 - 95)

ดินเหนียวในกลุ่มฟิลโลซิลิเกตตามโครงสร้างสามารถขยายระยะห่างระหว่างชั้นได้อย่างอิสระเมื่อเกิดการผสมกับตัวทำละลาย เพราะตัวทำละลายจะทำให้โครงสร้างของชั้นดินเหนียวยืดหยุ่น ระยะห่างระหว่างชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น โดยตัวทำละลายที่เลือกใช้มีความสำคัญมากในกระบวนการทดสอบการบวมตัว เพราะโครงสร้างของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์จัดเป็นโมเลกุลมีขั้ว ดังนั้นตัวทำละลายที่เลือกใช้ต้องมีขั้วเช่นเดียวกัน การตรวจสอบดัชนีการบวมตัว (swelling index) ของดินเหนียวและดินเหนียวปรับสภาพ สามารถศึกษาจากระดับปริมาตรของดินเหนียวที่มีการเปลี่ยนแปลงไปภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด ตามมาตรฐาน ASTM D5890 - 95 (Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners)

โดยค่าดัชนีการบวมตัวของดินเหนียวเลือกใช้ปริมาตรที่มีการเปลี่ยนแปลงสุดท้ายที่อ่านค่าได้ รายงานผลในหน่วย ml ต่อดินเหนียว 2 g (Burgentzle *et al.*, 2004; He *et al.*, 2006)

2.7.3 การตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้น (Pual *et al.*, 2005)

โครงสร้างของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์เป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันหลายๆชั้น และค่าระยะห่างระหว่างชั้นมีได้หลายค่า ขึ้นอยู่กับแคลทไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว ตัวอย่างดินเหนียวชนิด โซเดียม – มอนท์โมริลโลไนท์ (Na^+ - MMT) มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 1.1 – 1.2 nm ซึ่งเกิดจากชั้นดินเหนียวมีความหนาประมาณ 1.0 nm รวมกับอะตอมของโซเดียมแคลทไอออนที่มีขนาดประมาณ 0.1 – 0.2 nm (Pual *et al.*, 2005) เมื่อทำการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพ สามารถคำนวณค่าระยะห่างระหว่างชั้นได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังนี้

$$\frac{\text{Volume of organic}}{\text{Volume of MMT}} = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = \left(\frac{\text{Mass of organic}}{\text{Mass of MMT}} \right) \frac{\rho_{\text{MMT}}}{\rho_{\text{org}}} \quad (2.3)$$

$$\Delta d = d_0 \left(\frac{\rho_{\text{MMT}}}{\rho_{\text{org}}} \right) \left(\frac{\text{Mass of organic}}{\text{Mass of MMT}} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ	volume of organic	=	ปริมาตรของสารอินทรีย์
	volume of MMT	=	ปริมาตรของดินเหนียว MMT
	Mass of organic	=	ปริมาณสารอินทรีย์ในการสังเคราะห์ (g)
	Mass of MMT	=	ปริมาณดินเหนียวในการสังเคราะห์ (g)
	d	=	ค่าระยะห่างระหว่างชั้นหลังการสังเคราะห์
	d ₀	=	ค่าระยะห่างระหว่างชั้นก่อนการสังเคราะห์
	Δd	=	ค่าระยะห่างระหว่างชั้นเฉลี่ย
	ρ _{MMT}	=	ความหนาแน่นของ MMT เท่ากับ 2.35 g/cm ³
	ρ _{org}	=	ความหนาแน่นของสารอินทรีย์

ขนาดอนุภาคของชั้นดินเหนียวและสารลดแรงตึงผิวแสดงในตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.18 ดินเหนียวปรับสภาพที่มีการแลกเปลี่ยนแคทไอออนกับสารลดแรงตึงผิวโซ่ยาว (คาร์บอน 12 ตัว) มีขนาดอนุภาคจากการคำนวณประมาณ 1.83 nm ดินเหนียวปรับสภาพที่มีการแลกเปลี่ยนแคทไอออนกับสารลดแรงตึงผิวโซ่ยาว (คาร์บอน 16 ตัว) มีขนาดอนุภาคจากการคำนวณประมาณ 2.30 nm และดินเหนียวปรับสภาพที่มีการแลกเปลี่ยนแคทไอออนกับสารลดแรงตึงผิวโซ่ยาว (คาร์บอน 18 ตัว) มีขนาดอนุภาคจากการคำนวณประมาณ 2.53 nm ดังนั้นเมื่อโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างชั้นดินเหนียว จึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2.7 ขนาดอนุภาคของชั้นดินเหนียว โซเดียมไอออน และสารลดแรงตึงผิว

สาร	ขนาดอนุภาค (nm)	
ชั้นดินเหนียว	~ 1.00	~ 1.1

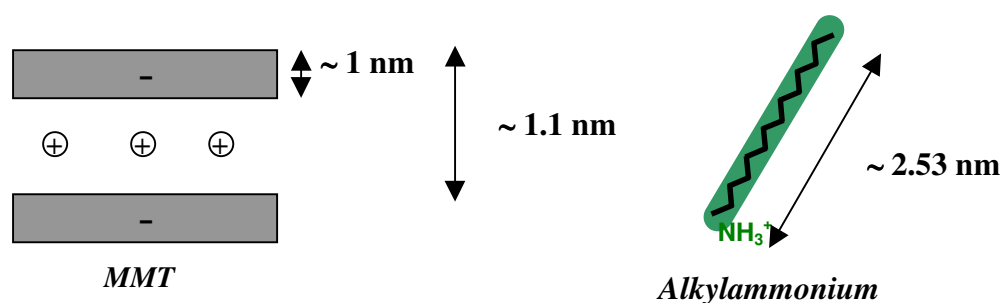
โซเดียมไอออน	~ 0.10	
NH ₃ ⁺	~ 0.43	~ 1.83

สารลดแรงตึงผิว (C ₁₂)	~ 1.40	
NH ₃ ⁺	~ 0.43	~ 2.30

สารลดแรงตึงผิว (C ₁₆)	~ 1.87	
NH ₃ ⁺	~ 0.43	~ 2.53

สารลดแรงตึงผิว (C ₁₈)	~ 2.10	

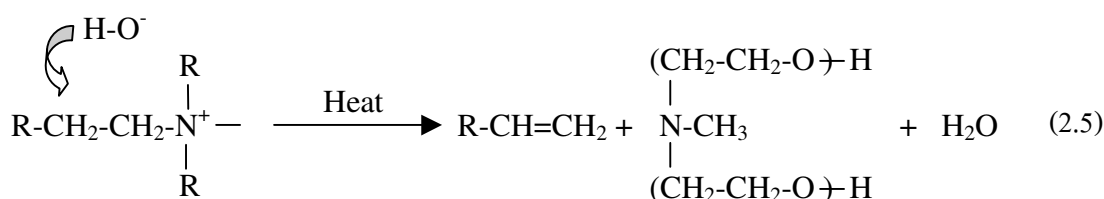
ที่มา : He *et al.*, 2005



รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างของชั้นดินเหนียว สารลดแรงตึงผิวและขนาดของอนุภาค

2.7.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของดินเหนียวและดินเหนียวปรับสภาพ สามารถตรวจสอบได้จากเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA) และเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในดินเหนียวปรับสภาพได้ โดยศึกษาจากน้ำหนักของสารที่หายไปเมื่อให้ความร้อนระหว่างดินเหนียวและดินเหนียวปรับสภาพ ช่วงอุณหภูมิ 25 – 140°C เป็นช่วงการระเหยของน้ำที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว (Lee *et al.*, 2004) ช่วงอุณหภูมิ 200 - 500°C เป็นช่วงการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิว (He *et al.*, 2006) และช่วงอุณหภูมิ 500 - 700°C เป็นช่วงการสลายตัวของโครงสร้างดินเหนียว (Burgentzle *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005) ปฏิกิริยาทางเคมีของการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิวเมื่อได้รับความร้อนแสดงในสมการที่ 2.5 สาเหตุที่ดินเหนียวอนท์โมริลโลไนที่มีความเสถียรทางความร้อนสูง เกิดจากโครงสร้างที่จัดเรียงซ้อนทับกันไปมาเป็นชั้นๆ ทำให้การเสื่อมสลายของโครงสร้างจากการเผาไหม้เกิดได้ช้าลง (Qin *et al.*, 2003)

