



บทที่ 2

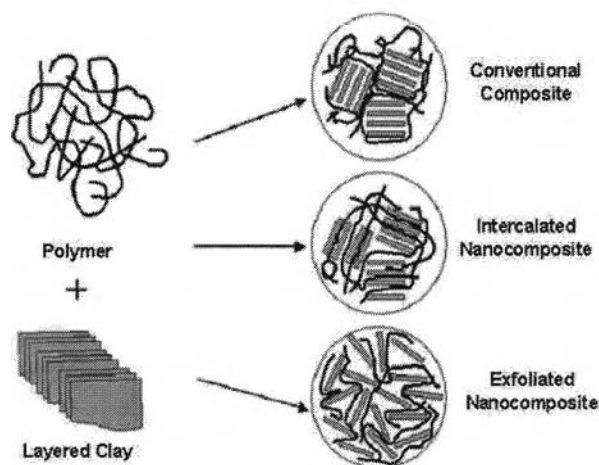
วารสารปริทรรศน์

2.1 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites)

นาโนคอมพอสิตเป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่จะช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตแบบดั้งเดิมทั้งในด้านความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานต่อสารเคมี และลดความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น นาโนคอมพอสิตที่ได้รับความสนใจและพัฒนากันอย่างหลากหลายในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยการเติมสารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ โดยจะเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงให้มากยิ่งขึ้น

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้พัฒนาสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D Laboratory โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposite) [4] เนื่องจากเมื่อทำการผสมพอลิเมอร์กับออร์แกนอเคลย์จะทำให้ชั้นซิลิเกตขยายห่างออกจากกัน จึงเรียกว่า พอลิเมอร์เคลย์นาโนคอมพอสิต (polymer-clay nanocomposites) ซึ่งการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์จะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต

(ที่มา : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca>, Polymer nanocomposites, April 2005)

จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าการทำวัสดุคอมพอสิตด้วยพอลิเมอร์-เคลย์ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. Conventional composites : อนุภาคของเคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม และพอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. Intercalated nanocomposites : เคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม ระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวโดยสายโซ่พอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์
3. Exfoliated nanocomposites หรือ delaminated nanocomposites : ชั้นของเคลย์จะกระจายตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน C ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง และยังทำให้มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สดีขึ้น

2.1.1 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมพอสิต

วัสดุพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมพอสิตมีลักษณะสำคัญ [5] ดังนี้

1. มีความใส เพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
2. มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต
3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊ส เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์มีพื้นที่ผิวและ aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนของแก๊สเพิ่มมากขึ้น
4. ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับได้รวดเร็ว
5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในสถานะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

2.1.2 ผลกระทบที่สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมพอสิต

วัสดุพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมพอสิตสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ด้าน[5] โดยการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังนี้

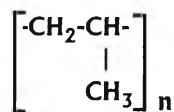
1. ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น timing-beltting cover โครงงูใต้หลังคา คอนโซล ตัวถัง ล้อรถยนต์ และถังน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ
2. สีพ่นรถยนต์ ที่ให้ความคงทนมากขึ้น

3. แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยาและอาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหารเสื่อมสภาพ ยืดอายุสินค้าให้ยาวนานขึ้น
4. ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
5. ป้องกันการสูญเสียแก๊สภายในลูกบอล ลูกเทนนิส

2.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

พอลิโพรพิลีนซึ่งแสดงสูตร โครงสร้างทางเคมีไว้ในรูปที่ 2.2 เป็นเม็ดพลาสติกที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [6] จึงสามารถใช้ทดแทนกันได้ระดับหนึ่ง แต่สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส เหนียว แข็งแกร่ง ทนต่อแรงอัดและแรงกระแทก ไม่สึกกร่อนง่าย ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- Homopolymer polypropylene
- Block copolymer polypropylene และ
- Random copolymer polypropylene ดังจะได้กล่าวถึงต่อไปโดยลำดับ



รูปที่ 2.2 สูตร โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน
(ที่มา : ปรึชา พหลเทพ, 2544)

2.2.1 Homopolymer polypropylene

เป็นพอลิโพรพิลีนที่มีสมบัติแข็งแรงกว่าพอลิเอทิลีน ขึ้นรูปง่ายใช้ในงานฉีดทั่วไป งานที่ใช้เม็ดพลาสติกประเภทนี้ [7] ได้แก่

- งานฉีดขึ้นรูป เช่น ถัง กะละมัง ตะกร้า ของเด็กเล่น เฟอรันิเจอร์ เครื่องใช้ทางการแพทย์ และภาชนะบรรจุทั่วไป เป็นต้น
- แผ่นฟิล์ม ใช้ทำฟิล์มใส ถุงร้อน ถุงเย็น ซองใส่เสื้อเชิ้ต ฟิล์มห่อหุ้มบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน
- งานเป่า เช่น เป่าขวด ที่นั่ง ามาใช้งานเช่นเดียวกับ HDPE

- งานสิ่งทอ ทำเส้นใย กระสอบสาน เชือก แห และอวน เป็นต้น

2.2.2 Block copolymer polypropylene

เป็นพอลิโพรพิลีนที่รับแรงกระแทกสูงกว่าประเภท homopolymer ขึ้นรูปง่าย งานที่ใช้ เช่นเดียวกับ homopolymer Polypropylene แต่ต้องรับแรงกระแทกสูงที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำ เช่น toptable ในตู้เย็น ชิ้นส่วนเครื่อง ชักผ้า อุปกรณ์รถยนต์ เฟอรัรนีเจอร์ ภาชนะบรรจุที่ต้องการรับแรงกระแทกสูง แบตเตอรี่ และเก้าอี้สนาม เป็นต้น

2.2.3 Random copolymer polypropylene

เป็นพอลิโพรพิลีนที่มีความใสเป็นสมบัติพิเศษ ใช้งานฉีดเป็นส่วนใหญ่ งานที่ใช้ ได้แก่ กล่องบรรจุอาหารทั่ว ๆ ไป

2.3 แป้ง (Starch)

แป้งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งพืชสังเคราะห์และเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ที่บริเวณราก เมล็ด และผลของพืชในรูปเม็ดแป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่เกิดจากกลูโคสแต่ละหน่วยต่อกันเป็นสายยาว เมื่อเติมกรดหรือเอนไซม์ที่สามารถย่อยแป้งได้ จะทำให้แป้งถูกย่อยสลายกลายเป็นน้ำตาลและกลูโคส

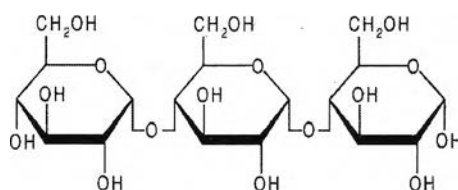
แป้งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือเป็นแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-1,000 ไมโครเมตร

หน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบด้วย คาร์บอน, ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์แบบกึ่ง (อะไมโลเพกทิน) [8]

2.3.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบโซ่สายตรง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง a-1,4-glucosidic linkage [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะนำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไปตั้งแต่ 2,000-500,000 [9] โดยทั่วไปอะไมโลสไม่ละลายน้ำ แต่กระจายตัวอยู่ในน้ำเป็นไมเซลล์ [9] การ

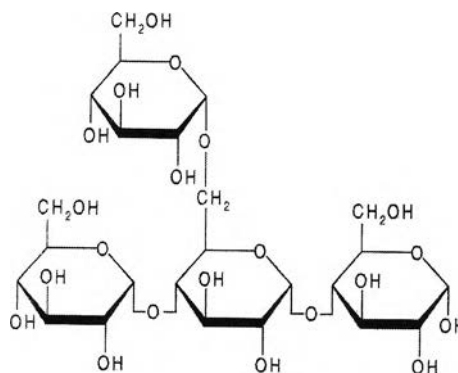
จัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบและไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง จนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะไมโลสจะละลายออกจากเม็ดแป้ง และเมื่อเย็นตัวลง โมเลกุลของอะไมโลส จะรวมตัวกัน กรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งต่ำ อะไมโลสจะตกตะกอน (precipitation) แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูง โมเลกุลอะไมโลสจะรวมตัวกันทำให้เกิดเจล (gelling) เมื่ออะไมโลสรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ในแป้งมีอะไมโลสอยู่ประมาณร้อยละ 20-25



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส
(ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

2.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นแป้งที่มีโครงสร้างแตกแขนง โดยแต่ละแขนงจะประกอบไปด้วยหน่วยกลูโคสประมาณ 12 หน่วย แกนของอะไมโลเพกตินจะยึดกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage แต่ละจุดที่มีการแตกแขนงจะยึดกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage โดยทั่วไปปกติอะไมโลเพกตินจะเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000,000 เมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีม่วงแดง มีอยู่ประมาณ 75-80% ของแป้งทั้งหมด [9]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน
(ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

โดยปกติเมื่อแป้งผสมอยู่ในน้ำแป้งจะแตกตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ แต่จะไม่ละลายน้ำ เนื่องจากอนุภาคของแป้งจะมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะละลายน้ำได้ แป้งมีความหนาแน่น

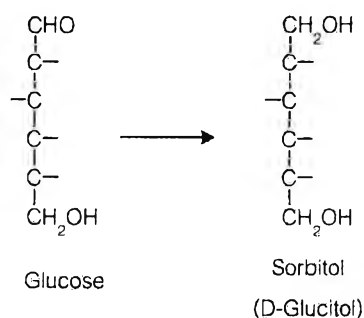
ค่อนข้างสูงประมาณ 1.45-1.64 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร [9] (ขึ้นกับชนิดของแป้ง) ดังนั้น แป้งจึงพร้อมที่จะตกตะกอนหลังจากแขวนลอยอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยสูงขึ้นประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส (ขึ้นกับชนิดของแป้ง) น้ำจะเข้าไปในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (amorphous region) และพลังงานความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจนในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (crystalline region) ทำให้สามารถเข้าไปในเม็ดแป้งมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดบวมอย่างรวดเร็ว ความหนาแน่นจะลดลง ความหนืดจะสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นผิวของเม็ดแป้งจะเปิดมากขึ้นจนเม็ดแป้งเกิดการแตกอย่างฉับพลัน ทำให้อะไมโลสออกจากเม็ดแป้งเกิดเป็นเจลขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจล (gelatinization)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะและสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยกลูโคส 200-1,200 หน่วย	1. ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อกันและมีกิ่งก้านสาขาแต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
2. ละลายน้ำได้ดี	2. ละลายน้ำได้น้อย
3. เมื่อต้มในน้ำจะข้น หนืดน้อย และขุ่น	3. เมื่อต้มในน้ำจะข้น หนืดมาก และใส
4. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	4. ให้สีม่วงแดงกับสารละลายไอโอดีน
5. ต้มแล้วทิ้งไว้จับตัวเป็นวุ้น	5. ต้มแล้วทิ้งไว้ไม่จับตัวเป็นวุ้น
6. จัดเรียงตัวเป็นผลึก	6. จัดเรียงตัวเป็นอสัณฐาน

2.4 การผลิตน้ำตาลแอลกอฮอล์จากแป้ง

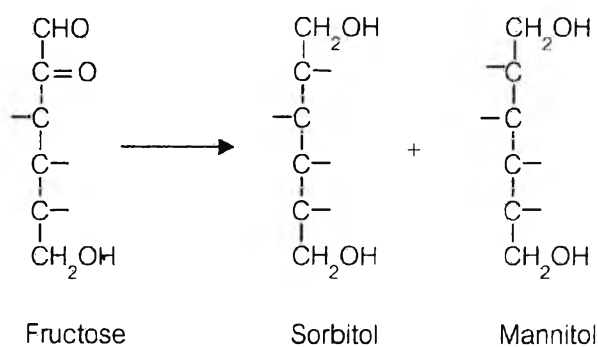
น้ำตาลแอลกอฮอล์ซึ่งผลิตจากแป้งที่มีความสำคัญและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ได้แก่ ซอร์บิทอล (sorbitol) และแมนนิทอล (mannitol) ซึ่งเป็นผงละเอียด สีขาว มีรสหวานเล็กน้อย ละลายน้ำได้ดี ผลิตได้จากการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ในน้ำตาลกลูโคส ในภาวะที่เหมาะสม (120-150 องศาเซลเซียส, ที่ความดันไฮโดรเจน 30-70 atm, pH 5-6 โดยใช้ Rancy Nickel 3-6% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิล กลุ่มของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเติมไฮโดรเจนของกลูโคสได้เป็นซอร์บิทอล

(ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

ในกรณีที่ทำกรเติมไฮโดรเจนกับน้ำตาลฟรุกโทส จะได้ซอร์บิทอลและแมนนิทอล ซึ่งในกรณีปกติจะได้แมนนิทอลประมาณ 30% [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเติมไฮโดรเจนของฟรุกโทส ได้ซอร์บิทอลและแมนนิทอล

(ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

สมบัติทางเคมีและกายภาพของซอร์บิทอลและแมนนิทอลแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ในรูปผลึกซอร์บิทอลและแมนนิทอลจะมี cooling effect [9] เนื่องจากมีค่าความร้อนในการละลายเป็นลบ (คายความร้อน) สามารถละลายในน้ำและเสถียร

แมนนิทอลมีตลาดใหญ่ คือ ตลาดยาเม็ด หมากฝรั่งและอาหารที่มีลักษณะแข็ง เนื่องจากสมบัติการดูดความชื้นที่ต่ำ

ซอร์บิทอลมีตลาดผู้บริโภคใหญ่ คือ ยาสีฟัน วิตามินซี ยา เครื่องสำอางและอาหารสำหรับคนเป็นโรคเบาหวาน

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำตาลแอลกอฮอล์

	ซอร์บิทอล	แมนนิทอล
สูตรเคมี	$C_6H_{14}O_6$	$C_6H_{14}O_6$
น้ำหนักโมเลกุล	182.17	182.17
จุดหลอมเหลว	110-112°C	165-168°C
ค่าความร้อนในการละลายที่ 25°C	-26.5 cal/g	-28.9 cal/g
ค่า Specific rotation (ในสารละลาย 10%)	-1.9859°	-40°
ความสามารถในการดูดความชื้น	ดูดความชื้น	ไม่ดูดความชื้น
ความสามารถในการละลายในน้ำ (กรัม/100 กรัม ที่ 25°C)	ประมาณ 235	ประมาณ 22

2.5 แร่ดิน (Clay minerals)

แร่ดินเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrated aluminous silicate) มีสมบัติ plasticity เมื่อผสมกับน้ำหรือนำไปอบแห้งจะเปราะ โดย plasticity ของแร่ดินจะขึ้นกับธรรมชาติและความละเอียดของแร่ดิน ถ้าละเอียดมากแร่ดินจะมี plasticity สูง แร่ดินส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบแผ่น (sheet silicate) จัดอยู่ในพวก phyllosilicate ประกอบด้วยชั้นของอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล (Al-octahedral) และซิลิกอนเตตระฮีดรอล (Si-tetrahedral) และในระหว่างชั้นรอยต่อของชุด (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และ โพแทสเซียม หรือ โมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้ดินแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน กลุ่มแร่ดินที่สำคัญ ได้แก่ illite, kaolinite, smectite และ vermiculite ยกเว้นพวกแอตตอปุลไกต์ (attapulgite) หรือที่รู้จักกันในนามปาลิโกร์สไกต์ (palygorskite) ซึ่งมีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นเหมือนลูกโซ่ (chain silicate)

แร่ดินในธรรมชาติสามารถแบ่งแยกตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

2.5.1 กลุ่มแคลิไนต์ (Kaolinite group)

มีสูตรเคมีดังนี้ คือ $2Al_2Si_2O_5(OH)_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยแผ่น Si-tetrahedral 1 ชั้น ยึดกับแผ่น Al-octahedral 1 ชั้น และวางซ้อนกันไปตามแนวตั้งแกน c และแต่ละแผ่นของ Al-octahedral และ Si-tetrahedral จับยึดต่อเนื่องไปตามแนวนอนที่เรียกว่า แกน a

และ b เคาลินต์มีรูปผลึกแบบไตรคลีนิก (triclinic) แร่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เคาลินต์ (kaolinite) ดิกไกต์ (dickite) แนโคริตต์ (nacrite) แฮลลอยไซต์ (halloysite) และแอลโลเฟน (allophane) โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ไม่มีการแทนที่ของธาตุภายในโครงสร้างหรือมีน้อยมาก ซึ่งเป็นผลทำให้มีประจุถาวรต่ำ (low permanent charge)

2. แต่ละหน่วยของผลึก (crystal unit) ดูดยึดกันค่อนข้างเหนียวแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในช่อง (interlayer) มีผลทำให้แร่ดินเหนียวชนิดพวกนี้มีการขยายตัวและหดตัว (swelling and shrinking) น้อยมาก

3. จำนวนหน่วยที่ซ้อนดูดยึดกันมีค่อนข้างมาก จึงทำให้ขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ ขนาดของแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้จะอยู่ระหว่าง 0.1- 5.0 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-2.0 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่จึงมีพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) น้อย และมีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface) น้อยมากหรือไม่มีเลย

4. มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity: CEC) ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยและมีประจุลบในผลึกน้อยมาก CEC จะมีค่าประมาณ 3-15 meq/100 g

2.5.2 กลุ่มแเรอิลไลต์ (Illite group)

มีสูตรเคมีดังนี้ คือ $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากในหินตะกอน มีลักษณะทั่วไปคล้ายแรมัสโคไวต์ แร่นี้บางที เรียกว่าไมกา (mica) และจะคงสภาพอยู่ได้ดีถ้ามีความเข้มข้นของซิลิกอนและอะลูมิเนียมปานกลางถึงสูงในสภาพแวดล้อมที่เกิด แต่ถ้ามีไฮโดรเนียมไอออนปานกลางถึงสูง ทำให้เสียเสถียรภาพ และจะเปลี่ยนไปเป็นเวอร์มิคิวไลต์ โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ประมาณ 15-25% ของ Si^{+4} ในชั้นเตตระฮีดรอลถูกแทนที่ด้วย Al^{+3} จึงทำให้เกิดประจุลบถาวร (permanent negative charge) มากในชั้นเตตระฮีดรอล

2. ประจุลบที่เกิดขึ้นถูกทำให้สมดุลด้วย K^+ ในช่อง ซึ่งขนาดของ K^+ นี้พอเหมาะ กับช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นของเตตระฮีดรอลของแผ่นบนและแผ่นล่างที่ซ้อนกันอยู่

3. ระยะทางระหว่างประจุลบที่เกิดขึ้นมากในชั้นเตตระฮีดรอล และ K^+ ใกล้เคียงกันมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดสูงมากตามกฎของคูลอมบ์

4. K^+ เปรียบเสมือนสลักทำหน้าที่ยึดหน่วยของผลึกแต่ละหน่วยเข้าไว้ด้วยกันค่อนข้างแน่น มีผลทำให้ไม่สามารถยึดเข้าหรือออกได้ จึงเรียกว่าเป็นพวกที่ไม่ขยายตัว

5. K^+ เป็นพวกที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (non-exchangeable) หรือเป็นพวกที่ถูกตรึง (K-fixation)

6. มีการขยายตัวและหดตัว พื้นที่ผิวภายในและภายนอก และความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนค่อนข้างต่ำ แต่มีสมบัติเหล่านี้มากกว่าแร่ดินเหนียวพวกเคโอลิไนต์ (CEC อยู่ระหว่าง 15–40 meq/100 g) [10]

2.5.3 กลุ่มแร่สมคไทต์ (Smectite group)

มีสูตรทางเคมีดังนี้ คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดยที่ M คือ cation เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหินชั้น (sedimentary rock) และทราย (sand) เป็นกลุ่มของแร่ดินที่สามารถแสดงการขยายตัว (expandability) เมื่อใส่ น้ำ หรือ โมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างและมีสมบัติการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange) แร่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) บีเดลไลต์ (beidellite) และนอนโทรไนต์ (nontronite) แร่พวกนี้มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 2 : 1 สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอิฐ (brick) เซรามิก (ceramic) ใช้ทำโคลนเจาะ (drilling mud) และผสมทรายทำกักกัมมันตรังสีได้อีกด้วย มีลักษณะแปรผันไปได้มาก เพราะองค์ประกอบแปรผันได้ โดยเฉพาะน้ำแม่แต่ค่าครรชนีหักของแสงยังเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง 1.50-1.64 แร่ในกลุ่มนี้มีการแทนที่ของอะตอมมาก องค์ประกอบของแร่จะแปรผันออกไปจากสูตรเคมี มีการแทนที่อะลูมิเนียมโดยแมกนีเซียมและแทนที่ซิลิกอนโดยอะลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้เกิดประจุลบบนชั้นโครงสร้างทำให้สามารถดูดซับ (adsorb) แคตไอออน เช่น Ca^{2+} , Na^+ และ $H_3O^+(H^+ + H_2O)$ ไว้ระหว่างชั้นในโครงสร้างได้ ทำให้แร่ชนิดนี้พองตัวเมื่อถูกน้ำ และแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ ปกติมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ที่มีอะลูมิเนียมสูง และจะมีแร่ที่อยู่ในกลุ่มนี้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่องค์ประกอบแตกต่างกันออกไปบ้าง คือ นอนโทรไนต์ ซึ่งมีสีเหลืองแกมเขียว มีเหล็กมาก เพราะมีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยเหล็ก, ซาโปไนต์ (saponite) มีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยแมกนีเซียม, ซอโคไนต์ (sauconite) มีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยสังกะสี (Zn) และบีเดลไลต์มีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม แร่ชนิดนี้ถ้าถูกน้ำแล้วจับจะลื่นมือเหมือนสบู่และจะทำให้เกิดลักษณะเหมือนวุ้นเมื่อแห้งน้ำ มอนต์มอริลโลไนต์พบในหินตะกอนและจากการผุพังสลายตัวของเถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash)

การดุลประจุ (charge balance) เกิดขึ้นจากการแทนที่ของไอออนของ Al หรือ Mg ในชั้นออกตะฮีดรอล (octahedral) และชั้นเตตระฮีดรอล (tetrahedral) โดยส่วนมากจะใช้ Ca หรือ Na เป็น

ตัวแลกเปลี่ยนประจุ ผลรวมระหว่างความหนาของชั้นดินและพื้นที่บริเวณระหว่างชั้นของดินแต่ละชุดจะมีความกว้างของช่องว่างเท่าๆกัน ซึ่งคำนวณจากระนาบ 001 โดยดูได้จาก X-ray Diffraction ค่า d spacing ของ silica-alumina-silica 1 ชุด ของดิน Na-มอนต์มอริลโลไนต์มีค่าตั้งแต่ 9.6-20 อังสตรอม [10] สำหรับดินที่กระจายตัวในน้ำ ตำแหน่งที่มีประจุบวกหรือโมเลกุลของน้ำอยู่จะเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ประจุลบที่เกิดขึ้นน้อยมากในชั้นเตตระไฮดรอล แต่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของออกตะไฮดรอล (บางส่วนของ Al^{+3} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{+2})
2. ประจุลบที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีปริมาณน้อยกว่าในเวอร์มิคูลไลต์และอิลไลต์
3. ประจุลบที่เกิดขึ้นถูกทำให้สมดุลด้วย Mg^{+2} และ Ca^{+2} ซึ่งมีน้ำล้อมรอบในช่องคล้ายคลึงกับเวอร์มิคูลไลต์
4. แรงคูยัคีระหว่างหน่วยของผลึกกับ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องอ่อน จึงทำให้มีการยึดและหดตัวของดินเหนียวชนิดนี้เป็นไปได้อย่างเต็มที่แล้วแต่ปริมาณความชื้น
5. Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องเป็นพวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้
6. เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก คือ มีขนาดประมาณ 0.1–1.0 ไมครอน [11] มีการสลายตัวหรือแตกหักเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้ง่าย จึงทำให้มีพื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอกสูง และมี CEC ค่อนข้างสูงประมาณ 80–100 meq/100 g [11]

2.5.4. กลุ่มแร่เวอร์มิคูลไลต์ (Vermiculite)

มีสูตรทางเคมีดังนี้ คือ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$ เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มไมกา ซึ่งเกิดขึ้นคลุมรูปร่างของแร่โพလိုโกไฟต์และไบโอไทต์ และมักมีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม ประจุที่ขาดไปทำให้เกิดการแทนที่แมกนีเซียมด้วยเหล็ก (Fe^{3+}) และไอออนที่ถูกดูดซับได้ เวอร์มิคูลไลต์แสดงลักษณะหลายอย่างคล้ายกับมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น การแลกเปลี่ยนแคตไอออน และช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งแปรผันไปตามปริมาณของน้ำที่เป็นองค์ประกอบ และชนิดของแคตไอออนที่ถูกดูดซับไว้ ลักษณะพิเศษเฉพาะตัวของเวอร์มิคูลไลต์ คือ สามารถขยายขนาดไปกับแกน C ได้เพิ่มขึ้นถึง 30 เท่า [11] เมื่อทำให้น้ำร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 250–300 องศาเซลเซียส [11] ผลที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวนี้นำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ เวอร์มิคูลไลต์พบมากในการสลายตัวของโพလိုโกไฟต์ และไบโอไทต์และจะพบในดินบางชนิดโดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

1. ประจุลบที่เกิดขึ้นในชั้นเตตระฮีดรอลเช่นเดียวกับในพวกมัสโคลไวท์ แต่ประจุที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนถูกทำให้สมดุลด้วยประจุบวกซึ่งเกิดขึ้นในชั้นออกเตตระฮีดรอล อันเนื่องมาจากมี Al^{+3} และ Fe^{+3} มากเกินไป
2. ประจุลบสุทธิ (net negative charges) ถูกสมดุลด้วย Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่อง Mg^{+2} และ Ca^{+2} นี้มีน้ำล้อมรอบอยู่ด้วยจึงมีขนาดใหญ่กว่า K^+ ซึ่งมีขนาดใหญ่ไม่พอมะกับช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเตตระฮีดรอลที่ซ้อนกันอยู่
3. Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องนี้เป็นประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้
4. เนื่องจากประจุลบสุทธิมีค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้แรงดึงดูดยึดระหว่างหน่วยของผลึกกับ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องมีพอประมาณ จึงทำให้มีการขยายและหดตัวได้ไม่เต็มที่แล้วแต่ปริมาณของความชื้น
5. มีพื้นที่ผิวภายนอกและภายในตลอดจน CEC ค่อนข้างสูง (100–150 meq/100 g)

2.6 ดินเบนโทไนต์ (Bentonite)

ดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ ทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตาม สมบัติของดินยังแตกต่างกันไปในเรื่องของความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์

ดินเบนโทไนต์ ที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. Natural sodium bentonite หรือ sodium montmorillonit มีการแลกเปลี่ยน Na^+
2. Natural calcium bentonite หรือ calcium montmorillonite มีการแลกเปลี่ยน Ca^{+2}
3. Sodium activated bentonite หรือ sodium activated montmorillonite มีการแลกเปลี่ยนประจุจาก Ca^{+2} กลายเป็น Na^+

โซเดียมเบนโทไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถพองตัวได้มากถึง 15–20 เท่า [11] จากปริมาตรเดิม มีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่นและกันการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลนและใช้อุดยาหรือแนวของเขื่อนทำนบ สำหรับแคลเซียมและแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์ มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนต์ ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสีหรือเป็นสารคีโตนเจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ ยังได้มีการนำไปดัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับ

กรดได้เป็นแอคติเวตเตดเคลย์ (activated clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับ โซดาไฟโดยเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโทไนต์

2.7 แหล่งดินเบนโทไนต์ในประเทศไทย

ในประเทศไทยดินอันดับเวอร์ติโซลล์ ซึ่งมีแร่สมคไทต์ในปริมาณสูงนั้นจะกระจายทั่วไป ในบริเวณที่ราบภาคกลาง ที่ราบสูงตอนกลางของประเทศ ที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพบเพียงเล็กน้อยในภาคตะวันตก แต่ที่พบมากที่สุดอยู่ในแถบจังหวัดภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดลพบุรี สระบุรี และอยุธยา ซึ่งบริเวณที่พบมักมีความสัมพันธ์กับภูเขาหินปูน หินมาร์ล หินบะซอลต์ หินแอนดีไซต์ หรือตะกอนน้ำพาไปค่อนข้างใหม่ หูดินที่พบมี หูดินบ้านหมี่ หูดินลพบุรี หูดินท่าเรือ หูดินคกกระเทียม หูดินวังชมพู หูดินบุรีรัมย์ หูดินวัฒนา และหูดินช่องแค

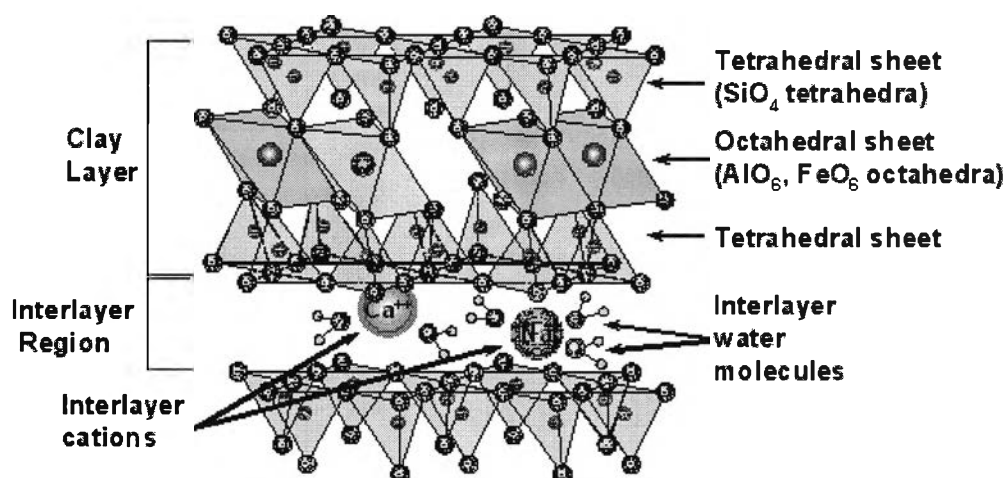
สำหรับประเทศไทยได้มีการสำรวจแร่ดินเหนียวจากภาคต่างๆ ซึ่งกล่าวไว้ในรายงานของ Vacharotayan และคณะ (1962) [10] ดังแสดงในตารางที่ 2.3 พบว่าชนิดของแร่ดินเหนียวที่ตรวจพบในดินซึ่งมีอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมครอน ได้แก่ เกลโอลิไนต์ มอนต์มอริลโลไนต์ อิลไลต์ และเวอร์มิคูไลต์

ตารางที่ 2.3 แหล่งดินเบนโทไนต์ในประเทศไทย

แหล่งที่เก็บตัวอย่างดิน	% ดินเหนียวในตัวอย่างดิน	% อินทรีย์วัตถุ
ภาคเหนือ		
เชียงราย	17.3	2.06
เชียงใหม่	3.8	0.19
ลำปาง	37.5	2.81
ลำปาง	53.3	1.36
ลำปาง	40.0	1.04
ลำปาง	65.3	0.86
ศรีสำโรง	17.8	2.70
ภาคกลาง		
นครนายก	54.3	1.85
ลพบุรี	53.7	1.74
รังสิต	53.4	1.26
บางเขน	64.9	1.74
ทับทิม	25.5	2.65
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		
อุดรธานี	2.4	0.56

2.8 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

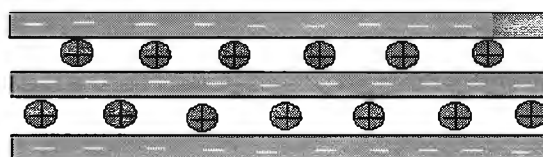
มีสูตรทางเคมีดังนี้ คือ $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางเป็นชั้นของอะลูมินาที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกา แต่ละชั้นมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่าความหนา 200 เท่า ระหว่างชั้นมีช่องว่างขนาดเล็ก เรียกว่า gallery ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

(ที่มา: จุริพร นันทรักษ์, 2548)

ในช่องว่างจะมีแคตไอออน ได้แก่ โซเดียมไอออน (Na^+) หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.8



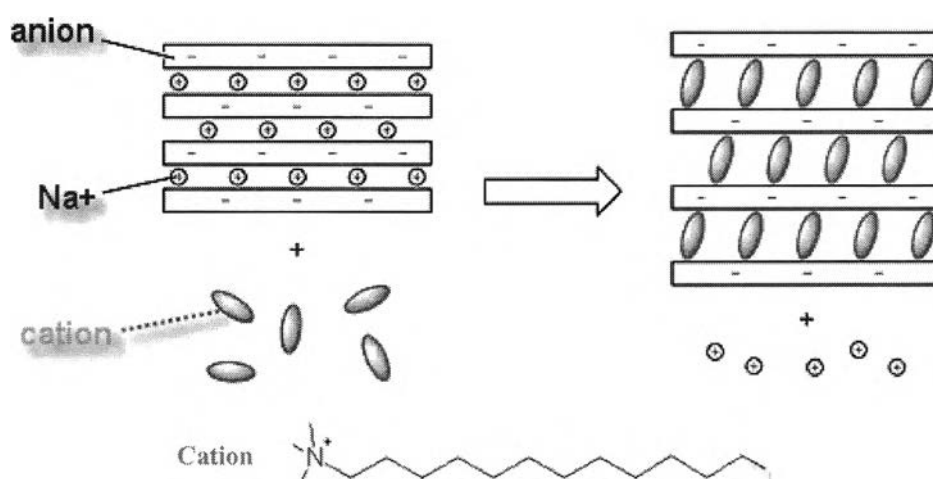
รูปที่ 2.8 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับแคตไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นดิน

(ที่มา: จุริพร นันทรักษ์, 2548)

มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้ยาก ดังนั้น จึงจำเป็นต้องตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อทำให้สามารถเข้าร่วมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยเสริมแรงให้กับพลาสติก ซึ่งจะทำให้สมบัติบางประการของ

พลาสติกที่ขึ้นได้แก่ความต้านแรงดึง (tensile strength) ความต้านแรงคดโค้ง (flexural strength) ความต้านทานความร้อน (heat resistance) เป็นต้น

วิธีที่ง่ายที่สุดในการตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือ การทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออน โดยสารอินทรีย์ที่มีแคตไอออน (organic cation) เช่น ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) หรือฟอสโฟเนียม (phosphonium) จะสามารถเข้าแทนที่แคตไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นดิน ทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปร ที่เรียกว่า ออร์แกโนเคลย์ (organoclay) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



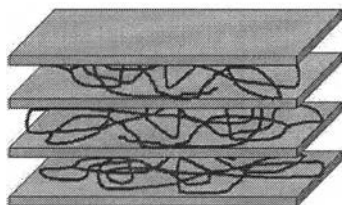
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออนระหว่างแคตไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นดิน กับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน (ที่มา: จูริพร นันทรักษ์, 2548)

ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีสายโซ่อัลคิลที่ยาว (long alkyl chain) เป็นส่วนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อเข้าไปแทนที่ Na^+ ที่อยู่ระหว่างชั้นดินจะทำให้ได้ organoclay ที่มีสมบัติเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น

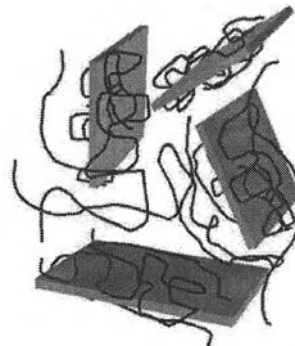
ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก ทำให้ช่อง gallery ขยายออก นั่นคือ ระยะห่างระหว่างชั้นดินเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ดินเกิดการบวมตัว เรียกออร์แกโนเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่า intercalated clay ดังแสดงในรูปที่ 2.10

แต่ถ้าชั้นของดินเกิดการบวมตัวมากจนทำให้ชั้นดินแยกจากกัน จะเรียกว่า exfoliated clay ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำให้อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร สามารถนำ

ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยก่อให้เกิดการเสริมแรงในระดับ โมเลกุล ดังนั้น จึงเรียกวัดเชิงประกอบประเภทนี้ว่า นาโนคอมพอสิต (nanocomposites)



Intercalated clay



Exfoliated clay

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของออร์แกนไคลย์

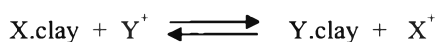
(ที่มา: จูริพร นันทรักษ์, 2548)

2.9 กระบวนการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange process หรือ Cation exchange capacity, CEC)

ดินเหนียวเมื่ออยู่ในดินตามธรรมชาติจะดูดซับไอออนที่มีประจุบวกไว้เต็มไปหมด ส่วนชนิดของแคตไอออนที่ดูดซับอยู่นั้นสำหรับดินในแถบร้อนและชุ่มชื้นจะมีมากน้อยลดหลั่นกัน ดังนี้ คือ $H^+ (Al^{3+}) > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ แคตไอออนต่างๆ เหล่านี้จะไม่ดูดซับติดแน่นอยู่กับพื้นผิวของดินเหนียวแต่จะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับผิวภายใต้อำนาจการดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้น การชะล้างด้วยน้ำจึงไม่อาจที่จะชะเอาแคตไอออนพวกนี้ออกไปได้ เราเรียกแคตไอออนพวกนี้ว่าเป็นแคตไอออนดูดซับ (adsorbed cations) อย่างไรก็ตาม แคตไอออนพวกนี้สามารถถูกไล่ออกไปโดยแคตไอออนอื่นๆ ได้โดยง่าย

การที่แคตไอออนดูดซับสามารถถูกไล่ที่หรือแทนที่โดยแคตไอออนอื่นด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนแคตไอออน บางครั้งเราสามารถเรียกแคตไอออนดูดซับนี้ว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยน (exchangeable cations)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแลกเปลี่ยนประจุ คือ

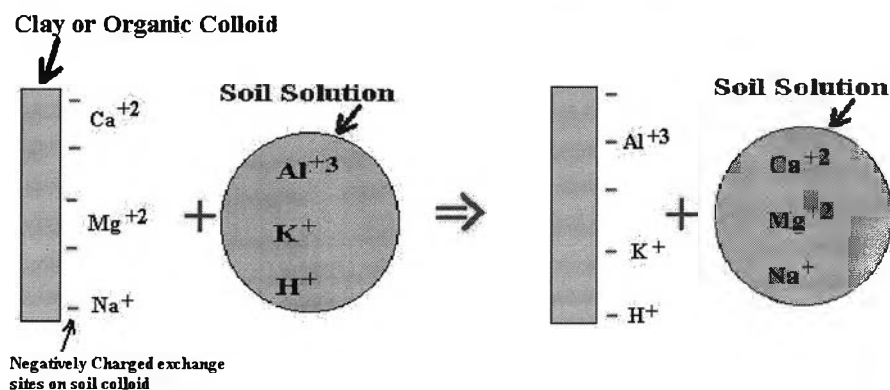


X^+ : ประจุของดิน

Y^+ : ประจุที่ทำการเติมลงในสารละลาย

ปฏิกิริยาจะเกิดจากซ้ายไปขวา ซึ่งขึ้นกับธรรมชาติของประจุ X^+ และ Y^+ ปฏิกิริยาจะเคลื่อนที่ไปด้านขวาโดยการเติมประจุ Y^+ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

Cation Exchange Illustrated



รูปที่ 2.11 การแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออนที่อยู่ในดินกับแคตไอออนอื่นๆ
(ที่มา: จูริพร นันทรักษ์, 2548)

กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุนี้ถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ของประจุเข้าไปแทนที่ใน ส่วนของประจุที่มีอยู่เดิม สามารถพิจารณากระบวนการได้ใน 2 ขั้นตอน

1. การแพร่ของสารละลายเข้าไปในแต่ละบริเวณช่องว่างระหว่างชั้นของดิน
2. การแพร่เข้าไปภายในตัวอนุภาค

2.9.1 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน

การแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่ยึดอยู่ที่ผิวอนุภาคของดิน และแคตไอออนอื่นๆ นั้น เกิดได้ยาก และง่ายแตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ชนิดของแคตไอออนดูดซับและแคตไอออนแทนที่ (adsorbed cation และ replacing cation) : แคตไอออนต่างชนิดกันจะดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและถูกไล่ที่ออกจากดินเหนียวโดยแคตไอออนอื่นๆ ได้ยากและง่ายแตกต่างกันออกไป บางชนิดดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้เพียงหลวมๆ และถูกแทนที่ได้ง่าย บางชนิดดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวค่อนข้างเหนียวแน่นและถูกแทนที่ได้ยาก ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอำนาจในการไล่ที่และความเหนียวแน่นในการดูดซับของแคตไอออนที่ผิวดินเหนียวนั้น ปรากฏว่าแคตไอออนต่างๆ มีอำนาจการเข้าแทนที่ (replacing power) แตกต่างลดหลั่นกันไปดังนี้ $Li^+ < Na^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < NH_4^+ < Al^{3+}(H^+)$ นั่นคือ Na^+

สามารถไล่ที่ Li^+ ได้ง่ายกว่าที่ Li^+ ไล่ที่ Na^+ หรืออาจกล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ Na^+ จะดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้แน่นกว่า Li^+ แต่จะเหนียวแน่นน้อยกว่า K^+ และ Ca^{2+} ฯลฯ ตามลำดับ [11]

2. ความเข้มข้นของแคตไอออนแทนที่: โดยปกติถ้าปริมาณแคตไอออนแทนที่มีมากจะทำให้การไล่ที่แคตไอออนที่อยู่ที่ผิวดินเหนียวง่ายขึ้น ซึ่งเป็นหลักของ mass action ถึงแม้ว่า Na^+ มีอำนาจไล่ที่ Ca^{2+} น้อยกว่าที่ Ca^{2+} ไล่ที่ Na^+ แต่ถ้ามี Na^+ เป็นจำนวนมากจะสามารถไล่ที่ Ca^{2+} ออกไปให้หมดจากผิวของดินได้

3. ปริมาณการอิ่มตัว (degree of saturation) : ปริมาณการอิ่มตัวของแคตไอออนบางชนิดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวจะมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่แคตไอออนนั้นจะถูกไล่ที่ออกมาเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น แคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable calcium) ที่ผิวของดินเหนียวยิ่งเหลือน้อยเท่าใดความยากที่จะไล่ที่ Ca^{2+} ออกไปจากผิวดินเหนียวให้หมดจะยิ่งยากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม โซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium) ยิ่งเหลือน้อยอยู่บนผิวดินเหนียวเท่าใดจะยิ่งง่ายต่อการถูกไล่ที่ออกไป ส่วนแคตไอออนบางชนิด เช่น K^+ และ Mg^{2+} จะไม่ขึ้นกับ degree of saturation เป็นต้น

4. แคตไอออนที่อยู่ร่วมด้วยบนผิวของดินเหนียว (complementary exchangeable cations): บางครั้งแคตไอออนอื่นๆ ที่ดูดซับอยู่บนผิวดินเหนียวร่วมกับแคตไอออนที่ต้องการจะไล่ที่นั้นจะมีบทบาทสำคัญเช่นกัน เช่น โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K^+) จะถูกไล่ที่ออกมาได้ง่ายขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับอะลูมิเนียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Al^{3+}) หรือ H^+ แต่จะถูกไล่ที่ได้ยากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับแคลเซียมแลกเปลี่ยนได้

2.9.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange capacity, CEC)

CEC คือ ปริมาณมากที่สุดของประจุที่สามารถเข้าไปแทนที่ได้ มีหน่วยเป็น milliequivalent per gram หรือ 100 gram (meq/g หรือ mq/100 g) CEC ของดินขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ชนิดของคอลลอยด์ดิน (soil colloid): ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของคอลลอยด์ดินต่างชนิดกันจะแตกต่างกันมาก ตัวอย่างเช่น ฮิวมัส มอนต์มอริลโลไนต์ อิลไลต์ เคโอลิไนต์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม โดยเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันตามลำดับ ดังนี้ 200, 100, 30, 8 และ 4 meq/100 g ดังนั้น ดินที่มีฮิวมัสมากหรือมีมอนต์มอริลโลไนต์มากจะทำให้มี CEC ของดินสูงขึ้นกว่าดินอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณดินเหนียวทั้งหมดเท่ากัน แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเคโอลิไนต์ และไฮดรอกไซด์ของ Fe และ Al

2. ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน : ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงย่อมมี CEC สูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวน้อยกว่า ดังนั้น จึงสามารถใช้ความสังเกตจากเนื้อดิน เป็นหลัก

เกณฑ์บอกได้อย่างคร่าวๆ ว่าดินไหนมี CEC มากน้อยกว่ากัน ถ้าดินเนื้อละเอียดโอกาสมีค่า CEC สูงกว่าดินเนื้อหยาบจะมีมาก ดังนั้น จึงสามารถประเมินค่า CEC ของดินโดยคร่าวๆ ได้จากปริมาณดินเหนียว นั่นคือ ทุกๆ หนึ่งเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวจะให้ CEC แก่ดินประมาณ 0.5 meq/100 g [12] เช่น ถ้าดินมีดินเหนียว 40% CEC ของดินนั้นจะประมาณเท่ากับ 20 meq/100 g [12]

3. ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน: เนื่องจากฮิวมัสมีค่า CEC สูงมาก ดังนั้น ดินที่มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงจะมี CEC สูงด้วย

2.10 เอทิลีนบิสสเตียราไมด์ (Ethylene-bis-stearamide)

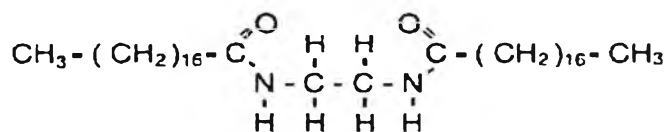
เอทิลีนบิสสเตียราไมด์ หรือที่เรียก “อีบีเอสแว็กซ์” (EBS wax) เป็นสารที่สังเคราะห์จากกรดสเตียริกทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไดเอมีนด้วยปฏิกิริยา dehydration condensation โดยใช้วัตถุคิบบส่วนหนึ่งจากธรรมชาติ เนื่องจากกรดสเตียริกได้จากน้ำมันปาล์ม โดยสูตรโมเลกุลของเอทิลีนบิสสเตียราไมด์แสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สูตร โมเลกุลของอีบีเอสแว็กซ์

(ที่มา: ธนพัต ชัยปลาทอง, 2548)

โดยมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 600 มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สูตร โครงสร้างของอีบีเอสแว็กซ์

(ที่มา: ธนพัต ชัยปลาทอง, 2548)

ลักษณะทางกายภาพของอีบีเอสแว็กซ์ จะมีทั้งที่เป็นเม็ดและเป็นผงสีขาว มีขนาดตั้งแต่ 45-1350 ไมโครเมตร [13] มีกลิ่นน้อยมากหรือแทบไม่มีกลิ่นเลย

เนื่องจากอีบีเอสแว็กซ์เป็นสาร โมเลกุลต่ำที่มีขั้ว จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมากมาย เช่น เป็นสารหล่อลื่นทั้งภายในและภายนอก สารป้องกันการติดกันของฟิล์ม สารเพิ่มความเงา และสารช่วยการพิมพ์ติดของสี เป็นต้น

เนื่องจากในสูตรโครงสร้างของอีบีเอสเร็กซ์มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วเป็นสายยาว ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงใช้อีบีเอสเร็กซ์เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/มอนอเมอร์โกลีนต์ดัดแปรนาโนคอมพอสิตให้สามารถเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยหมู่เอไมด์ของอีบีเอสเร็กซ์จะเข้ากันได้ดีกับหมู่ไฮดรอกซิลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และส่วนที่ไม่มีขั้วจะเข้ากันได้ดีกับพอลิโพรพิลีน และจากสมบัติที่สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นได้ของอีบีเอสเร็กซ์ จะช่วยในกระบวนการผลิตเนื่องมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแป้งอีกด้วย

2.11 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มีการพัฒนาเป็นเวลานานแล้ว เริ่มตั้งแต่ G. J. L Griffin (U.S. Patent 4,016,177) [9] ที่เริ่มใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติราคาถูก คือ แป้งผสมในการฉีดพลาสติก และได้พัฒนาระบบจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วไป ขณะนี้สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

2.11.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90% ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่ในรูปที่เรียกว่า gelatinized starch puff หรือ plate expanded by extrusion หรือ baking with water หมายถึง การทำให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้น เนื่องจากแรงดันของน้ำในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดแทนโฟมที่ทำจาก polystyrene เรียกกันว่า โฟมแป้ง ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง ฯลฯ

โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (extruder) แป้งจะพองออกจากหัวฉีด เนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟมสำหรับอุ้มอากาศ สมบัติของโฟมแป้งนี้ (ความหนาแน่น ความเหนียว) เกิดจากสมบัติของแป้งเอง ปริมาณน้ำและชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง (additive) เงื่อนไขของการผลิต ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้รู้จักกันในชื่อของ direct expanded starch foam, peanut, loose fill

โฟมจากแป้ง

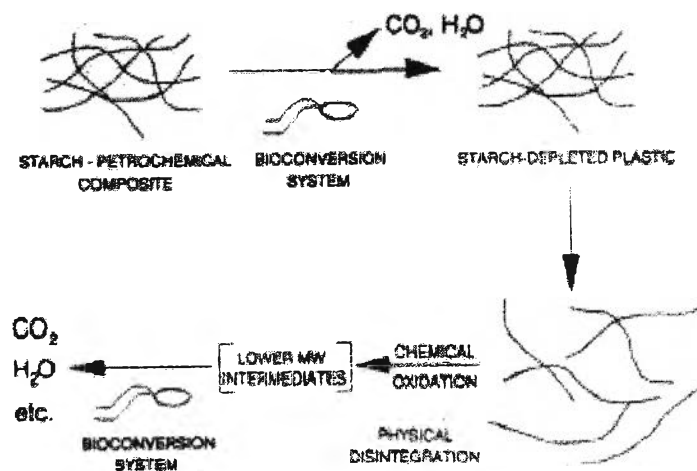
เป็นการใช้ลักษณะการขยายตัวของส่วนผสมจากแป้งและเส้นใย เช่น pulp เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

2.11.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

พลาสติกที่ผลิตได้ประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ แป้งที่สามารถย่อยสลายได้ และพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูปแบบ คือ เม็ดแป้งหรือแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติกเกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์จากอนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือแรงปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ในรูปเม็ดแป้ง

แป้งจะผสมพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี นำไปขึ้นรูปเลยโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตกออก แผนภาพการผลิตแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิน 10% และต้องมีความชื้นไม่เกิน 1% เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างการอัดรีดด้วยความดันสูง อาจมีการใส่สารเติมแต่ง เช่น น้ำมันข้าวโพดซึ่งเป็น anti-oxidant เข้าไปในกระบวนการผลิตเพื่อทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อม เกิด peroxide radical ซึ่งจะย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีให้ได้โพลิโเมอร์ที่เล็กลง และง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป

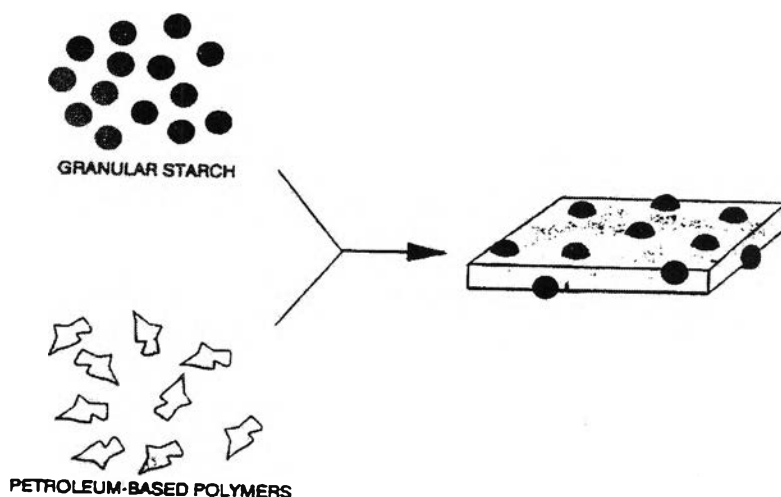


รูปที่ 2.14 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง

(ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

ในรูปแป้งเจลาติไนซ์

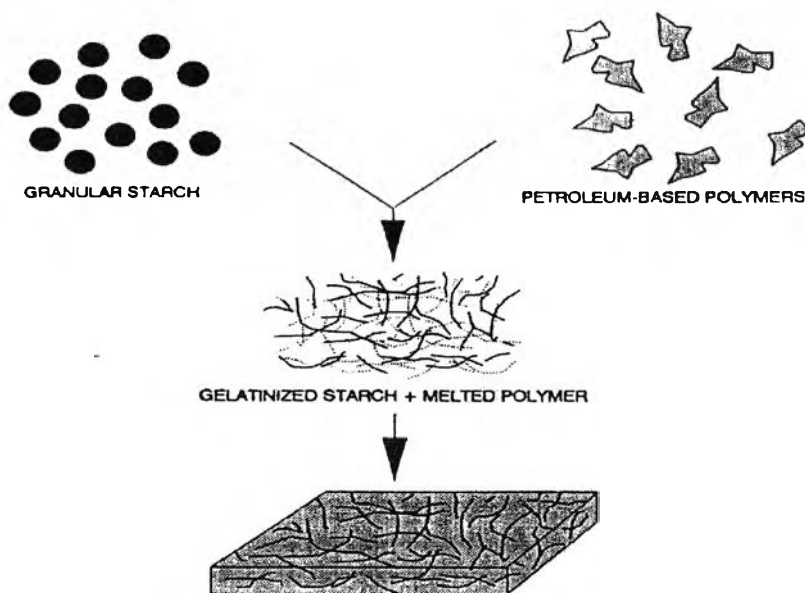
วิธีนี้เม็ดแป้งจะแตกตัวทั้งหมดผสมรวมกับอนุพันธ์ปิโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบแป้งเจลาตินไนซ์
(ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

2.11.3 Starch graft copolymer

โครงสร้าง starch graft copolymer แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคส และ M เป็นมอนอเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับแป้ง โดยแป้งที่ใช้อาจอยู่ในรูปเม็ดแป้งหรือแป้งเจลาตินไนซ์ การทำปฏิกิริยา graft copolymerization ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) บนสายโมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมี และวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีใดขึ้นกับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีที่นิยมมากที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีริก (ceric salts) เมื่อเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลแป้ง ไอออนของมอนอเมอร์ปีโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อๆ ไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้เรื่อยๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย ความถี่ในการเกิด graft จะเป็นจำนวนหน่วยกลูโคสต่อ 1 graft ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของ starch graft copolymer
(ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ, 2543)

2.12 การสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพของพลาสติก

นิยามของพลาสติกย่อยสลายได้ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Material) หมายถึง พลาสติกที่มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เนื่องจากการสูญเสียสมบัติ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท [14] คือ

1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)
2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic)
3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolytically degradable plastic)
4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

สำหรับพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพมีความหมายและคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่า การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย โดยการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ดังกล่าวเกิดจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์แบบใช้

ออกซิเจน(aerobic respiration) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) โดยสามารถแบ่งกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาเพื่อตัดโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ตัดอย่างสุ่ม(random) ที่ภายในสายโซ่โมเลกุล (endo) และตัดจากปลายสุดของสายโซ่โมเลกุล (exo) อย่างมีลำดับเพื่อให้ได้สารประกอบที่เล็กลง ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่ากระบวนการแยกพอลิเมอร์ (depolymerization) ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์นำสารประกอบที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเข้าสู่เซลล์และเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP (adenosine triphosphate) ชีวมวล(biomass) ก๊าซเรือนกระจกต่างๆ และแก๊สต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (สำหรับกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน) สารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่นๆ (สำหรับกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน) เช่น มีเทน และ ไนโตรเจน ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีขั้นแรกสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ จะได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ (ตัวอย่างเช่น ปุ๋ย) อย่างไรก็ตาม สารเหล่านี้สามารถที่จะย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นการรักษาสมดุล CO₂ ในธรรมชาติอีกด้วย ประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์ และสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง ฯลฯ

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ จะเป็นพอลิเมอร์ที่เป็น โมเลกุลมีขั้ว [14] เนื่องจากสามารถเกิดการสลายตัวได้ด้วยน้ำ (Hydrolysis) เช่น พอลิเมอร์พวกพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และไคติน/ไคโตซาน เป็นต้น พอลิเมอร์พวกโปรตีน (protein) ได้แก่ คอลลาเจน (collagen) เจลาติน (gelatin) และเคซีน (casein) เป็นต้น พอลิเอไมด์ (polyamide), พอลิเอสเทอร์ (polyester) และพอลิยูรีเทน (polyurethane) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายความว่า พอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ด้วยน้ำจะสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต้องอาศัยการทำงานของเอนไซม์เป็นสำคัญ ดังนั้น พอลิเมอร์ที่เหมาะสมจึงต้องมีสมบัติที่เอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์ด้วย เช่น ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสม และมีการจัดตัวของโครงสร้างที่ง่ายต่อการแทรกซึมของเอนไซม์ และ โมเลกุลมีความอ่อนตัว (flexibility) มากพอจะเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์จากจุลินทรีย์ได้ เป็นต้น ในบรรดาพลาสติกที่โฆษณาว่าย่อยสลายได้นั้น ส่วนใหญ่ยังสลายไปได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการผลิตพลาสติกแบบนี้ยังใช้พอลิเมอร์ที่ไม่ย่อยสลายเป็นองค์ประกอบหลัก โดยพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์โดยสมบูรณ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. พลาสติกจากธรรมชาติ : เป็นกลุ่มพลาสติกที่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ ในระยะเวลาอันสั้น โดยพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ทางการค้าส่วนใหญ่ ได้แก่

แป้ง เซลลูโลส และเจลาติน เป็นต้น โดยเฉพาะแป้งเป็นวัตถุดิบที่นิยมในการผลิตพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ เนื่องจากย่อยสลายได้ง่าย มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพองตัวเป็นฟิล์มได้ สามารถขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก มีความปลอดภัย และความบริสุทธิ์สูง อย่างไรก็ตาม การนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรงทำได้ยาก เนื่องจากต้องมีวิธีเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การผลิตแผ่นