

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เคลย์ (Clay)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของเคลย์

“เคลย์” หมายถึง แร่ดินเหนียว หรือ ดินโคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matter) และความชื้น [3] แร่ดินเหนียวมีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ซับซ้อน และมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ส่วนใหญ่เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร [8] แร่ดินเหนียวในกลุ่มนั้นยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างผลึกหรืออัญรูป เป็นต้น ลักษณะเด่นของแร่ดินเหนียวที่นำไปสู่เทคโนโลยีของวัสดุประกอบนาโนคือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นและเรียงซ้อนกันเป็นชั้น บางครั้งจึงเรียกว่า Layer silicate clay เนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นของเคลย์ ทำให้เคลย์สามารถขยายตัวและหดตัวได้ ทำให้สารอื่นๆ เช่น น้ำ หรือสารอินทรีย์อื่นๆ สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ได้

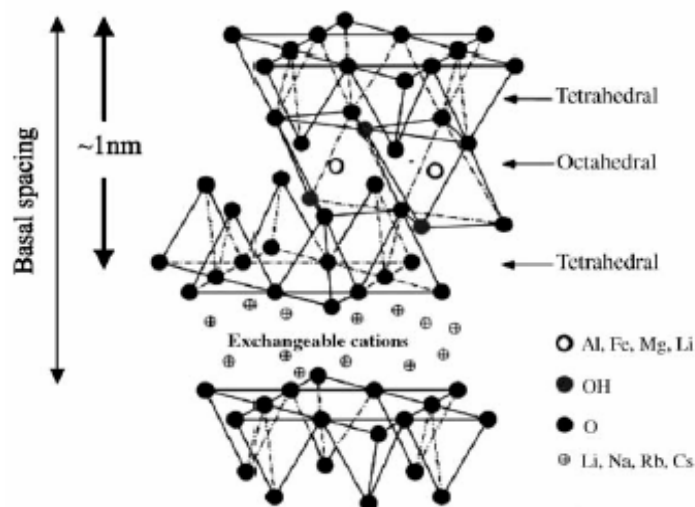
แร่ดินเหนียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือชนิดไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน และชนิดที่เป็นผลึก [9] แร่ดินเหนียวที่มีความสำคัญต่อวัสดุประกอบนาโนคือแร่ดินเหนียวที่เป็นผลึก สำหรับแร่ดินเหนียวที่เป็นผลึกที่สำคัญคือ สมกไทต์เคลย์ (Smectite clay) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 คือมีแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ต่อแผ่นอะลูมินา 1 แผ่นในหนึ่งหน่วย โดยที่แร่ดินเหนียวประเภท 2:1 จะขยายตัวและหดตัวได้มาก มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ดี (Cation exchange capacity หรือค่า CEC คือความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก หมายถึง ผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดของดิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูลต่อดินแห้ง 100 กรัม เมื่อวัดที่ค่าความเป็นกรดค่าเท่ากับ 7) [10] แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ที่พบมากในดินคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT)

มอนต์มอริลโลไนต์ มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไปคือ $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ จัดอยู่ในแร่ตระกูลไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส สำหรับในประเทศไทยพบที่บริเวณตำบลลำธารายณ์ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี [11] แร่ดินเหนียวชนิดอื่น ๆ ในกลุ่มนี้ที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นนาโนเคลย์ ได้แก่ ซาโปไนต์ (Saponite) และเฮกโตไรต์ (Hectorite)

มอนต์มอริลโลไนต์ประกอบด้วยชั้น 3 ชั้นมีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึก [12] ประกอบด้วยชั้นอะลูมินาออกตาฮีดรอล (Octahedral) ซึ่งมีประจุเป็นบวก ที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิ-

เกตเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีประจุเป็นลบ จึงมีลักษณะโครงสร้างของชั้นผลึก อะลูมินา (Al_2O_3) ต่อซิลิกา (SiO_2) เป็น 2:1 ความหนาแน่นของชั้นผลึกมีค่าประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของแผ่นผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตร ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุที่อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio (L/D)) สูง และมีประจุสุทธิเป็นลบจึงมักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม แคลเซียม และธาตุอื่น ๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นจึงทำให้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่พื้นผิวด้วยไอออนที่มีขนาดใหญ่ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 0.98 เป็น 1.2-2.5 นาโนเมตร

เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ มีความเป็นขั้วจึงชอบน้ำ เมื่อมีการนำมาใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุประกอบกับพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่มีขั้ว ทำให้มีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และมอนต์มอริลโลไนต์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ให้เป็นสารที่มีความเป็นขั้วลดลงก่อนนำมาใช้งาน การดัดแปรโครงสร้างที่พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแร่ไฟโรซิลิเกต [12]

2.1.2 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนการนำมาใช้งานนั้นทำได้โดยการใช้เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ (Quaternary ammonium) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กับโซเดียมไอออน (Na^+) หรือพวกไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline or Alkaline earth ions) ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ จาก

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร โครงสร้างด้วยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์มีระยะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของชั้นซิลิเกตซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าไอออนของโซเดียม หรือไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ โดยการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตนั้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของหมู่อัลคิลในเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์

ภายหลังการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แล้ว ทำให้สมบัติความชอบน้ำของมอนต์มอริลโลไนต์ลดลง จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ จากการแทนที่ไอออนของโซเดียม ไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ ด้วยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ในระหว่างชั้นซิลิเกต จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า แร่ดินเหนียวชนิดดัดแปร (Modified clay) ออแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Organomontmorillonite) ออแกโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออแกโนเคลย์ (Organoclay) หรือนาโนเคลย์ (Nanoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ สามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ เนื่องจากความมีขั้วลดลง

เมื่อพอลิเมอร์แทรกเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกต จะทำให้ชั้นของซิลิเกตซึ่งเกาะกันอย่างหลวมๆ มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น ถ้าพอลิเมอร์แทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตได้มาก และมีขนาดความยาวของสายโซ่มากพอ ชั้นของซิลิเกตแต่ละชั้นอาจแยกออกจากกันได้ ทำให้มีขนาดอนุภาคเสริมแรงอยู่ในระดับนาโนเมตร เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร นับว่าเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคนาโนเมตรจากธรรมชาติ

การแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไปในชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ [8] แบ่งตามลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ได้ 4 แบบคือ

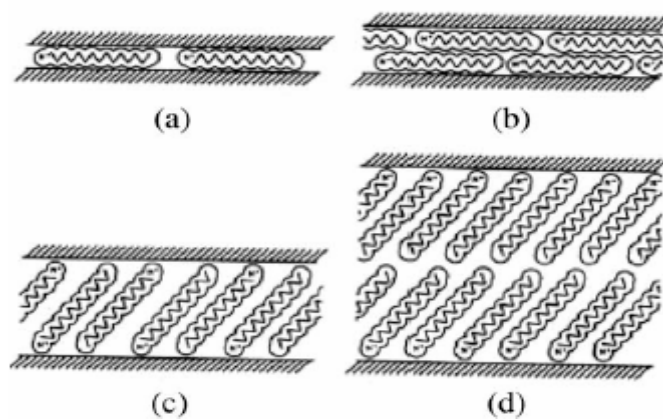
1. Lateral monolayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตเพียง 1 ชั้น ไม่มีการซ้อนกันของสายโซ่ และสายโซ่จัดเรียงตัวในลักษณะแนวนอนที่ขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 a

2. Lateral bilayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต โดยเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ในแนวนอนขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.2b

3. Paraffin type monolayer สายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต 1 ชั้น ในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิลิเกต ทำให้ระยะห่างของชั้นมีค่าเท่ากับ ความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 c

4. Paraffin type bilayer เกิดจากการแทรกตัวของเกล็ดคอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิลิเกต โดยเกล็ดคอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ จะเรียงต่อกันเป็น 2 ชั้น ทำให้ระยะห่างของชั้นซิลิเกตมีค่าเท่ากับความยาวของสายโซ่ของเกล็ดคอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ 2 สายโซ่รวมกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 d

การจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเกล็ดคอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ดังกล่าว เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างชั้นของอแกโนเคลย์ หรืออแกโนมอนต์มอร์ริลโลไนต์



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโมเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์ [12]

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| a) Lateral monolayer | b) Lateral bilayer |
| c) Paraffin type monolayer | d) Paraffin type bilayer |

2.2 สารลดแรงตึงผิว [13,14]

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้สารที่มีประจุลบ ส่วนมากจะอยู่ในรูปของเกลือซัลโฟเนต เกลือซัลเฟต และเกลือฟอสเฟต เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งสกปรก ช่วยให้เปียก รักษาสิ่งสกปรกให้แขวนลอยในน้ำได้ดี และให้ฟองมาก

2. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อนุมูลของสารที่มีประจุบวก ส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารประกอบเอมีนหรือเกลือของแอมโมเนียม เช่น เกล็ดคอเทอนารีแอมโมเนียมโบรไมด์ เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 10-11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่มี

ประจุลบ จึงมักนำไปใช้น้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

3. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกและลบในโมเลกุลเดียวกัน (Zwitterionic surfactant หรือ Amphoteric surfactant)

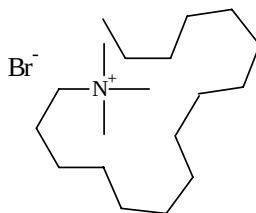
สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำ สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ ขึ้นกับค่าความเป็นกรดของสภาวะแวดล้อม สารประเภทนี้จะกำจัดสิ่งสกปรกได้ดีที่สุดในสารละลายที่เป็นกลาง จึงนิยมใช้ทำแชมพู และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิว เป็นต้น

4. สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะไม่มีการแตกตัวให้อนุมูลของสารที่มีประจุ เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีสมบัติเป็นสารซักฟอก ทนต่อน้ำกระด้าง ต่อกกรด และต่อด่าง แต่ให้ฟองน้อย และสามารถใช้ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่นๆได้

2.3 เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ [15]

เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium bromide, HTAB) อาจเรียกว่า Cetrimonium bromide, Cetyltrimethylammonium bromide, Palmityltrimethylammonium bromide, Trimethylhexadecylammonium หรือ CTAB เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) มีสูตรโมเลกุล $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{Br})(\text{CH}_3)_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 364.45 และมีสูตรโครงสร้าง ดังรูป



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Hexadecyltrimethylammonium Bromide [15]

2.3.1 สมบัติของ HTAB

HTAB เป็นผงของแข็งสีขาว ละลายน้ำได้สารละลายใส และเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่แรง ค่า pH ประมาณ 5.0–7.0 (25 °C, 0.1 M ในน้ำ) จุดหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 237–250 °C จุดวาบไฟ 244 °C (471 °F) จุดเดือด 235 °C อุณหภูมิสลายตัว (T_d) 230 °C เสถียรที่อุณหภูมิห้อง ดูดความชื้นได้ง่าย เมื่อเผาไหม้จะเกิดควันที่เป็นพิษและระคายเคือง

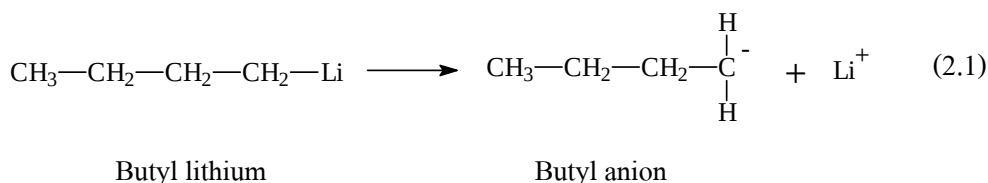
2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์

HTAB ใช้เป็นส่วนประกอบของครีมนวดผม สารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic agent)
 สารซักล้าง สารทำให้นุ่มในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ สารฆ่าเชื้อและสารต่อต้าน
 เชื้อจุลินทรีย์ และสารอิมัลซิไฟเออร์ ใช้ดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

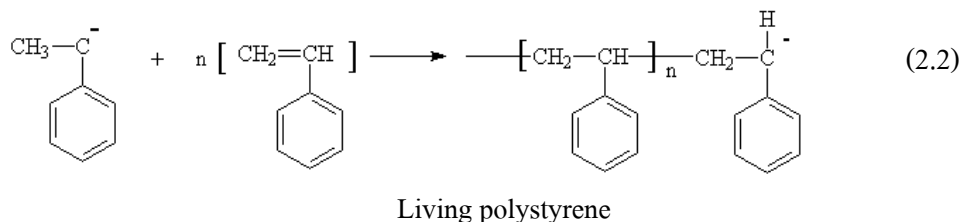
2.4 พอลิไตรีนบิวทาไดอินสไตรีน

2.4.1 การสังเคราะห์พอลิไสตรีนบิวทาไดไอสไตรีน [16-18]

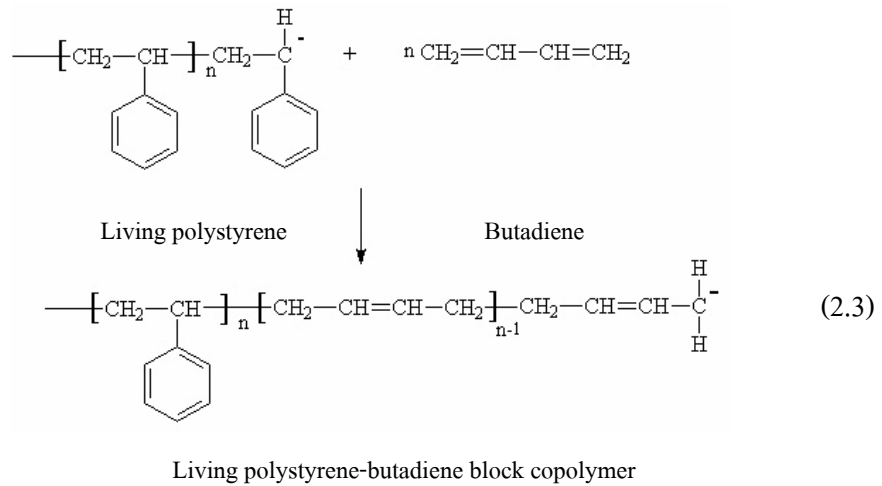
Poly (styrene-butadiene-styrene) หรือ SBS เตรียมได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมด้วยประจุลบแบบ Living anionic polymerization เป็นปฏิกิริยาถูกโซ่เริ่มจากการเกิดหมู่ที่ว่องไว (Active site) หรือไอออนลบของตัวริเริ่ม จากนั้นไอออนลบของตัวริเริ่มจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์เกิดไอออนลบใหม่เป็นการตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์ โดยตัวริเริ่มที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์คือ บิวทิลลิเทียม (Butyl lithium) การเกิดไอออนลบของบิวทิลลิเทียมแสดงในสมการต่อไปนี้



หลังจากนั้น ไอออนลบของตัวริเริ่มจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์สไตรีนไอออนลบที่เป็นตัวตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลที่สอง สาม สี่ ไปเรื่อยๆ ซึ่งถ้าไม่มีการเติมมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ ลงไป ทำให้ได้พอลิสไตรีนที่ปลายสายโซ่มีความว่องไวอยู่เรียกว่า Living polymer แสดงได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

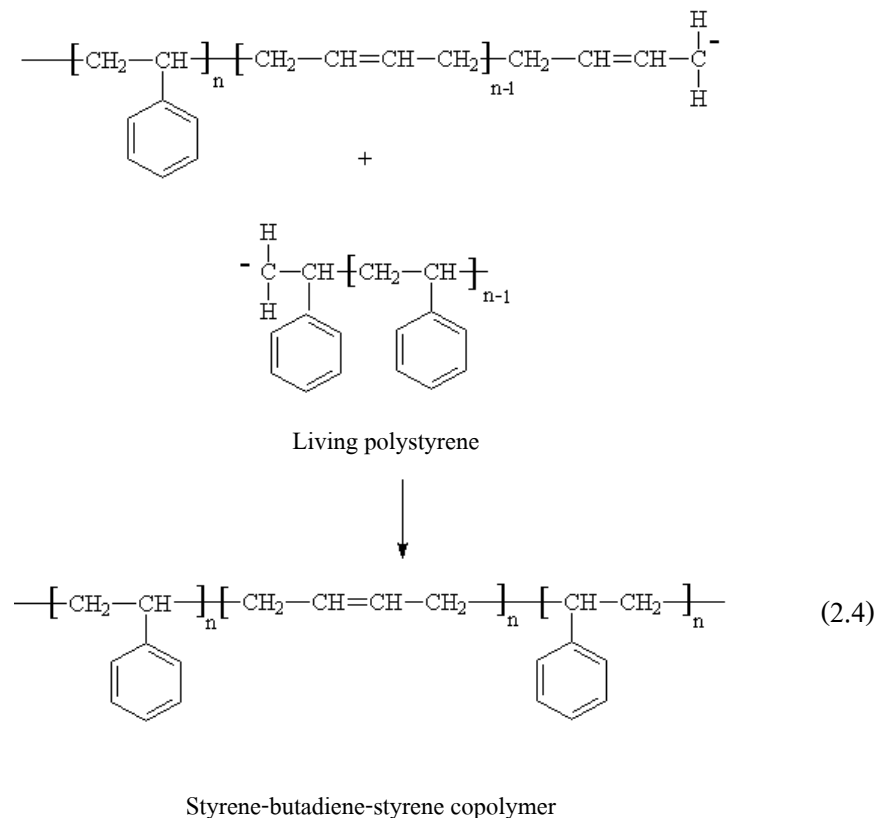


หลังจากนั้นเติมบิวทาไดอินมอนอเมอร์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อจาก Living polymer ของพอลิสไตรีน แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



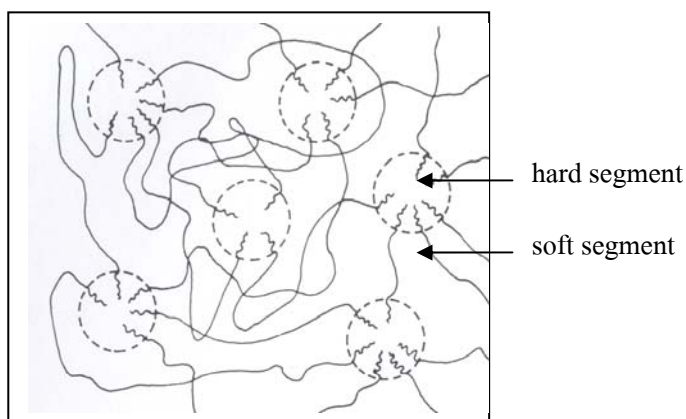
เมื่อได้ Living styrene-butadiene block copolymer แล้ว ขั้นตอนถัดมาเติมสารคู่ควบ (Coupling agent) แล้วเติม Living polystyrene homopolymer ลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่อจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ระหว่างพอลิสไตรีนกับทาคไอิน ได้เป็นพอลิเมอร์ระหว่างพอลิสไตรีนกับทาคไอินสไตรีน แสดงได้ดังสมการ

สารคู่ควบนั้นมีหลายชนิด การเลือกใช้สารคู่ควบที่ต่างชนิดกันทำให้ได้โครงสร้างของ SBS ที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้สารคู่ควบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ ตัวอย่างเช่น ไดคลอโรไดมethyl silane (Dichlorodimethyl silane) เป็นต้น ทำให้ได้ SBS ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง (Linear chain) [19]



จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโมเลกุลของ SBS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนของพอลิสไตรีน และส่วนของบิวทาไดอิน [20] โดยส่วนของพอลิสไตรีนจัดเป็นส่วนแข็ง (Hard segment) และส่วนของพอลิบิวทาไดอินจัดเป็นส่วนอ่อน (Soft segment) โดยที่ส่วนแข็งคือพอลิสไตรีนมีความสำคัญในการสร้างบริเวณแข็ง (Rigid region) ที่ทำหน้าที่คล้ายกับการเชื่อมโยงเชิงกายภาพ (Physical crosslinks) ยึดสายโซ่ที่ยืดหยุ่นของส่วนอ่อนคือพอลิบิวทาไดอินไว้ด้วยกัน ส่วนแข็งเหล่านี้สามารถคลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน และกลับมารวมกันใหม่ได้เมื่อเย็นตัว สำหรับส่วนอ่อนคือพอลิบิวทาไดอิน มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) คล้ายยาง มีอิสระในการเคลื่อนที่มากกว่าส่วนแข็ง และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ต่ำ

SBS จัดเป็นวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [21] (Thermoplastic elastomers, TPEs) ชนิดหนึ่ง ซึ่งวัสดุดังกล่าวเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (Rubber-like) นิ่มตัว มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ ยืดหยุ่นได้คล้ายยาง แต่แตกต่างจากยางทั่วไปคือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งคล้ายเทอร์โมพลาสติก การที่ SBS สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งหรือไหลได้ที่อุณหภูมิสูง และกลายเป็นยางที่อุณหภูมิใช้งานเนื่องจาก SBS มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinks) แทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมีเหมือนยางทั่วไป จุดเชื่อมโยงเชิงกลนี้จะช่วยยึดให้สายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ติดกันเหมือนโครงสร้างร่างแหสามมิติในยาง แต่สามารถเปลี่ยนแบบย้อนกลับไปได้เมื่อให้ความร้อน จึงขึ้นรูปได้ใหม่เหมือนเทอร์โมพลาสติก ส่วนอ่อนและส่วนแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [19]

2.4.2 สมบัติเด่นของ SBS [21]

- เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้โปร่งใส (Transparent)
- ทนต่อน้ำมัน
- เป็นฉนวนทางความร้อนที่ดี
- ทนต่อสารเคมี
- ทนต่อแรงกดและแรงกระแทกได้ดี

2.4.3 การใช้งาน SBS [22]

- ใช้ในอุตสาหกรรมพื้นรองเท้า
- ใช้ในการผลิตอุปกรณ์กีฬา
- ใช้ผลิตวัสดุรับแรง และวัสดุอื่นๆ ที่ต้องการความทนทาน
- ใช้ปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น
- ใช้ในอุตสาหกรรมสารยึดติด (Adhesive)
- ใช้ผลิตส่วนประกอบของยางรถยนต์

2.5 วัสดุประกอบนาโน [12, 23-25]

วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposites) เป็นวัสดุประกอบที่มีอนุภาคของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของวัสดุประกอบได้เป็น 3 ประเภท [12] คือ

1. วัสดุประกอบแบบดั้งเดิม หรือเรียกว่า Conventional composites

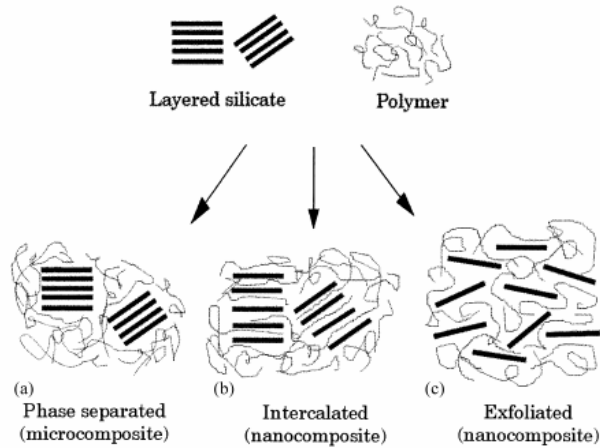
วัสดุประเภทนี้เป็นโครงสร้างของวัสดุประกอบแบบไมโคร (Microcomposites) ซึ่งสายโซ่ของพอลิเมอร์ไม่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 a

2. วัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposites)

วัสดุประเภทนี้เป็นวัสดุประกอบนาโนที่ยังคงมีโครงสร้างของชั้นซิลิเกตที่เรียงซ้อนอย่างหลวมๆ แต่มีระเบียบอยู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ การอยู่ร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์จะมีลักษณะเหมือนแซนวิช โดยสายโซ่ของพอลิเมอร์จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของซิลิเกต โดยที่ชั้นของซิลิเกตไม่แยกออกจากกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 b

3. วัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated nanocomposites)

วัสดุประกอบประเภทนี้เป็นวัสดุประกอบที่ทำให้ชั้นของซิลิเกตแตกกระจายแยกออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยวๆ กระจายอย่างอิสระในเนื้อพอลิเมอร์แสดงได้ ดังรูปที่ 2.5 c วัสดุประกอบนาโนชนิดนี้จะมีสมบัติที่ดีมาก แม้จะใช้สารตัวเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย

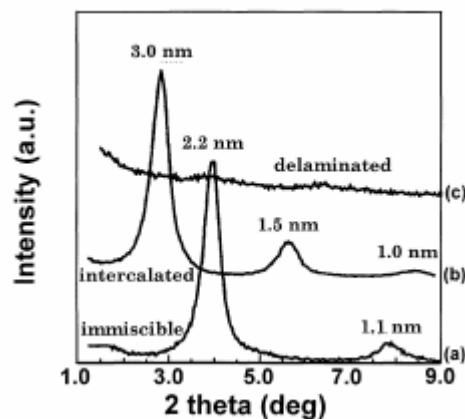


รูปที่ 2.5 ลักษณะของวัสดุประกอบนาโนชนิดต่างๆ [8]

การตรวจวิเคราะห์เคลย์ในวัสดุประกอบนาโนอาศัย เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) จัดเป็นเทคนิคหนึ่งในการตรวจวิเคราะห์ว่าวัสดุประกอบนาโนเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว (Intercalated) หรือเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ซึ่งโดยปกติแล้วการแทรกตัวของพอลิเมอร์เข้าไประหว่างชั้นเคลย์ จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น ทำให้ฟีกของเคลย์ที่ระนาบ (100) เลื่อนไปยังตำแหน่ง 2θ ที่ต่ำลง นั่นหมายถึงการที่เคลย์มีระยะห่างที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของ Bragg's equation ดังนี้

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

จากการเลื่อนของฟีกจาก XRD ทำให้สามารถระบุได้ว่า เคลย์ในวัสดุประกอบมีลักษณะเป็น Intercalated หรือ Exfoliated การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะกราฟ XRD ของวัสดุประกอบนาโนชนิดต่างๆ [8]

a) Microcomposite b) Intercalated nanocomposites และ c) Exfoliated nanocomposites

2.6 การเตรียมวัสดุประกอบนาโน [26]

วิธีการในการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์มีหลายวิธี และวิธีที่นิยมใช้มีดังนี้

1. การผสมแบบสารละลาย (Solution method)

การเตรียมแบบสารละลายเป็นเทคนิคที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างมีการกระจายตัว ส่วนพอลิเมอร์ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่เลือกใช้ เทคนิคนี้จะช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Agglomeration) ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้าง การเตรียมวัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิคนี้ สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกตได้ง่าย หลังจากนั้นเทหล่อสารละลายดังกล่าวในแม่พิมพ์ และระเหยตัวทำละลายอินทรีย์หรือตกตะกอน

2. การผสมแบบหลอมเหลว (Melt method)

เทคนิคนี้จะผสมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่เลือก โดยอาศัยการให้ความร้อนทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว สายโซ่ของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะค่อยๆ เคลื่อนที่เข้าไประหว่างชั้นของเคลย์เนื่องจากแรงเฉือน ทำให้ได้วัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว หรือ แบบแตกกระเจิง

3. In situ intercalative polymerization

ในเทคนิคนี้มีลักษณะคล้ายกับการเตรียมแบบสารละลาย แต่แตกต่างกันที่เทคนิคนี้จะเตรียมจากมอนอเมอร์ โดยชั้นของเคลย์บวมตัวอยู่ในมอนอเมอร์ หลังจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน พอลิเมอร์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสามารถเริ่มได้ด้วยความร้อน รังสี หรือด้วยตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ

2.7 ลักษณะสำคัญของวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์ [3]

1. มีความใส เพราะอนุภาคนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส

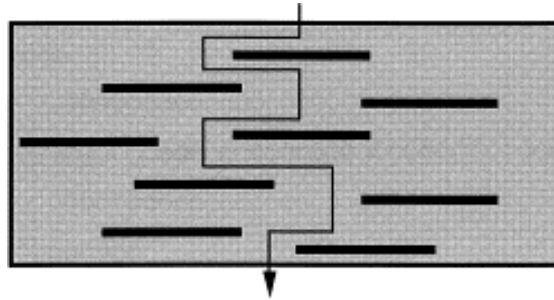
2. มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นซิลิเกต แม้จะเติมในปริมาณที่น้อยมากก็ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างมาก

3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซ เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น และมีอัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดสูง จึงเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

4. ทนความร้อนได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้จะให้ถ่านปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับได้อย่างรวดเร็ว

5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า จะทำให้วัสดุประกอบดังกล่าวนำไฟฟ้าหรือนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

6. สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ทำให้ช่วยลดปัญหาขยะ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์เมื่อเติมเคลย์ลงไปเป็นสารเติมแต่ง [3]

2.8 การกั้นการซึมผ่านของอากาศ [27]

การกั้นการซึมผ่าน (Barrier properties) ของอากาศ หรือก๊าซต่างๆ ในฟิล์มพอลิเมอร์ จะช่วยให้สามารถนำพอลิเมอร์มาใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้นในงานด้านบรรจุภัณฑ์ การป้องกันการซึมผ่านของอากาศทำได้โดยการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable sheet) เช่น เคลย์ ไมก้า ทัลคัม อื่นๆ ที่มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นแผ่น ลงในฟิล์มพอลิเมอร์บริสุทธิ์ จะช่วยลดการซึมผ่านของอากาศได้ เนื่องจาก

1. พื้นที่ที่ก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้มีพื้นที่ลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ลงไปแทนที่พอลิเมอร์ ซึ่งก๊าซสามารถผ่านได้ดี
2. การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ เนื่องจากเมื่อมีการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ ทำให้ก๊าซต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดโค้งรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้

การลดการซึมผ่านของก๊าซสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของคัสเลอร์ (Cussler's model) แบบจำลองของคัสเลอร์ (Cussler's model) [28]

คัสเลอร์ได้อธิบายพฤติกรรมการแพร่ผ่านของก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลเล็กๆ ผ่านพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ ในกรณีที่แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้มีการจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่แพร่ผ่านของก๊าซ และแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูง การแพร่ผ่านของก๊าซผ่านแผ่นฟิล์มขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความคดเคี้ยวรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้
2. ความแน่นของช่องว่างระหว่างแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้
3. ความต้านทานการขยับของแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้

แบบจำลองของคัสเลอร์ แสดงได้ดังสมการที่ 1 โดยสมมติว่าการแพร่ผ่านขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้ และสัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

$$\frac{D}{D'} = \frac{1}{1 + \frac{(L/2W)^2 \phi_f^2}{(1 - \phi_f)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของวัสดุประกอบ (Diffusion coefficient of the composites)

D' คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (Diffusion coefficient of the pure polymer)

L คือ ความยาวของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

W คือ ความกว้างของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

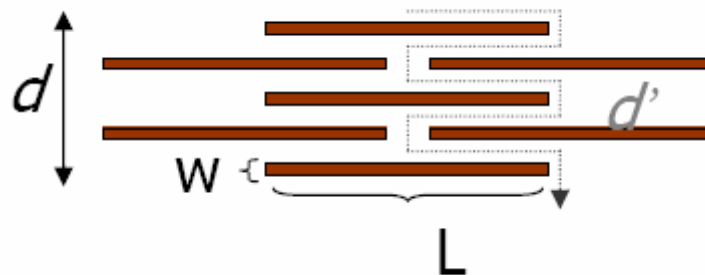
ϕ_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

และสามารถคำนวณความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้โดยสมการที่ 2

$$\frac{P}{P_0} = \frac{(1 - \phi_f)^2}{1 - \phi_f + (L/2W)^2 \phi_f^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ P คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในวัสดุประกอบ

P_0 คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์



รูปที่ 2.8 ทิศทางเคลื่อนที่ของก๊าซผ่านฟิล์มที่มีการเติมวัสดุซึ่งก๊าซไม่สามารถซึมผ่านได้ [28]

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับทฤษฎีความคดโค้ง (Tortuosity theory) [29] กล่าวได้ว่า ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางการแพร่ผ่านของก๊าซ

เพิ่มขึ้น โดยค่า Tortuosity factor (τ) นิยามว่าเป็น อัตราส่วนของโมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ผ่านแผ่นฟิล์ม (d') ต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม (d) แสดงได้ดังสมการที่ 3

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \right] \phi_f \quad (2.7)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของแผ่นเคลือบ

W คือ ความกว้างของแผ่นเคลือบ

ϕ_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นเคลือบ

และสามารถคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้จาก

$$\frac{P}{P_0} = \frac{(1 - \phi_f)}{\tau} \quad (2.8)$$

เมื่อ P คือ ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซผ่านวัสดุประกอบ

P_0 คือ ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซผ่านพอลิเมอร์บริสุทธิ์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ A. B. Morgan และ J. D. Harris [30] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ระหว่างพอลิสไตรีนกับเคลย์ โดยการผสมแบบสารละลาย (Solvent blending) ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การดัดแปรโครงสร้างของเคลย์และทำการเปรียบเทียบผลจากชนิดของเคลย์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Fluorinated synthetic mica (FSM, ชื่อทางการค้า คือ SOMASIFME-100) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT, ชื่อทางการค้าคือ Cloisite Na⁺) โดยใช้ 1,2-Dimethyl-3-n-hexadecyl imidazolium bromide (DMHDI-Br) ในการดัดแปรโครงสร้างของเคลย์ และขั้นตอนที่ 2 คือ การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิสไตรีนกับเคลย์ โดยเติมเคลย์ 1% และ 2.5% โดยน้ำหนัก ด้วยการผสมแบบสารละลาย พบว่าตัวทำละลายที่เหมาะสมคือ คลอโรเบนซีน เนื่องจากสามารถละลายพอลิสไตรีนได้ดี ทำให้เคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างแล้วเกิดการบวมตัวดี และมีเสถียรภาพสูง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของการใช้เครื่องสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง (Sonication) ขณะเตรียมวัสดุประกอบโดยใช้และไม่ใช้ Sonic horn เพื่อกระจายเคลย์ในตัวทำละลายก่อน แล้วเติมพอลิสไตรีน จากนั้นทำการปั่นกวนของผสมทั้งสองที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ 20 ชั่วโมง แล้วกำจัดตัวทำละลาย โดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุน และตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) ของ MMT มีค่า

มากกว่า FSM และการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง (Sonication) จะทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้น สามารถเตรียมวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated) ได้โดยการใช้แรงสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงด้วย Sonic horn ร่วมด้วย

งานวิจัยของ J. Ma และคณะ [31] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Polydimethylsiloxane (PDMS) และโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+ -MMT) โดยการดัดแปรโครงสร้างของ Na^+ -MMT ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide) จะทำให้ได้ออแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Org-MMT) จากนั้นแช่ Org-MMT 5 กรัม ในคลอโรฟอร์ม 50 ml นาน 5 ชั่วโมง แล้วเติมไดเมทิลไดคลอโรไซเลน มอนอเมอร์ (Dimethyldichlorosilane monomer) ลงไป 25 กรัม นำไปให้แรงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกนาน 1 ชั่วโมง และในขณะเดียวกันทำการผสมเมทานอล 30 ml น้ำ 10 ml คลอโรฟอร์ม 30 ml ในขวดสามคอแล้วค่อยๆ หยดสารละลายข้างต้นลงไปด้วยอัตราเร็ว 1 หยดต่อนาที ที่อุณหภูมิ 0°C และทำการปั่นกวนอย่างแรงแล้วล้างสารละลายที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเติมเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) 200 ml ลงไปในสารละลายดังกล่าว ปั่นกวนนาน 5 นาที และนำสารละลายไปตกตะกอนโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง นำตะกอนที่ได้ละลายในคลอโรฟอร์ม 500 ml และปั่นกวน 10 นาที สารละลายที่ได้จะเรียกว่าออแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดปรับปรุง (Treated-org-MMT) เท Treated-org-MMT ลงในขวดสามคอและเติมพอลิเมอร์ PDMS ลงไปปั่นกวนนาน 1 ชั่วโมง ตกตะกอนสารละลายด้วยเมทานอล วิเคราะห์ Treated-org-MMT ด้วยเทคนิค XRD โดยนำสารละลายของ Treated-org-MMT ระบายให้แห้งในตู้อบสูญญากาศ จากการวิเคราะห์พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเตรียมวัสดุประกอบนาโนผ่านเทคนิค In situ polymerization ทำให้ได้วัสดุประกอบนาโนระหว่าง PDMS/Org-MMT และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ทั้งนี้เนื่องจากโดยปกติแล้วฟีกของ MMT จะขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 4-5 องศา คือมีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 1.97 nm แต่เมื่อเตรียมเป็นวัสดุประกอบแล้วจะไม่พบฟีกที่ตำแหน่งดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า วัสดุประกอบ PDMS/10% MMT ที่เตรียมได้ ทนความร้อนได้ดีขึ้นกว่า PDMS บริสุทธิ์ คือจะเสียดสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 395.4°C แต่เมื่อเตรียมเป็นวัสดุประกอบแล้วพบว่าสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 463.6°C ซึ่งสูงขึ้นถึง 68.2°C

งานวิจัยของ X.A. Fu และคณะ [32] ได้ศึกษาการบวมตัวของออแกโนเคลย์ในสไตรีน และศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated) โดยศึกษาผลของสารซึ่งใช้ในการดัดแปรโครงสร้าง MMT ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ของออแกโนเคลย์ที่เตรียมได้ในสไตรีน การศึกษาเริ่มจากการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยสารดังต่อไปนี้ Octadecylamine (ODA) Hexadecyltrimethyl ammonium bromide (HTAB) Benzalkonium chloride (BAC) และ Vinylbenzylalkyl dimethyl ammonium chloride (VDAC) โดย MMT ที่ใช้ศึกษามีค่า CEC 90 meq/

100 g เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ลงในเคลย์ที่ผ่านการกำจัดสิ่งแปลกปลอมแล้ว เพื่อปรับไอออนของ MMT ให้เป็นชนิดเดียวกัน (Homoionic) ทำให้ได้ Na^+ -MMT แล้วดัดแปรโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากนั้นกรองตะกอนแล้วอบให้แห้งเพื่อนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน โดยผสมออกแกโนเคลย์ในสไตรีนมอนอเมอร์ แล้วทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้ 2,2'-azobisisobutyronitrile (AIBN) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิค XRD พบว่า Na^+ -MMT มีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เท่ากับ 12.4 Å แต่หลังจากการอบด้วยตู้อบสูญญากาศพบว่า Na^+ -MMT จะมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ลดลงเป็น 9.9 Å และเมื่อผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของเคลย์ด้วย จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า Na^+ -MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย ODA มีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์มากที่สุด (21.6 Å) และการศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบนาโนโดยเติมออกแกโนเคลย์ 3.2 % โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใช้สารดัดแปรโครงสร้าง MMT ต่างชนิดกันจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโน จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุประกอบนาโน PS-VDAC-MMT เป็นวัสดุประกอบชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated) และนอกจากนี้พบว่าวัสดุประกอบทนต่อแรงดึงได้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่าง PS และ VDAC-MMT อย่างแข็งแรง

งานวิจัยของ S. Peeterbroeck และคณะ [33] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเมอร์ร่วมเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Poly (ethylene-co-vinyl acetate), EVA) และเคลย์ และทำการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุประกอบที่เตรียมจากเคลย์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง และออกแกโนเคลย์ ทั้งด้านสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ โดยเคลย์ที่ใช้เติมใน EVA มี 3 ชนิดคือ Na^+ -MMT ชนิด Closite[®] Na^+ -MMT ชนิด Nanofil[®] และ Na^+ fluoromica ชนิด Somasif[®] นอกจากนี้ยังดัดแปรโครงสร้างของเคลย์ Closite[®] ด้วยเกลือแอมโมเนียมที่แตกต่างกัน คือ dimethyl bis (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations (Closite[®] 20A) ปรับปรุงด้วย (2-ethylhexyl)-methyl (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations (Closite[®] 25A) และดัดแปรโครงสร้างด้วย bis (2-hydroxyl-ethyl) methyl tallowalkyl ammonium cations (Closite[®] 30A) และวิเคราะห์ออกแกโนเคลย์แต่ละชนิดที่ดัดแปรโครงสร้างได้ด้วยเทคนิค XRD พบว่า Closite[®] 20A มีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์มากที่สุด 22.4 Å ในงานวิจัยจึงใช้ dimethyl bis (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations ในการดัดแปรโครงสร้างของเคลย์ Nanofil[®] ได้เป็น Nanofil[®] 15 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ประมาณ 29 Å และปรับปรุง Somasif[®] ด้วย dimethyl bis (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations ได้เป็น Somasif[®] MAE ซึ่งเมื่อตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 31.1 Å

จากนั้นนำเคลย์แต่ละชนิดนำไปเตรียมวัสดุประกอบกับ EVA โดยเติมเคลย์และอแกโนเคลย์ 5% สำหรับใช้ในศึกษาสัณฐานวิทยา และเติมเคลย์และอแกโนเคลย์ 3% สำหรับศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโน EVA/เคลย์ ซึ่งเตรียมได้โดยการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression) จากนั้นวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบที่เติมเคลย์ชนิดไม่ดัดแปรโครงสร้างจะได้วัสดุประกอบแบบไมโคร เนื่องจากเคลย์ยังคงอยู่กันเป็นชั้นไม่แยกออกจากกัน และระยะห่างของชั้นเคลย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่วัสดุประกอบที่เติมอแกโนเคลย์พบว่าสามารถเตรียมเป็นวัสดุประกอบนาโนได้ เนื่องจากเคลย์เกิดการแยกชั้นออกจากกัน และมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น โดยวัสดุประกอบที่เติม Closite® 20A พบว่าระยะห่างของเคลย์จะเพิ่มจาก 12.1 Å เป็น 38.7 Å วัสดุประกอบซึ่งเติม Nanofil® 15 พบว่าระยะห่างของเคลย์จะเพิ่มจาก 12.2 Å เป็น 40 Å สำหรับวัสดุประกอบที่เติม Somasir® MAE พบว่าระยะห่างของเคลย์จะเพิ่มจาก 12.2 Å เป็น 31.1 Å จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นแบบแทรกตัว (Intercalated) และแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าวัสดุประกอบนาโนระหว่าง EVA/เคลย์ จะมีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น และจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าการเติมอแกโนเคลย์ลงใน EVA จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

งานวิจัยของ W. Dieter [34] ศึกษาการทำวัสดุประกอบนาโนที่ประกอบด้วยพอลิพรอพิลีน (PP) ผสมกับเคลย์ ในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยใช้ปริมาณเคลย์ 5% พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีสีที่ทึบขึ้นและเมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC ไม่พบผลของการเกิดนิวเคลียสและการเกิดผลึก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของสารช่วยในการบวมตัว (Swelling agent) ได้แก่ แนนฟามีจุดเดือดที่ค่อนข้างสูง ทำให้สารช่วยการบวมตัวไม่ระเหยและตกค้างเกิดการขัดขวางการเกิดผลึก จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD จะไม่พบความเป็นผลึกในช่วงมุมของการเบี่ยงเบน 20 ถึง 40 องศา พบว่าอนุภาคมีการจัดเรียงตัวแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าอนุภาคของเคลย์สามารถกระจายตัวสม่ำเสมอ

งานวิจัยของ L. Liu และคณะ [35] ทำการศึกษาวัสดุประกอบนาโนที่ประกอบด้วยไนลอน 6 กับเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง (อแกโนเคลย์) โดยใช้กระบวนการหลอมเหลวของไนลอน 6 เข้าไปในชั้นของเคลย์ (Melt intercalation process) จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์คือ 1.55 nm (2 θ เท่ากับ 2.48 องศา) แต่หลังจากการเตรียมเป็นวัสดุประกอบกับไนลอน 6 พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นเป็น 3.68 nm (2 θ เท่ากับ 2.38 องศา) เมื่อใช้อแกโนเคลย์ต่ำกว่า 10% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาสมบัติทางด้านความร้อนโดยเครื่อง DSC พบว่าเคลย์ที่อยู่ในวัสดุประกอบนาโนนั้นช่วยเพิ่มค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) และทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดผลึกแคบลงรวมทั้งเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดผลึกและผลของการศึกษาสมบัติ

เชิงกลพบว่ายิ่งปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นแต่ความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง

งานวิจัยของ C. Long และ Z. Qi [36] ได้ทำการศึกษาลักษณะความเป็นผลึกและสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโนของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเรต (PET) กับเคลย์ (5% โดยน้ำหนัก) แล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีและมีขนาดอนุภาคในช่วง 10-100 nm และผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC พบว่าวัสดุประกอบนาโนมีค่าอัตราเร็วในการเกิดผลึกสูงกว่า PET บริสุทธิ์ถึง 3 เท่า และผลของสมบัติทางความร้อนพบว่าวัสดุประกอบนาโนมีค่า Heat distortion temperature (HDT) สูงกว่า PET บริสุทธิ์ประมาณ 20-50 °C และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ามอดูลัสสูงกว่า PET บริสุทธิ์ถึง 3 เท่า

งานวิจัยของ T. K. Chen และ K. H. Wei [37] ทำการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิยูรีเทนกับเคลย์ โดยมีพอลิคาโปแลกโตนเป็น prepolymer จะได้เป็นลักษณะของวัสดุประกอบพอลิเมอร์แล้วนำไปศึกษาด้วยเทคนิค XRD เพื่อแสดงโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกของพอลิคาโปแลกโตนในพอลิยูรีเทนกับเคลย์ และพบว่าเมื่อปริมาณของเคลย์เท่ากับ 1.4% จะทำให้วัสดุประกอบพอลิยูรีเทนมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เพิ่มขึ้นตั้งแต่เมื่อมีปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นถึง 4.7 % พบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงจากอิลาสโตเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกมากขึ้น

งานวิจัยของ W. J. Bae และคณะ [38] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ระหว่าง Poly (styrenesulfonic acid graft pyrrole, PSSA-g-PPY) กับ Na⁺-MMT ด้วยเทคนิค In situ polymerization การเตรียมวัสดุประกอบนาโนทำโดยเตรียม Na⁺-MMT ให้เกิดการบวมตัวภายใต้สภาวะกรดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก แล้วเติมลงใน Poly (styrenesulfonic acid-co-pyrrolylmethyl styrene, P(SSA-coPMS)) จากนั้นเติม Pyrrole ลงใน P(SSA-co-PMJS)/Na⁺-MMT จะได้ P(SSA-co-PMS)/Na⁺-MMT โดยศึกษาปริมาณ Na⁺-MMT ที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค Small-angle X-ray scattering (SAXS), XRD และ TEM แสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ และจากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของ Na⁺-MMT เพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบจะลดลง แต่วัสดุประกอบจะสามารถทนความร้อนได้มากขึ้น

งานวิจัยของ M. Avella และคณะ [39] ได้เตรียมวัสดุประกอบนาโนที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติระหว่างแป้งและเคลย์ เพื่อใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อช่วยลดปริมาณของขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติที่มาจากพลาสติก โดยผสมแป้งมันฝรั่งกับพอลิเอสเทอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งแป้งจัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) การนำแป้งมาใช้ในการด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร นอกจากจะทำให้ย่อยสลายได้ง่ายแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิต แต่แป้งมีข้อเสียคือ ดูดความชื้นได้ง่าย และมีสมบัติ

เชิงกลต่ำ ดังนั้นการเติม Na^+ -MMT ลงไปจะช่วยลดการซึมผ่านของไอน้ำ และช่วยให้รับแรงได้ดีขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มของวัสดุประกอบนาโน โดยการเติมเคลย์ให้กระจายตัวใน Thermoplastic starch โดยผ่านกระบวนการแบบหลอมเหลว (Melt processing) โดยฟิล์มนี้ผลิตจากแป้งต่างชนิดกัน เช่น แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันฝรั่งผสมพอลิเอสเทอร์ ที่สามารถย่อยสลายได้ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเติม Na^+ -MMT ลงในแป้งทำให้ผลึกของแป้งลดลงอย่างมาก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า แป้งมันฝรั่ง/ Na^+ -MMT จะมีความอดุลีของยังสูงกว่า แป้งมันฝรั่งผสมพอลิเอสเทอร์/ Na^+ -MMT นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าแป้งกับพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้ Na^+ -MMT ยังช่วยเสริมแรงในวัสดุประกอบ และเกิดเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง และแบบแทรกตัว

งานวิจัยของ Y. S. Choi และคณะ [40] ได้เตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมของอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) และเคลย์ โดยผ่านเทคนิค In situ polymerization โดยทำการศึกษาผลของการใช้เคลย์ 2 ชนิดคือ Na^+ -MMT และ Laponite ผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยเติมเคลย์ทั้ง 2 ชนิดลงในปฏิกิริยาการเตรียม ABS โดยการกระจายเคลย์ในสารละลายที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ก่อน จากนั้นทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยเคลย์ที่ใช้ทั้งหมดจะมีปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของ Na^+ -MMT ต่อ Laponite เท่ากับ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโน ABS/เคลย์ และเคลย์ด้วย Wide-angle X-ray diffraction (WAXD) พบว่าไม่ปรากฏฟีกของ Laponite จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่าเมื่อปริมาณของ Na^+ -MMT ต่ำกว่า 5 % โดยน้ำหนัก วัสดุประกอบที่เตรียมได้จะเป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง แต่ถ้าปริมาณของ Na^+ -MMT มากขึ้นเป็น 7.5% จะได้วัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว จากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าวัสดุประกอบนาโนจะมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า ABS จากการวัดค่า Storage modulus ของวัสดุประกอบนาโน ABS/เคลย์ พบว่าเมื่อปริมาณของ Na^+ -MMT เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Storage modulus เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สามารถทำนายได้ว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณ Na^+ -MMT เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Na^+ -MMT เป็นเคลย์ที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างสูง (Aspect ratio)

งานวิจัยของ J. Xiao และคณะ [41] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Poly (butylenes terephthalate) กับ Na^+ -MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยเฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Hexadecyl trimethyl ammonium chloride, OMT-C16) และซีทิลไพริเดียมคลอไรด์ (Cetyl pyridium chloride, CPC) และศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ และเคลย์ที่ดัดแปรโครงสร้างที่เตรียมได้ โดยเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เป็น Na^+ -MMT เตรียมโดยอัตราส่วนของเคลย์ต่อ CPC หรือ OMT-C16 ในอัตราส่วน 1:1 โมล ปั่น-
กวนที่อุณหภูมิ 80°C นาน 5 ชั่วโมง และนำไปเตรียมเป็นวัสดุประกอบโดยผสมเคลย์ที่ดัดแปร-
โครงสร้างแล้วกับ PBT ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยเติมเคลย์ 3% โดยน้ำหนัก
จากนั้นวิเคราะห์วัสดุประกอบด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR), XRD, High-
resolution electron microscopy (HREM) และ TEM bright field จากการวิเคราะห์ MMT-OMT-
C16 และ MMT-CPC ด้วย IR จะพบฟีกของ OMT-C16 และ CPC ทำให้ทราบว่าเคลย์ที่ผ่านการดัด
แปรโครงสร้างแล้วจะมี OMT-C16 หรือ CPC แทรกอยู่ระหว่างชั้นเคลย์

จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบและเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD
พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์จะมีระยะห่างเพิ่มขึ้น ในวัสดุประกอบที่เติม Na^+ -MMT ซึ่งเป็น
เคลย์จากธรรมชาติไม่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง พบว่า PBT ไม่สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้น
ของเคลย์ได้ ทำให้ได้วัสดุประกอบแบบไมโคร ส่วนวัสดุประกอบที่เติมเคลย์ที่ผ่านการดัดแปร
โครงสร้างจะเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบ Intercalated และ Exfoliated ผสมกันอยู่ ซึ่งสามารถ
ยืนยันผลได้ด้วยเทคนิค TEM และ HERM และจากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าวัสดุประกอบนา-
โนระหว่าง PBT/MMT-OMT-C16 หรือ MMT-CPC ที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า
PBT/ Na^+ -MMT และ PBT บริสุทธิ์

งานวิจัยของ P. Kampeerappun และคณะ [42] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโน
ของแป้งมันสำปะหลังกับมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) โดยเทคนิคการหล่อจากสารละลาย โดยใช้
ไดเอทาโนลามีนแคตไอออนผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วน 2:1 จากนั้นนำสารที่ได้ผสม
กับแป้งมันสำปะหลัง น้ำกลั่นและโซลิตเซอร์อลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ผสมส่วนผสมทั้งหมดใน
เครื่องปั่น ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเกิดเจล ($70-80^\circ\text{C}$)
จากนั้นเทสารละลายแป้งลงในแม่พิมพ์อะคริลิก ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากการวิเคราะห์ด้วย
เทคนิค XRD พบการเปลี่ยนแปลงของฟีก โดยไม่พบฟีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.59 องศา ซึ่งเป็น
ฟีกของ MMT ซึ่งยังไม่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM
พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้เกิดการผสมในระดับนาโนเมตร ถึงแม้ว่าจะเตรียมวัสดุประกอบนา-
โนได้ แต่ความทนต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังกลับมีค่าลดลง เปรียบเทียบการดึงยึด ณ จุดขาด
เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมไปทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้ความ
แข็งแรงของวัสดุประกอบลดลง จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มที่
เตรียมได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากไดเอทาโนลามีนเป็นสารมีขั้ว ทำให้ฟิล์มดูดน้ำมากขึ้น

งานวิจัยของ M. V. Burmistr และคณะ [43] ได้ทำการเตรียมวัสดุประกอบและศึกษาสมบัติ
เชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์เชิงเส้น (เช่นพอลิสไตรีน
(PS) และพอลิเอไมด์ (PA) เป็นต้น) กับเบนโทไนด์บริสุทธิ์ และเบนโทไนด์ที่ผ่านการดัดแปร
โครงสร้างด้วยเกลือพอลิเมอร์คิวเทอนารีแอมโมเนียม (PQAS) โดยเตรียมวัสดุประกอบนาโน

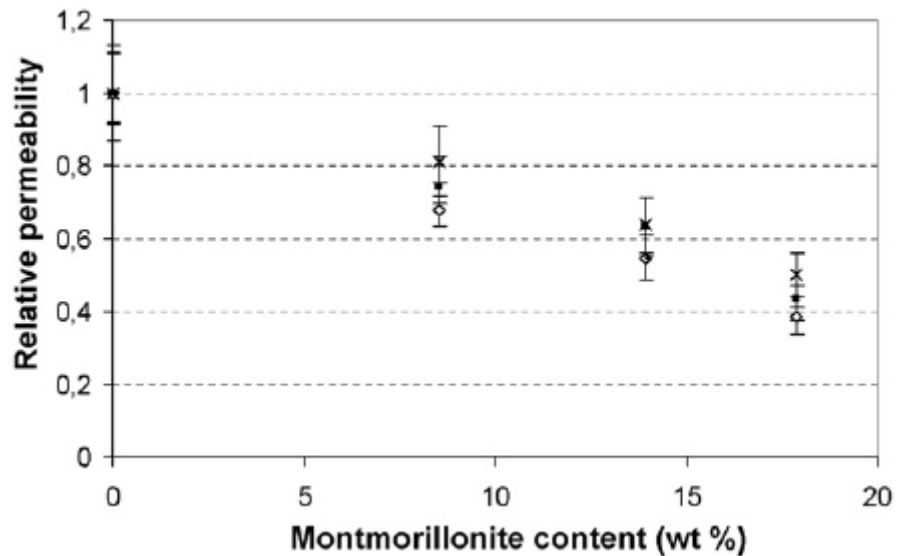
ด้วยการผสมด้วยเครื่องอัดรีด และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบทั้งจาก PS และ PA กับเบนโทไนด์และออลไกโนเบนโทไนด์ ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบดังกล่าวเป็นวัสดุประกอบนาโน จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าวัสดุประกอบระหว่าง PA กับออลไกโนเบนโทไนด์ และวัสดุประกอบระหว่าง PS กับออลไกโนเบนโทไนด์ จะมีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) สูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์หลายเท่า เมื่อปริมาณของเบนโทไนด์และออลไกโนเบนโทไนด์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีปริมาณเบนโทไนด์หรือออลไกโนเบนโทไนด์มากถึง 5% แต่ถ้าปริมาณมากกว่านี้สมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบนาโนกลับลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติมออลไกโนเบนโทไนด์ มีค่าความแข็งแรง และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติมเบนโทไนด์บริสุทธิ์ และการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าวัสดุประกอบระหว่าง PS หรือ PA กับออลไกโนเบนโทไนด์ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ประมาณ 30-60 °C

งานวิจัยของ R. K. Shah และคณะ [44] ได้เตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับออลไกโนเคลย์ และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและกรดเมทาอะคริลิก (Poly (ethylene-co-methacrylic acid) กับออลไกโนเคลย์ ด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโนซึ่งประกอบด้วย ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบ และทดสอบสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ในโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำผ่านฟิล์มของวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ทั้ง 2 ชนิด โดยออลไกโนเคลย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คัดแปรโครงสร้างด้วยไดเมทิลบิสไฮโดรจีเนตเตดโลแอมโมเนียม (dimethyl bis (hydrogenated tallow) ammonium) จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ออลไกโนเคลย์ที่เตรียมได้ด้วย TGA พบว่ามีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบประมาณ 48 % และออลไกโนเคลย์ที่เตรียมได้มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่ากับ 35.1 Å จากนั้นทำการผสมพอลิเมอร์และออลไกโนเคลย์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยเติมออลไกโนเคลย์ในปริมาณ 1% และ 3% โดยน้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มวัสดุประกอบทั้งสองชนิดโดยการเป่าขึ้นรูป ฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้มีลักษณะของพื้นผิวที่ดี นอกจากนี้ฟิล์มตัวอย่างของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ที่เตรียมได้จะใสไม่มีสี สำหรับฟิล์มของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จะขุ่นขึ้นเล็กน้อย และจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณของออลไกโนเคลย์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าวัสดุประกอบนาโนทั้งสองชนิดมีสมบัติเชิงกล และมีสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซที่ดีกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และวัสดุประกอบนาโน Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/ออลไกโนเคลย์มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อมีการเติมออลไกโนเคลย์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของ Poly (ethylene-co-methacrylic acid) ส่วนในฟิล์มวัสดุประกอบนาโน LDPE/ออลไกโนเคลย์ที่มีการเติมออลไกโนเคลย์ 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 25% นอกจากนี้การเติมออลไกโนเคลย์ในวัสดุประกอบจะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าการดึงยืด ณ จุดขาด นอกจากนี้วัสดุประกอบนาโน (Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/ออล-

แกโนเคลย์ มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าการดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าวัสดุประกอบนาโน LDPE/อแกโนเคลย์และยังพบว่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มวัสดุประกอบ Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/อแกโนเคลย์ มีค่าลดลงประมาณ 40% และมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง 60% เมื่อมีการเติมออร์แกโนเคลย์ลงไปในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ส่วนสมบัติกั้นการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุประกอบนาโน LDPE/อแกโนเคลย์ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุประกอบที่เตรียมได้เกิดการแตกกระเจิง (Exfoliated) ในฟิล์มวัสดุประกอบนาโนต่ำกว่า Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/อแกโนเคลย์

งานวิจัยของ E. Picard และคณะ [45] ได้ศึกษาสมบัติการกั้นการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุประกอบนาโนระหว่างไนลอน 6 (PA6) กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง (OMMT) ที่มีปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 30.8% ด้วยการผสมแบบหลอมเหลวโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ที่มี L/D เท่ากับ 36 แล้วเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโน PA6/OMMT ด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป โดยเตรียมฟิล์มที่มีปริมาณของสารอินทรีย์ใน OMMT เท่ากับ 6% 10% และ 13% โดยน้ำหนัก ได้ฟิล์มวัสดุประกอบ PANC6, PANC10 และ PANC13 ตามลำดับ และฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนา 80 ± 5 ไมครอน จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ฟิล์มวัสดุประกอบนาโน PA6/OMMT ด้วย XRD โดยทำการวัดตั้งแต่มุม 2θ เท่ากับ 1.5° ถึง 9° ไม่ปรากฏพีกซึ่งแสดงเอกลักษณ์ของ OMMT ในวัสดุประกอบนาโน PANC6 และ PANC10 แต่จะพบพีก 2θ เท่ากับ 5° และพบพีกเล็กๆ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2° (d_{001} เท่ากับ 44 Å) ในวัสดุประกอบนาโน PANC13 ทั้งนี้เนื่องจาก OMMT ในวัสดุประกอบ PANC13 เกิดการแตกกระเจิงอย่างไม่สมบูรณ์ ทำให้ในวัสดุประกอบดังกล่าว มีทั้ง OMMT ที่เกิดการแตกกระเจิง (Exfoliated) และ OMMT ที่ไม่แตกกระเจิง (Intercalated)

จากการทดสอบสมบัติกั้นการซึมผ่านของก๊าซได้แก่ อีเลียม ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไอน้ำ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้น ฟิล์มวัสดุประกอบนาโนจะกั้นการซึมผ่านของก๊าซได้ดียิ่งขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 กล่าวคือก๊าซต่างๆ จะแพร่ผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโน PA6/OMMT ได้ยากกว่าการแพร่ผ่านฟิล์มของ PA6 และฟิล์มวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีสมบัติการกั้นการซึมผ่านของก๊าซที่ดีขึ้นเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น



(◇) helium, (■) hydrogen, (×) water, and (—) oxygen.

รูปที่ 2.9 การซึมผ่านของก๊าซเมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้น [46]

งานวิจัยของ T. Ogasawara และคณะ [46] ได้ศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซฮีเลียมผ่านวัสดุประกอบนาโนระหว่างอีพอกซีกับมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง 2 ชนิดคือ Nanomer™ I.30E (MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วย Octadecylamine) และ Nanofil™ 32 (MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วย Benzyl dimethyl stearyl ammonium chloride) จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ Nanomer™ I.30E และ Nanofil™ 32 พบว่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่ากับ 2.3 nm และ 1.9 nm ตามลำดับ จากนั้นเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างอีพอกซีกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างในปริมาณ 1, 3 และ 6 phr โดยการผสมอนุภาคของ Nanomer™ I.30E หรือ Nanofil™ 32 ลงในอีพอกซีที่อุณหภูมิ 75 °C นาน 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่องผสมเชิงกล จากนั้นเติมสารเชื่อมโยง แล้วเทลงในแม่พิมพ์เทฟลอน (PTFE) ให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 1 ชั่วโมง เตรียมชิ้นงานที่มีความหนา 2 mm จากนั้นทำการทดสอบการซึมผ่านก๊าซฮีเลียมผ่านวัสดุประกอบ โดยผ่านก๊าซฮีเลียมเข้าไปยังด้านบนของแผ่นฟิล์มด้วยอัตราเร็ว 50 ml/min และวัดความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซฮีเลียม พบว่าวัสดุประกอบนาโนระหว่างอีพอกซี/มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซฮีเลียมลดลง เมื่อเทียบกับอีพอกซี และเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นทำให้ก๊าซฮีเลียมซึมผ่านวัสดุประกอบของอีพอกซีได้ลดลง

งานวิจัยของ P. C. Meneghetti และ S. Qutubuddin [28] ได้เตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารประกอบอินทรีย์ 4 ชนิดคือ ออกตะเดซิลเอมีน (Octadecyl-amine, C18amine) ออกตะเดซิลไดเมทิลบีเทน

(Octadecyldimethyl-betaine, C18DMB) ไวนิลเบนซิลโดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Vinylbenzyl-dodecyl dimethyl ammonium chloride, VDAC) และ ไวนิลเบนซิลออกตะเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Vinylbenzyl-octadecyl dimethyl ammonium chloride, VODAC) โดยเติมมอนอเมอร์ลอโนไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างในปริมาณ 5, 10, 20 และ 30 phr จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน พบว่าวัสดุประกอบนาโน SBR/VODAC-MMT สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าวัสดุประกอบนาโนของ SBR กับมอนอเมอร์ลอโนไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุประกอบนาโน SBS กับมอนอเมอร์ลอโนไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างจะช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ โดยเมื่อมีการเติม VODAC-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr พบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง 32% และ 60% ตามลำดับ และพบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงสำหรับทุกๆ ตัวอย่างของวัสดุประกอบนาโน เมื่อปริมาณ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างเพิ่มขึ้นดังนี้ ในวัสดุประกอบนาโน SBR/VDAC-MMT พบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะลดลง 21% และ 49% เมื่อเติม VDAC-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ ในวัสดุประกอบ SBR/C18DMB-MMT พบว่ามีการลดลงของการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะลดลง 21% และ 36% เมื่อเติม C18DMB-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ และในวัสดุประกอบนาโน SBR/C18amine-MMT พบว่ามีการลดลงของการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุประกอบระหว่าง SBR/ Na^+ -MMT จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้ จะมีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง 11% และ 24% เมื่อเติม Na-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า เมื่อมีการเติมอนุภาคซึ่งก๊าซไม่สามารถแพร่ผ่านได้ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้ก๊าซออกซิเจนใช้เวลานานขึ้นในการซึมผ่านพอลิเมอร์เมทริกซ์