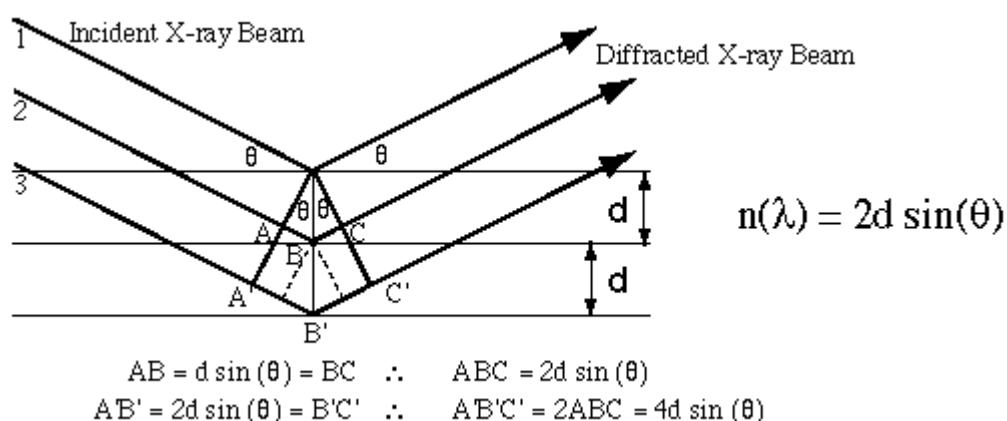


2.8 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต

2.8.1 การตรวจสอบโครงสร้างของพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต

ด้วยเครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X - ray diffractometer)

เครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอกซ์ คือ เทคนิคการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - Ray diffraction, XRD) เมื่อตกกระทบผิวหน้าของผลึกทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์เกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า ขั้นตอนการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์แสดงในรูปที่ 2.19



เมื่อ θ = มุมตกกระทบและมุมสะท้อน
 d = ระยะห่างระหว่างอะตอม

รูปที่ 2.19 ลำรังสีเอกซ์ตกกระทบและการเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัตถุ

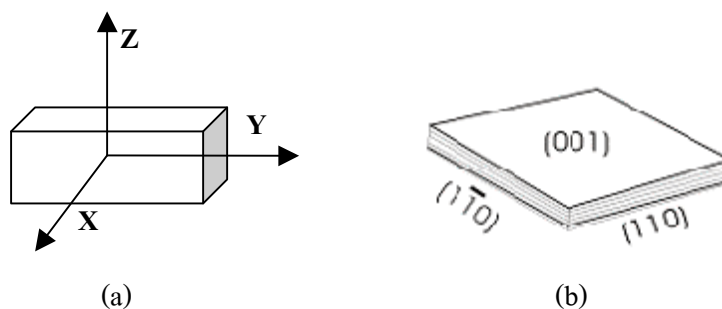
การกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ทำให้สามารถหาค่า d - spacing ของชั้นดินเหนียวได้ โดยใช้สมการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในสมการที่ 2.6 สมการนี้เรียกว่า “ สมการของแบรค (bragg equation) ” (<http://www.binghamton.edu>, 2549) และรายงานค่า d - spacing ของดินเหนียวในระนาบ d_{001} ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวจากชั้นหนึ่งไปยังอนุภาคดินเหนียวอีกชั้นหนึ่งวัดจากอนุภาคดินเหนียวตามแนวความกว้าง (แกน X) ความยาว (แกน Y) และแนวตั้ง (แกน Z) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.20 (a) เพราะโครงสร้างของชั้นดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นๆ เรียงซ้อนทับกัน โครงสร้างของชั้นดินเหนียวระยะตามแนวความกว้างและความยาวไม่สามารถหาที่แน่นอนได้จัดอยู่ในระบายนันต์ (∞) แต่แนวแกนตั้งหรือความหนาของชั้นดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์มีค่าประมาณ 1 nm เมื่อคำนวณตามทฤษฎีระนาบของผลึก โดยหาจุดตัดแกน X แกน Y และแกน Z ได้ที่ $X = \infty$, $Y = \infty$, $Z = 1$ กลับเศษเป็นส่วนได้ $1/\infty = 0$, $1/\infty = 0$, $1/Z = 1$ ดังนั้นระนาบของชั้นดินเหนียว คือ 001 ลำรังสีเอกซ์จึงตกกระทบระนาบอนุภาคดินเหนียวในระนาบ 001 เท่านั้น (แม้น, 2537)

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (2.6)$$

เมื่อ n = ตัวเลขจำนวนเต็ม
 λ = ความยาวคลื่น (nm)

$$d = \text{ระยะห่างระหว่างชั้น} (\text{\AA})$$

$$\theta = \text{มุมของการเลี้ยวเบน}$$



รูปที่ 2.20 (a) ระนาบของชั้นดินเหนียวตามแนวแกน X แกน Y และแกน Z (b) ลักษณะของชั้นดินเหนียวและระนาบของชั้นดินเหนียว

การศึกษาค่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวด้วยการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ มีข้อจำกัดในการตรวจสอบ คือ โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน ชั้นดินเหนียวกระจายในเนื้อพอลิเมอร์สม่ำเสมอและชั้นแยกออกจากกัน ทำให้ไม่สามารถหาค่าระยะห่างระหว่างชั้นได้ เนื่องจากโครงสร้างของชั้นดินเหนียวแยกออกจากกันกว้างมากเกินไป ลำรังสีเอกซ์ไม่ตกกระทบบริเวณชั้นดินเหนียวที่จัดเรียง โครงสร้างเป็นแผ่นๆ เรียงซ้อนกัน จึงไม่แสดงสเปกตรัมการกระเจิงของรังสีเอกซ์ได้ และกรณีการเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่มีการเติมดินเหนียวในปริมาณน้อยๆ อาจไม่สามารถหาค่าระยะห่างระหว่างชั้นได้เช่นกัน เพราะมีปริมาณดินเหนียวน้อยเกินไปทำให้อนุภาคดินเหนียวกระจายในเนื้อพอลิเมอร์ได้ไม่สม่ำเสมอ เมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบจึงตกกระทบบริเวณเนื้อพอลิเมอร์เป็นหลัก สเปกตรัมการกระเจิงของรังสีเอกซ์จึงไม่สามารถหาค่าระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวได้เช่นกัน (Alexandre *et al.*, 2000)

2.8.2 การศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน

(transmissions electron microscope, TEM)

โครงสร้างของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ ชั้นดินเหนียวเรียงซ้อนทับกันไปมา จำนวนหลายๆแผ่นและขนาดอนุภาคของดินเหนียวมีขนาดเล็กมากประมาณ 1 - 30 nm ทำให้การศึกษานูภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบปกติไม่สามารถตรวจสอบได้ จำเป็นต้องศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ซึ่งสามารถศึกษาอนุภาคนขนาดเล็กในระดับนาโนได้ โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการส่องผ่านตัวอย่าง และ TEM

สามารถศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ 0.2 nm - 0.2 mm การศึกษาโครงสร้างพอลิเมอร์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเครื่อง TEM เป็นการศึกษาคุณภาพวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างที่แท้จริงของชั้นดินเหนียวภายในเนื้อพอลิเมอร์ การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของชั้นดินเหนียวแบบอินเทอร์คาเลชันและเอกโฟลิเอชันสามารถยืนยันโครงสร้างที่แท้จริงได้ด้วยเครื่อง TEM

2.8.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (จินตมัย, 2547)

สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ เป็นสมบัติที่แสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุในการตอบสนองต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ไม่ว่าจะเป็นแรงดึง แรงกด หรือแรงกระแทก เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำวัสดุจะพยายามปรับตัวเพื่อผ่อนคลายความกดดัน โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนถึงขีดหนึ่งที่ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปวัสดุนั้นจะขาดหรือแตกออก

2.8.3.1 การทดสอบแรงดึง (tensile test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด และเป็นที่รู้จักมากที่สุดสำหรับการทดสอบสมบัติพื้นฐานทางกลของวัสดุ เป็นการวัดความสามารถของวัสดุที่ทนต่อแรงดึง ระยะที่วัสดุยืดออกก่อนขาด รวมทั้งมอดูลัส ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ชี้ให้เห็นถึงความแข็งแรงของวัสดุ การทดสอบสมบัติเชิงกลมีเรื่องความเค้น (stress) และความเครียด (strain) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการศึกษาความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถทำได้โดยการให้แรงกระทำแก่วัสดุ โดยส่วนใหญ่ชิ้นตัวอย่างจะมีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน จากนั้นจึงทำการวัดการตอบสนองของวัสดุดังกล่าวในรูปของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเมื่อแรงกระทำ

ความเค้น (σ) คือ แรงที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งคำนวณได้จากค่าของแรง (F) หารด้วยพื้นที่ของวัสดุที่ตั้งฉากกับทิศของแรงนั้น (A) ตามสมการที่ 2.7 ดังนั้นความเค้นจึงมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ ปาสคาล (Pa) ในหน่วย SI

ความเครียด (ϵ) คือ เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำจากภายนอกคำนวณได้ตามสมการที่ 2.8 และเปอร์เซ็นต์ความเครียดคำนวณตามสมการที่ 2.9

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (A)}} \quad (2.7)$$

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (\Delta L)}}{\text{ความยาวเริ่มต้น (L}_0\text{)}} \quad (2.8)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดขาด} = (\Delta L / L_0) \times 100\% \quad (2.9)$$

- เมื่อ
- F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)
 - A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)
 - ΔL = ความยาวสุดท้าย (L) - ความยาวเริ่มต้น (L_0)
 - L = ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด
 - L_0 = ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ

2.8.3.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบดึง (tensile impact property)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบดึงเป็นการทดสอบความต้านทานของวัสดุภายใต้ความเค้นหรือแรงที่ส่งผ่านมายังชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วสูงมาก โดยให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบอย่างเฉียบพลัน หากชิ้นทดสอบมีความต้านทานต่อแรงกระทำสูงกว่าแรงที่ได้รับชิ้นทดสอบจะไม่เกิดความเสียหาย แต่หากชิ้นทดสอบมีความต้านทานต่อแรงกระทำต่ำกว่าชิ้นทดสอบจะเกิดความเสียหาย การทดสอบการต้านทานแรงกระแทกเป็นการทดสอบในเชิงพลังงาน และความสามารถในการกระจายตัวของพลังงานที่ได้รับหรือการสะสมพลังงาน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุด

ชุดทดสอบแรงกระแทกประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ หัวค้อนฟาดกระทบและฐานเพื่อวางชิ้นทดสอบ หัวค้อนฟาดกระทบมีหลายขนาด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ต้องการทดสอบ เมื่อหัวค้อนถูกปล่อยลงมาจะเกิดการฟาดกระทบกับชิ้นทดสอบ พลังงานส่วนหนึ่งถูกชิ้นทดสอบดูดซับไว้ สามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.10 หน่วยของค่าพลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับคือ J/m^2 หรือ kJ/m^2 (จินตมัย, 2547) สามารถคำนวณค่าพลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับไว้ตามสมการที่ 2.10

$$\text{พลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับไว้} = \frac{\text{พลังงานที่อ่านจากเครื่องทดสอบแรงกระแทก (J)}}{\text{ความหนา (mm) x ความกว้าง (mm)}} \quad (2.10)$$

2.8.4 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

(dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

DMTA เป็นเครื่องมือที่ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีสมบัติเป็นวิซโคอีลาสติก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความถี่ของวัสดุภายใต้แรงกระทำซ้ำๆกัน (periodic stress) การตอบสนองของวัสดุสามารถแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ยืดหยุ่น (elastic) และส่วนที่เป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) ส่วนที่ยืดหยุ่นเกี่ยวข้องกับพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในระบบ ในขณะที่ส่วนที่เป็นของเหลวหนืด เกี่ยวข้องกับพลังงานที่กระจายออกมาในรูปของความร้อน (energy dissipated หรือ damping) รายงานผลการทดสอบในรูปของพลังงานที่เกิดการสะสมภายในชิ้นตัวอย่าง (storage modulus, E') และการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทดสอบ (loss modulus, E'') และอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานที่เกิดการสูญเสียต่อพลังงานที่เก็บสะสมในชิ้นทดสอบ ($\tan \delta$)

2.8.5 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

(thermogravimetric analysis, TGA)

TGA เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนเกี่ยวกับน้ำหนักที่หายไปของวัสดุเมื่อให้ความร้อนภายใต้การไหลเวียนของแก๊สเฉื่อย เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและศึกษาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของวัสดุเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.8.6 การหาหมู่ฟังก์ชันของสารด้วยรังสีอินฟราเรด (infrared spectroscopy, IR)

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ หลักการตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้คือ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) ของโมเลกุลอินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีเลขคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm^{-1} หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง 1,000 μm การสั่นและการหมุนของโมเลกุลเกิดขึ้นเมื่อถูกรังสีอินฟราเรดเข้าไปกระตุ้นทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน เกิดการดูดกลืนแสงทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า แต่ละหมู่ฟังก์ชันจะมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกันทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันของสารได้ (แม้น, 2537; Smith, 1999)

2.8.7 การตรวจสอบความหนืดของสารละลาย (solution viscosity)

ความหนืดเกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการไหล ความเร็วของการไหลและอัตราไหลจะขึ้นกับความต้านทานภายในของของไหลชนิดนั้น ความต้านทานเรียกว่า ความหนืด (η) ความหนืดมีผลเกี่ยวข้องกับน้ำหนักโมเลกุลของสาร ถ้าน้ำหนักโมเลกุลของสารสูงค่าความหนืดจะสูง

และความหนืดของของเหลวแปรผันตรงกับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านคาปิลลารีวิชโครมิเตอร์ โดยต้องทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความหนืด ที่อุณหภูมิสูงค่าความหนืดต่ำและที่อุณหภูมิต่ำค่าความหนืดสูง (Sandler *et al.*, 1998) การหาค่าความหนืดสัมพัทธ์และความหนืดจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

$$\eta_r = \eta/\eta_0 \approx t/t_0 \quad (2.11)$$

$$\eta_{sp} = \eta_r - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \approx \frac{t - t_0}{t_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ	η_{sp}	= ความหนืดจำเพาะ (specific viscosity)
	η_r	= ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity)
	η	= ความหนืดของสารละลาย
	η_0	= ความหนืดของตัวทำละลาย
	t	= เวลาของการไหลของสารละลาย (sec)
	t_0	= เวลาของการไหลของตัวทำละลาย (sec)

2.8.8 การทดสอบการดูดซับน้ำ (water absorption)

โครงสร้างของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับโมเลกุลของน้ำได้ โดยแคทไอออนของน้ำจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับแอนไอออนบริเวณผิวหน้าของชั้นดินเหนียว ดังนั้นจึงตรวจสอบสมบัติการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต เพื่อศึกษาน้ำหนักของวัสดุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการดูดซับน้ำเกิดขึ้น สามารถใช้สมการที่ 2.13 ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการดูดซับน้ำ

$$P = \left[\frac{A - O}{O} \right] \times 100 \quad (2.13)$$

เมื่อ	P	= ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นตัวอย่าง
	O	= น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ
	A	= น้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ

2.8.9 การทดสอบความต้านทานสารเคมี (chemical resistance)

พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความต้านทานต่อสารเคมีที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ภายใน โครงสร้างและขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลายที่ทำการทดสอบ โดยพอลิเมอร์มีขั้วสามารถละลายในตัวทำละลายมีขั้วได้ แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้วหรืออาจเกิดการบวมตัวเกิดขึ้น ส่วนพอลิเมอร์ไม่มีขั้วสามารถละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว ความเหมาะสมระหว่างตัวทำละลายและพอลิเมอร์เป็นสมบัติการละลายที่สำคัญของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ เพราะสามารถบ่งบอกถึงความต้านทานสารเคมีของพอลิเมอร์ได้ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้นเมื่อมีการบวมตัวในตัวทำละลายสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงได้ในสมการที่ 2.14

$$P = \left[\frac{A - B}{B} \right] \times 100 \quad (2.14)$$

เมื่อ P = ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารเคมีของชิ้นตัวอย่าง

B = น้ำหนักก่อนการแช่ชิ้นตัวอย่างในสารเคมี

A = น้ำหนักหลังการแช่ชิ้นตัวอย่างในสารเคมี

2.8.10 การตรวจสอบลักษณะความโปร่งใส

โครงสร้างของพอลิเมอร์แบบอสัณฐานจะมีความโปร่งใสสูง เมื่อนำมาเตรียมพอลิเมอร์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต สมบัติความโปร่งใสไม่ควรเปลี่ยนแปลงไป เพราะดินเหนียวมอนท์โมริลโลในที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนเมตร เมื่อผสมเข้าไปภายในเนื้อพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน ถ้าโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวแบบไมโครคอมโพสิต ชั้นดินเหนียวยังคงจัดเรียงโครงสร้างเป็นชั้นๆ ซ้อนทับกัน เมื่อแสงส่องผ่านตัวอย่างจะมีการกระเจิงของแสงเกิดขึ้นทำให้ความโปร่งใสของวัสดุลดต่ำลง วัสดุประเภทนี้ยังคงมองเห็นได้แต่ความโปร่งใสไม่เหมือนเดิม เรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า โปร่งแสง (translucent) แต่ถ้าชั้นดินเหนียวจัดเรียงโครงสร้างแบบเอกโฟลิเอชัน ชั้นดินเหนียวสามารถกระจายทั่วเนื้อพอลิเมอร์ เมื่อแสงส่องผ่านตัวอย่างชั้นดินเหนียวไม่มีการขัดขวางแสงและไม่เกิดการกระเจิงของแสง วัสดุจึงมีสมบัติความโปร่งใสเหมือนเดิม เรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า โปร่งใส (transparent) แต่ถ้าแสงผ่านวัสดุเกิดขึ้นได้น้อยมาก โดยแสงที่ตกกระทบอาจถูกดูดซึมหรือสะท้อนที่ผิวหน้าของวัสดุ เรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า ทึบแสง (opaque)

2.9 การตรวจสอบเอกสาร

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพ

Arroyo *et al.*, 2003 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 70 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดออกตะเดคซิลเอมีน โดยนำโซเดียม - มอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 20 g ละลายในน้ำกลั่นร้อน 1,000 ml ที่อุณหภูมิ 80°C เตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิวจากออกตะเดคซิลเอมีน (7.7 g, 28 mmol) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (2.9 ml) ละลายในน้ำกลั่นร้อนปริมาตร 500 ml ที่อุณหภูมิ 80°C นำสารละลายผสมกัน โดยกวนตลอดเวลานาน 50 min กรองและล้างผงดินเหนียวด้วยน้ำกลั่นร้อน 80°C ปริมาตร 500 ml จำนวน 3 ครั้ง อบดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสุญญากาศที่ 80°C นาน 24 h ได้ดินเหนียวปรับสภาพกลุ่มออกตะเดคซิลเอมีน ตรวจสอบอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 12 Å เมื่อมีการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวออกตะเดคซิลเอมีน ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 18.3 Å

Ding *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากโซเดียม-มอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 100 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดซีทิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยนำโซเดียม - มอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 40 g ละลายในน้ำกลั่น 1,000 ml ให้ความร้อนที่ 80°C กวนตลอดเวลา เตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิวจากซีทิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ปริมาณ 16 g ละลายในน้ำกลั่น 100 g นำสารละลายทั้งสองผสมกัน แล้วกวนต่อเนื่องนาน 8 h ตกตะกอนดินเหนียวปรับสภาพก่อนล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนจำนวน 3 ครั้ง อบดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 h ได้ดินเหนียวปรับสภาพมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีหมู่สารลดแรงตึงผิวซีทิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ตรวจสอบอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD พบว่ามุมองศาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ของดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 6.94° เมื่อมีการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวซีทิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ทำให้มุมองศาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ลดลงมีค่าเท่ากับ 3.62° ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้น

Liang *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 100 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดเฮกซะเดคซิลเอมีน (hexadecylamine, OM-16) โดยนำ OM-16C ปริมาณ 5 g ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% ปริมาตร 5 ml และเติมน้ำกลั่น 50 ml พร้อมให้ความร้อนที่ 80°C นาน 5 min เตรียมสาร

ละลายดินเหนียวโซเดียม - มอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 12.5 g ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 400 ml นำสารละลายทั้งสองผสมกันพร้อมกวนตลอดเวลานาน 1 h ที่ 80°C กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน (80°C) หลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดเกลือแอมโมเนียมที่อยู่ในรูปคลอไรด์ไอออน อบผงดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 80°C นาน 24 h ได้ดินเหนียวปรับสภาพที่มีสารลดแรงตึงผิวเฮกซะเดคซิลเอมีนเป็นองค์ประกอบ ตรวจสอบอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อโครง สร้างชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 12.4 Å เมื่อมีการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวเฮกซะเดคซิลเอมีนทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 20.7 Å

Liu *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 120 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวออกตะเดคซิลเอมีน โดยนำออกตะเดคซิลเอมีนปริมาณ 5.55 g ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.3 mol/l ปริมาตร 100 ml เตรียมสารละลายโซเดียม - มอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 20 g ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 ml นำสารละลายทั้งสองผสมกันโดยกวนตลอดเวลานาน 1 h ให้ความร้อนที่ 80°C ตกตะกอนดินเหนียวปรับสภาพ กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนหลายๆ ครั้งเพื่อกำจัดคลอไรด์ไอออน ตรวจสอบการกำจัดคลอไรด์ด้วยสารละลาย AgNO_3 ที่มีความเข้มข้น 0.1 N อบดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสูญญากาศที่ 80°C นาน 24 h ได้ดินเหนียวปรับสภาพมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดออกตะเดคซิลเอมีนเป็นองค์ประกอบ

Liu *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากโซเดียม - มอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 120 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดคซิลเอมีน โดยนำโคเดคซิลเอมีนปริมาณ 5.55 g ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.3 mol/l ปริมาตร 100 ml เตรียมสารละลายโซเดียม - มอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 20 g ละลายในน้ำกลั่น 1,000 ml นำสารละลายทั้งสองผสมกันพร้อมกวนตลอดเวลานาน 1 h ให้ความร้อนที่ 80°C ตกตะกอนดินเหนียวปรับสภาพ กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดคลอไรด์ไอออน ตรวจสอบการกำจัดคลอไรด์ด้วยสารละลาย AgNO_3 ที่มีความเข้มข้น 0.1N อบดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสูญญากาศที่ 80°C นาน 24 h ได้ดินเหนียวปรับสภาพมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดคซิลเอมีนเป็นองค์ประกอบ

Sharif *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 119 meq/100 g ทำการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดคซิลเอมีนและออกตะเดคซิลเอมีน โดยนำดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 20 g ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 800 ml และให้ความร้อนที่ 80°C และเตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิว

โคเดซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50 mmol (เตรียมจากการผสมระหว่าง 50 mmol ของโคเดซิลเอมีนกับ 50 mmol ของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นในน้ำกลั่น 200 ml) นำสารละลายทั้งสองผสมกัน ตกตะกอนดินเหนียวปรับสภาพ กรองและล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ตรวจสอบการกำจัดคลอไรด์ด้วยสารละลาย AgNO₃ ที่มีความเข้มข้น 1 N อบดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 24 h ได้ดินเหนียวปรับสภาพที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดซิลเอมีนเป็นองค์ประกอบ และในกรณีออกตะโคเดซิลเอมีนทำการเตรียมในทำนองเดียวกัน

Sur และคณะ (2001) ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 98 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดซิลแอมโมเนียมโบรไมด์ สังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพโดยนำโคเดซิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เข้มข้น 0.05 M ละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 500 ml และเติมดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ลงไปประมาณ 2 g พร้อมให้ความร้อนที่ 80°C นาน 24 h หลังจากนั้นตกตะกอนผงดินเหนียว กรองและล้างผงดินเหนียวด้วยสารละลายผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำหลายๆครั้ง เพื่อกำจัดโบรไมด์ไอออน (Br⁻) ตรวจสอบการกำจัดโบรไมด์ไอออนด้วยสารละลาย AgNO₃ ที่มีความเข้มข้น 0.1 N นำผงดินเหนียวปรับสภาพอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80°C นาน 24 h จะได้ดินเหนียวปรับสภาพที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดซิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นองค์ประกอบภายในระหว่างชั้นของดินเหนียว ตรวจสอบอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 12.3 Å เมื่อมีการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวโคเดซิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 18.3 Å

Xiong *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 110 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวเมทิลลีนบิสออร์โท - คลอโรอะนีนีน โดยนำมอนท์โมริลโลไนท์ปริมาณ 10 g ละลายในน้ำกลั่น 200 g ภายใต้การกวนตลอดเวลา ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 3 - 4 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิวโดยนำเมทิลลีนบิสออร์โทคลอโรอะนีนีนปริมาณ 5 g ละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับอะซีโตน (2 : 3 โดยปริมาตร) ภายใต้การกวนตลอดเวลาด้วยตัวกวนแม่เหล็ก นำสารละลายทั้งสองผสมกันพร้อมกวนตลอดเวลา นาน 12 h ที่อุณหภูมิห้อง และให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 80°C นาน 4 h ตกตะกอนดินเหนียวปรับสภาพ กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนหลายๆครั้ง เพื่อกำจัด AgCl (ตรวจสอบด้วยการไทเทรตกับสารละลาย AgNO₃ เข้มข้น 0.1 M) อบผงดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80°C นาน 24 h ตรวจสอบอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD พบว่าระยะห่างระหว่าง

ชั้นของดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 12.8 Å เมื่อมีการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงดึงผิวเมทิลลีนบิสออร์โท - คลอโรอะนีนิน ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 22.1 Å

Zhang *et al.*, 2004 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพจากมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 100 meq/100 g สังเคราะห์ด้วยสารลดแรงดึงผิวซีทิลโดเมททิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยนำมอนท์โมริลโลไนท์เติมในน้ำกลั่นพร้อมกวนตลอดเวลาเพื่อให้มอนท์โมริลโลไนท์ละลายในน้ำกลั่น และเตรียมซีทิลโดเมททิลแอมโมเนียมโบรไมด์ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น นำสารละลายทั้งสองผสมกันพร้อมกวนตลอดเวลา 6 h ตกตะกอนดินเหนียวปรับสภาพ กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนหลายๆครั้ง เพื่อกำจัดโบรไมด์ไอออน (Br⁻) ตรวจสอบการกำจัดโบรไมด์ด้วยสารละลาย AgNO₃ ที่มีความเข้มข้น 1 N อบดินเหนียวปรับสภาพในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80°C นาน 24 h ตรวจสอบอิทธิพลของสารลดแรงดึงผิวที่มีผลต่อโครงสร้างชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 12.0 Å เมื่อมีการปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงดึงผิวซีทิลโดเมททิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 16.2 Å

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต ด้วยเทคนิคสารละลาย

2.9.2.1 พอลิซัลโฟน

Sur *et al.*, 2001 ศึกษาการสังเคราะห์ดินเหนียวปรับสภาพและการเตรียม พอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียว สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยเตรียมพอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคสารละลายใช้ตัวทำละลาย DMAc พอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-1700 และดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 98 meq/100 g นำดินเหนียวมาปรับสภาพด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดโดเดซิลเอมีน และแปรสัดส่วนดินเหนียวปรับสภาพในพอลิซัลโฟนปริมาณ 1 - 10 wt% เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวที่ไม่มีการปรับสภาพ พบว่า มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 12.3 Å เมื่อเติมสารลดแรงดึงผิวจะทำให้ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นเป็น 18.3 Å เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวปรับสภาพในเนื้อพอลิซัลโฟนด้วยเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 1 - 5 wt% ชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบเอกโฟลิเอชัน เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก พบว่า การเติมดินเหนียวปรับสภาพ

ในปริมาณ 5 wt% ทำให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เพราะชั้นดินเหนียวขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน การเผาไหม้จึงเกิดได้ช้า เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 3 wt% จะมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 36.91% และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นประมาณ 32.5 %

Yeh *et al.*, 2003 ศึกษาอิทธิพลของดินเหนียวปรับสภาพต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต เลือกใช้พอลิซัลโฟนชนิด Udel[®] P-3500 และใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 114 meq/100 g เตรียมพอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคสารละลาย โดยใช้ตัวทำละลาย NMP และใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดโคเดคซิลเอมีนในการปรับสภาพดินเหนียว แปรสัดส่วนดินเหนียวปรับสภาพปริมาณ 1 - 10 wt% ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นเมมเบรน เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเครื่อง FTIR พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณมากขึ้น สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันจะมีความเข้มเพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอกซ์มุมกว้าง (wide angle X-Ray diffraction, WAXD) พบว่า มอนท์โมริลโลไนท์มี d - spacing เท่ากับ 1.76 nm และเมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในพอลิซัลโฟน โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบเอกโพลิเอชันไม่ปรากฏค่า d - spacing แต่เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณมากขึ้นเป็น 10 wt% โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเตอร์คาร์เลชัน ค่า d - spacing เพิ่มขึ้นเป็น 21.5 Å เกิดการขยายระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น เมื่อยืนยันโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง TEM ของ PSF-MMT-10 wt% ชั้นดินเหนียวมีการขยายระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณมากขึ้นการแพร่ผ่านของก๊าซ O₂ และ N₂ ผ่านได้ยากขึ้น เพราะชั้นดินเหนียวขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซ ทดสอบการกักก้น้ำ พบว่า เมมเบรนมีการกักก้น้ำได้ดีขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ค่ามอดูลัสจากการทดสอบด้วยเครื่อง DMTA แปรผันตรงกับปริมาณ MMT ปรับสภาพที่เติมในพอลิซัลโฟน และการเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณมากขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงในเมมเบรนลดต่ำลง ทดสอบการกัดกร่อน โดยเคลือบพอลิซัลโฟน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตลงบนแผ่นเหล็ก พบว่า การเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 wt% ทำให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น

2.9.2.2 พอลิอิมมิด

Agag *et al.*, 2001 ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนพอลิ อิมมิด - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยเลือกใช้ดินเหนียวชนิดโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ

119 meq/100 g และเลือกใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดแอมโมเนียมคลอไรด์ เตรียมด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ โดยเลือกใช้ตัวทำละลายไดเมทิลอะซีตาไมด์ และแปรสัดส่วนมอนท์โมริลโลไนท์ที่ทำการปรับสภาพในปริมาณ 1 – 10 wt% เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพภายในพอลิอิมมิดด้วยเครื่อง XRD การเติมสารลดแรงดึงผิวทำให้ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 12.4 Å เป็น 18.3 Å และเมื่อเติมดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 wt% ในพอลิอิมมิดชั้นดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพมีโครงสร้างแบบเอกโฟลิเอชัน เมื่อเติมดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณมากขึ้นเท่ากับ 6 wt% ชั้นดินเหนียวมีค่าระยะห่างระหว่างชั้นต่ำลงเท่ากับ 12.9 Å มีโครงสร้างแบบไมโครคอมโพสิต ทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณมากขึ้นเท่ากับ 10 wt% จะทำให้อุณหภูมิกลาสรานชันเพิ่มสูงขึ้น และการเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 wt% จะมีค่ามอดูลัส ค่าความทนต่อแรงดึงและความเสถียรทางความร้อนสูง

Liang *et al.*, 2004 ศึกษาพอลิอิมมิด – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต เตรียมแบบพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ โดยทำการสังเคราะห์จากพอลิอิมมิดและดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 100 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงดึงผิวเฮกซะเดคซิลเอมีน และแปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 0.5 - 3 wt% พบว่า การเติมสารลดแรงดึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 12.4 Å เป็น 20.7 Å เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติม MMT ปรับสภาพในปริมาณ 0.5 - 3 wt% โครงสร้างของชั้นดินเหนียวในพอลิอิมมิดเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน และการเติม MMT ปรับสภาพจะทำให้สมบัติทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ความเสถียรทางความร้อนเมื่อตรวจสอบด้วย TGA อุณหภูมิขณะน้ำหนักหายไป 5 - 10% เพิ่มสูงขึ้น การกระจายตัวทางความร้อนลดลง ทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสแปรผันตรงกับการเติมปริมาณดินเหนียวปรับสภาพ ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 47.6%

Zhang *et al.*, 2004 ศึกษาพอลิอิมมิด - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต เลือกใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 100 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดซิติลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ทำการเตรียมด้วยเทคนิคสารละลาย เลือกใช้ตัวทำละลาย DMAc แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพ 1 - 20 wt% เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของดินเหนียว พบว่า การเติมสารลดแรงดึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 12.6 Å เป็น 19.9Å เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD พบว่า การเติมดินเหนียวในเติมในปริมาณ 1 wt% ชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบเอกโฟลิเอชัน เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์

ปรับสภาพในปริมาณ 3 - 10 wt% ชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบอินเตอร์คาร์เลชัน ทดสอบสมบัติของพอลิอิมมิด - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต พบว่า เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 wt% จะมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มสูงสุดจาก 120 MPa เป็น 210 MPa ส่วนค่ามอดูลัสแปรผันตรงกับปริมาณการเติม MMT ปรับสภาพ การทดสอบความโปร่งใสพบว่า การเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 - 5 wt% มีความโปร่งใสสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์มากขึ้นจะทำให้มีความขุ่นเพิ่มขึ้น

2.9.2.3 พอลิสไตรีน

Aphiwantrakul *et al.*, 2005 ศึกษาการเตรียมพอลิสไตรีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ ศึกษาการแปรชนิดของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์โดยเลือกดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ชนิดไวมิง (มีค่า CEC 97 meq/100 g) และดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ชนิดเบนโทไนท์ (bentonite, BNH) (มีค่า CEC 131 meq/100g) และใช้สารลดแรงดึงผิวออกตะเตกซิลไดเมทิลเอมีน (octadecyl amine, ODA) ให้สัญลักษณ์ดินเหนียวปรับสภาพคือ ODA-SWy และ ODA-BNH ตามลำดับ พบว่า เมื่อตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นจากเครื่อง XRD ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ ODA-BNH มีค่าเท่ากับ 35.7 Å ส่วนค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ ODA-SWy เท่ากับ 17.7 Å และเมื่อตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นของพอลิสไตรีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่เติมดินเหนียวชนิด ODA-SWy ไม่สามารถหาระยะห่างระหว่างชั้นได้ โครงสร้างเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน พอลิสไตรีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่เติมดินเหนียวชนิด ODA-BNH มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 35.8 Å โครงสร้างเป็นแบบอินเตอร์คาร์เลชัน

Chen *et al.*, 2001 ศึกษาการเตรียมพอลิสไตรีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิสไตรีนและโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 92 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดซีทีแอลเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ แปรสัดส่วนมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 5 wt% ทำการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวพบว่า การเติมสารลดแรงดึงผิวทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้น มุมองศาในการกระเจิงแสงเมื่อตกกระทบผลึกลดลง เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง WAXD และ TEM พบว่า โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน ไม่สามารถตรวจสอบค่า d - spacing ได้ เพราะชั้นดินเหนียวขยายออกจากกัน

Fu *et al.*, 2000 ศึกษาการเตรียมพอลิสไตรีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต ระหว่างพอลิสไตรีนและดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 90 meq/100 g เลือกใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดไวนิลเบนซิลไดเมทิลคดเตกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (vinylbenzyl dimethyl dodecyl

ammonium chloride, VDAC) และแปรสัดส่วนดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 7.6 wt% พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 9.9 Å เป็น 19.2 Å และเมื่อผสมในพอลิस्टาไทรีน โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน ไม่สามารถตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นได้ ศึกษาสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง DMTA พบว่า เมื่อเติมดินเหนียวปรับสภาพจะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้นประมาณ 7.6% และเมื่อตรวจสอบจาก DMTA พบว่า การเติม VDAC-MMT ในปริมาณ 7.6% จะทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นจาก 3.5 GPa เป็น 5.5 GPa

Uthirakumar *et al.*, 2004 ศึกษาการเตรียมพอลิस्टาไทรีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิท โดยใช้เทคนิคการเตรียมแบบพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ ดินเหนียวมีค่า CEC เท่ากับ 119 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไตรบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ พบว่า ค่าระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นจาก 12 Å เป็น 20.6 Å เตรียมการผสมโดยแปรปริมาณมอนอโทโมริลโลไนท์เท่ากับ 1, 3 และ 5 wt% แทนด้วยอักษรย่อ PS/MMT-1, PS/MMT-3 และ PS/MMT-5 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD, TEM และ SEM พบว่า PS/MMT-1 และ PS/MMT-3 มีโครงสร้างของชั้นดินเหนียวแบบเอกโฟลิเอชันและ PS/MMT-3 มีโครงสร้างของชั้นดินเหนียวแบบอินเตอร์คาร์เลชัน ส่วน PS/MMT-5 มีโครงสร้างของชั้นดินเหนียวแบบไมโครคอมโพสิทระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 14.2 Å ทำการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC และ TGA พบว่า PS/MMT-3 มีอุณหภูมิการเสื่อมสลายสูง และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มสูงขึ้น ตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลจาก GPC พบว่า การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบลง

2.9.2.4 พอลิแอนนิลีน

Lee *et al.*, 2002 ศึกษาการเตรียมพอลิแอนนิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิท เลือกใช้ดินเหนียวชนิดโซเดียมมอนอโทโมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 90 meq/100 g เตรียมการผสมแบบพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ โดยเลือกใช้ตัวทำละลายไฮโดรคลอริก และแปรปริมาณมอนอโทโมริลโลไนท์ปรับสภาพ 25.3 wt% ความเข้มข้นของพอลิแอนนิลีนเท่ากับ 74.7 wt% เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD พบว่า การเติมดินเหนียวปรับสภาพในพอลิแอนนิลีนทำให้ชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบอินเตอร์คาร์เลชัน เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง TGA พบว่าความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 25°C เมื่อมีการเติมมอนอโทโมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 3%

Yeh *et al.*, 2001 ศึกษาพอลิแอนนิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิท โดยเลือกใช้ดินเหนียวชนิดโซเดียมมอนอโทโมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 122 meq/100 g ปรับสภาพดิน

เหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวโคคาไมโดโพรพิลไฮดรอกซิลซัลเฟต เติร์มแบบพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ เลือกใช้ตัวทำละลายไดเมทิลไฟโรซิลโดน และแปรสัดส่วนมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพจาก 0.25 - 3 wt% เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD และ TEM พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นเป็น 22.6 Å และโครงสร้างของชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบเอกโฟลิออน เมื่อมีปริมาณของมอนท์โมริลโลไนท์มากขึ้นการแพร่ผ่านของก๊าซ N₂, O₂ แพร่ผ่านได้ยากขึ้น เมื่อทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วย DMTA และ TGA พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความเสถียรทางความร้อนเพียงเล็กน้อย อุณหภูมิการเสื่อมสลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ดินเหนียวจะทำให้อุณหภูมิขณะเกิดผลึก (crystalline temperature, Tc) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อตรวจสอบด้วย DSC เนื่องอนุภาคของดินเหนียวโดยโครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นผลึกจึงเหนียวนำไปให้เกิดผลึกมากขึ้น

Yoshimoto *et al.*, 2004 ศึกษาการเตรียมพอลิแอนนิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยเลือกใช้ดินเหนียวชนิดโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 115 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวแอนนิลีนีเยมคลอไรด์ เตรียมด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ โดยใช้ตัวทำละลายไฮโดรคลอริกและแปรสัดส่วนมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพ เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วย XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 14.7 Å เป็น 24.7 Å และเมื่อเติมดินเหนียวปรับสภาพในพอลิแอนนิลีนชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบอินเตอร์คาร์เลชันค่า d - spacing ลดลงเท่ากับ 12.5 Å และเมื่อทดสอบความเสถียรทางความร้อน การเติมมอนท์โมริลโลไนท์จะทำให้พอลิแอนนิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตมีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และมีปริมาณเถ้าที่เหลือหลังการเผาไหม้ในปริมาณมากขึ้น

2.9.2.5 พอลิยูรีเทน

Xiong *et al.*, 2004 ศึกษาพอลิยูรีเทน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต เลือกใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 110 meq/100 g ระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 12.8 Å เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ในการปรับสภาพดินเหนียว ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้นเป็น 15.1 Å ตรวจสอบโครงสร้างพอลิยูรีเทน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเครื่อง XRD และ TEM พบว่า เมื่อเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 3 wt% ชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบอินเตอร์คาร์เลชัน ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้นเป็น 22.1 Å ทดสอบความเสถียรทางความร้อนพบว่า การเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 5 wt% มีความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้น การเสื่อมสลายเกิดได้ช้าเพราะอนุภาคดินเหนียวขัดขวางการเกิดการเผาไหม้

อุณหภูมิการเสื่อมสลายเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 15°C การเติมดินเหนียวปรับสภาพทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 5 wt% ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 600% เมื่อเปรียบเทียบกับ PU เพราะเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวและพอลิยูรีเทนโดยใช้พันธะโควาเลนต์ในการเกิดพันธะ

2.9.2.6 พอลิไวนิลคลอไรด์

Gong *et al.*, 2003 ศึกษาการเตรียมและสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลคลอไรด์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรซ์มอนอเมอร์ เลือกใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ และปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไดเมทิลไดโคเดกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ เมื่อปรับสภาพดินเหนียวระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้นจาก 9.8 Å เป็น 18.9 Å แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 - 5 wt% ตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า โครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตมีโครงสร้างแบบเอกโฟลิเอชัน ชั้นดินเหนียวกระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิไวนิลคลอไรด์ และเมื่อตรวจสอบสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลคลอไรด์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่เติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 5 wt% จะมีค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัส และความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงสุด

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยเทคนิคหลอม โดยใช้ความร้อน

2.9.3.1 พอลิโพรพิลีน

Ding *et al.*, 2004 ศึกษาการเตรียมพอลิโพรพิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตเตรียมโดยเพิ่มขั้วของพอลิโพรพิลีนด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์เพื่อใช้เป็นตัวประสาน โดยเติมในปริมาณน้อยมากเพื่อให้สมบัติของพอลิโพรพิลีนยังคงเดิม เตรียมการผสมด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อน แปรปริมาณดินเหนียวปรับสภาพในสัดส่วน 1, 2, 4 และ 6 wt% เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้น จากมุมการกระเจิงของรังสีเอกซ์ 6.94° ลดลงเหลือ 3.62° และโครงสร้างของดินเหนียวในพอลิโพรพิลีนเป็นแบบอินเตอร์คัลเลชัน ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA พบว่า การเติม MMT ในปริมาณ 2 wt% ทำให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ

พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์และเมื่อทดสอบด้วยเครื่อง DSC ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมโพสิตเพิ่มสูงขึ้น แต่ T_g ลดลงเมื่อมีการเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณมากขึ้น

Zhang *et al.*, 2004 ศึกษาพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและดินเหนียวชนิดโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 115 meq/100 g ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดออกตะเดคซิลเอมีน ปรับสภาพขี้ของพอลิโพรพิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 180°C นาน 15 min เตรียมการผสมด้วยวิธีหลอมโดยใช้ความร้อน โดยนำพอลิโพรพิลีนที่ปรับสภาพขี้ผสมกับมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 200°C นาน 15 min แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ 1 - 4 wt% เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d -spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 12.0 Å เป็น 19.6 Å และโครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเตอร์คาร์เลชัน ทดสอบสมบัติทางความเสถียรทางความร้อนจากเครื่อง TGA พบว่า เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 2 wt% จะมีค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายเพิ่มสูงขึ้นกว่า 130°C เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

2.9.3.2 พอลิเอทิลีน

Gopakumar *et al.*, 2002 ศึกษาอิทธิพลของดินเหนียวที่กระจายตัวในพอลิเอทิลีนต่อสมบัติเชิงฟิสิกส์ของพอลิเอทิลีน - มอนท์โมริลโลไนท์นาโนคอมโพสิต พอลิเอทิลีนโดยโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขี้ จึงต้องปรับสภาพด้วยการเพิ่มมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ให้ชื่อย่อเป็น (PE-g-MAn) โดยดินเหนียวที่เลือกใช้มี 2 ชนิดเป็นดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์บริสุทธิ์ (cloisite NA⁺) และดินเหนียวปรับสภาพทางการค้านาโนเมอร์ (Nanomer[®], I.44PA) เตรียมการผสมแบบหลอมโดยใช้ความร้อนด้วยเครื่องผสมแบบปิดนาน 7 min ที่ 160°C, 60 rpm ปริมาตรห้องผสม 70% ขึ้นรูปขึ้นตัวอย่างแบบอัดให้มีความหนา 1.5 mm ที่ 150°C ตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD เมื่อนำ PE-g-MAn ผสมกับ I.44PA จะทำให้ชั้นดินเหนียวสามารถขยาย ระยะห่างระหว่างชั้นได้มากขึ้นดีกว่าพอลิเอทิลีนที่ไม่มีเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และ PE-g-MAn ที่เติม cloisite NA⁺ ที่ 1wt% ของการเติม I.44PA มีโครงสร้างแบบเอกโฟลิเอชัน เมื่อเพิ่ม I.44PA ในปริมาณ 5wt% จะมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นประมาณ 30% และเมื่อเพิ่ม I.44PA ในปริมาณ 10% สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสได้ถึง 53%

Hotta *et al.*, 2004 ศึกษาการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต เลือกใช้ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 92 meq/100 g และใช้

สารลดแรงตึงผิวชนิดไดเมทิลบิส (ไฮโดรจีเนตทอลโล) แอมโมเนียม และชนิดไตรเมทิล(ไฮโดรจีเนตทอลโล) แอมโมเนียม ทำการผสมโดยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อนภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และปรับสภาพขั้วของพอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ในปริมาณ 0.8 - 6.9 wt% ศึกษาอิทธิพลของหมู่สารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันและการปรับสภาพขั้วเอทิลีนที่มีผลต่อการสังเคราะห์พอลิเอทิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นเป็น 18.0 Å และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวในพอลิเอทิลีน ระยะห่างระหว่างชั้นลดลงเนื่องจากแรงเหนือนจากเครื่องอัดรีดสกรูคู่ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นลดลง ทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไดเมทิลบิส (ไฮโดรจีเนตทอลโล) แอมโมเนียม ในปริมาณ 6.9 wt% มีสมบัติเชิงกลสูงสุด และทดสอบสมบัติการกั้นการซึมผ่านก๊าซพบว่า เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์มากขึ้นการกั้นการซึมผ่านก๊าซเกิดขึ้น ได้ยาก เพราะอนุภาคดินเหนียวขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซ

Wang *et al.*, 2003 ศึกษาการเตรียมพอลิเอทิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 96 meq/100 g และมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 15 Å ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดเฮกซะเดคซิล ไตรเมทิล แอมโมเนียมโบรไมด์ และเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ใช้วิธีหลอมโดยใช้ความร้อนด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ตรวจสอบโครงสร้างพอลิเอทิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดเฮกซะเดคซิลไตรเมทิล แอมโมเนียมโบรไมด์ ทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 15 Å เป็น 38.7 Å และการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 15 Å เป็น 16.9 Å เมื่อผสมดินเหนียวปรับสภาพในพอลิเอทิลีน โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเตอร์คัลเลชัน ระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวขยายเพิ่มสูงขึ้น กรณีเติมดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิล แอมโมเนียมโบรไมด์ 1% 2% และ 5% ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นเป็น 38.7 Å 40.6 Å และ 38.8 Å ตามลำดับ ส่วนการเติมดินเหนียวปรับสภาพด้วยเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ค่าระยะห่างระหว่างชั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบสมบัติการป้องกันการตีไฟพบว่า เมื่อเติมดินเหนียวปรับสภาพจะทำให้ป้องกันการตีไฟได้ดีขึ้น เพราะอนุภาคดินเหนียวขัดขวางการเผาไหม้ การเผาไหม้เกิดได้ช้าลงประมาณ 32 %

Zhai *et al.*, 2004 ศึกษาการเตรียมพอลิเอทิลีน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยนำพอลิเอทิลีนปรับสภาพขั้วด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เลือกใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ และปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดอัลคิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และใช้วิธีหลอมโดยใช้ความร้อนด้วยเครื่องผสมแบบปีดานาน 4 min ที่ 175°C แปรปริมาณมอนท์โมริลโล

ไนท์ 1, 3 และ 5 wt% เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 23.6 Å เป็น 37.4 Å และเมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเทอร์คัลเลชัน ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 55.9 Å 39.8 Å และ 40.1 Å ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง TGA และ DSC พบว่า การเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 1 wt% มีสมบัติทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิการเสื่อมสลายเพิ่มขึ้นจาก 426.5° เป็น 468.2° อุณหภูมิการเกิดผลึกไม่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นประมาณ 2°C

2.9.3.3 พอลิเอไมด์

Liu *et al.*, 2003 ศึกษาการเตรียมและการสังเคราะห์ไนลอน 11 - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยเลือกใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ (Nanomer[®] I.34TCN) เตรียมโดยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อน แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ 1, 2, 4 และ 8 wt% ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 220°C เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 14 Å เป็น 25 Å และโครงสร้างของชั้นดินเหนียวภายในไนลอน 11 เป็นแบบเอกโฟลิเอชัน (กรณีที่ได้มอนท์โมริลโลไนท์น้อยกว่า 4 wt%) เมื่อมีปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์มากกว่า 4 wt% โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเทอร์คัลเลชัน ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ค่าความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้นประมาณ 20°C เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ในปริมาณ 2 wt% สมบัติเชิงกล ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 100 % เมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์น้อยกว่า 4 wt%

2.9.3.4 พอลิคาร์โบแลคโตน

Gorrasi *et al.*, 2003 ศึกษาการเตรียมและการสังเคราะห์พอลิคาร์โบแลคโตน - ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีค่า CEC เท่ากับ 92 meq/100 g และมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 12 Å ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดเมทิลบิส (2 ไฮดรอกซีเอทิล) แอมโมเนียม แปรสัดส่วนดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 1, 3, 5 และ 10 wt% และใช้เทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อนในการผสม เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้น และโครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน อนุภาคดินเหนียวปรับสภาพจะทำให้เกิดการกักน้ำซึมผ่านของก๊าซดีขึ้น ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC และ TGA พบว่า T_g เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ T_d ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.9.3.5 พอลิเมทิล เมทาอะไครเลท

Salahuddin *et al.*, 2001 ศึกษาการเตรียมพอลิเมทิล เมทาอะไครเลท – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต ใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดไคเมทิลเบนซิลไฮดรจันเททอลโลแอมโมเนียมคลอไรด์ ระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวก่อนทำการปรับสภาพเท่ากับ 12 Å เมื่อทำการปรับสภาพระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 18 Å เตรียมการผสมแบบหลอมโดยใช้ความร้อน แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพ 0 - 1 wt% เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ค่าความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 200 - 400°C เมื่อเพิ่มปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์เท่ากับ 1 wt%

2.9.3.6 พอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตท

Riva *et al.*, 2002 ศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลอะซีเตท – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต ใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดออกตะเดกซิลแอมโมเนียม โดยใช้พอลิไวนิลอะซีเตทที่มีไวนิลอะซีเตทเป็นองค์ประกอบ 19% เตรียมการผสมด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อนภายในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 120°C, 60 rpm นาน 10 min เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงดึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 15 Å เป็น 20 Å และโครงสร้างของชั้นดินเหนียวในพอลิไวนิลอะซีเตท – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตเป็นแบบเอกโฟลิเอชัน ทดสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง TGA, DSC และ DMTA พบว่า มีความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้นเมื่อเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 10 wt%

Tang *et al.*, 2002 ศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลอะซีเตท – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต ใช้ดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดเฮกซะเดกซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ทำการผสมด้วยวิธีหลอมโดยใช้ความร้อนภายใต้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง โดยเติมมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 5 และ 7 wt% ผสมพอลิไวนิลอะซีเตทกับมอนท์โมริลโลไนท์ที่มีความแตกต่างระหว่างขนาดของอนุภาค MMTa (38 nm) และ MMTb (48 nm) เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงดึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 14 Å เป็น 37.8 Å เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวภายในเนื้อพอลิไวนิลอะซีเตทจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเตอร์คาร์เลชัน เมื่อศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟและการหน่วงไฟพบว่า

พอลิไวนิลอะซีเตต – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่มีอัตราการคลายความร้อนลดลง 40% เมื่อเติมดินเหนียว MMTa และ 34% เมื่อเติมดินเหนียว MMTb

Zanetti *et al.*, 2001 ศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลอะซีเตต – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยใช้พอลิไวนิลอะซีเตตที่มีไวนิลอะซีเตตเป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกันคือ 12 และ 19 wt% ใช้ดินเหนียวชนิดฟูออร์โรเฮกโทไรท์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดออกตะเดกซิล แอมโมเนียมและอะมิโนเดคคาโนอิก ทำการผสมด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อน ผสมภายในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แปรปริมาณมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพเท่ากับ 1 - 10 wt% เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d-spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นจาก 14 Å เป็น 17 Å และเมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวภายในพอลิไวนิลอะซีเตตเป็นแบบเอกโฟลีโอชัน ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง TGA พบว่า สมบัติทางด้านความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเติมดินเหนียวปรับสภาพในปริมาณ 10 wt%

Zhang *et al.*, 2003 ศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลอะซีเตต – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิต โดยใช้พอลิไวนิลอะซีเตตที่มีไวนิลอะซีเตตเป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกันคือ 28, 40, 50 และ 80 wt% ปรับสภาพดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดออกตะเดกซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ไดออกตะเดกซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์และไตรซีทิลเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้น จาก 13.29 Å เป็น 19.8 Å 36.17 Å และ 37.23 Å ตามลำดับ ทำการเตรียมด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C และแปรปริมาณดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ในปริมาณ 3, 5 และ 10 wt% เมื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินเหนียวภายในพอลิไวนิลอะซีเตตจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเป็นแบบอินเตอร์ลาร์เลชันระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกพบว่า พอลิไวนิลอะซีเตต – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตที่ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดออกตะเดกซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ มีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่าดินเหนียวปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆ

2.9.3.7 พอลิคาร์บอนเนต

Wang *et al.*, 2003 ศึกษาการเตรียมพอลิคาร์บอนเนตผสมกับอะไครโลไนไตรล์ บิวตะไดอีน สไตรีน และเติมดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับสภาพ ปรับสภาพดินเหนียวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดเฮกซะเดกซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มสูงขึ้นจาก 13 Å เป็น 22 Å ทำการผสมพอลิเมอร์ผสมและดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ที่ปรับ

สภาพด้วยเทคนิคหลอมโดยใช้ความร้อนภายใต้การผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง เมื่อเติมดินเหนียวชนิดมอนท์โมริลโลไนท์ในปริมาณ 5 wt% ในพอลิเมอร์ผสม โครงสร้างของชั้นดินเหนียวเมื่อตรวจสอบจากเครื่อง XRD และ TEM พบว่า มีโครงสร้างแบบอินเตอร์คัลเลชัน ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อศึกษาความเสถียรทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกพบว่า ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพในปริมาณ 5 wt%

2.9.3.8 พอลิสไตรีน

Limpanart *et al.*, 2005 ศึกษาการเตรียมพอลิสไตรีน – ดินเหนียวนาโนคอมโพสิตด้วยวิธีหลอมโดยใช้ความร้อนระหว่างพอลิสไตรีนและมอนท์โมริลโลไนท์ปรับสภาพ เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไดออกตะเดคซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์มีค่า CEC เท่ากับ 96 meq/100 g และแปรปริมาณสารลดแรงตึงผิวในการสังเคราะห์ 0.5 และ 2 mmol ตามลำดับ ให้ชื่อเป็น D1805 และ D1820 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างของชั้นดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD และ TEM พบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้ d - spacing ของดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นเป็น 29 Å (D1805) และ 38 Å (D1820) ตามลำดับ การเติม MMT ปรับสภาพ D1805 และ D1820 ในพอลิสไตรีนจะทำให้ชั้นดินเหนียวมีโครงสร้างแบบอินเตอร์คัลเลชัน ตรวจสอบปริมาณความแตกต่างของปริมาณสารลดแรงตึงผิวจาก TGA พบว่า ปริมาณของน้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงของ D1820 มีปริมาณมากกว่า D1805 ซึ่งตรงตามผลของการสังเคราะห์ D1820 มีปริมาณของสารลดแรงตึงผิวมากกว่า D1805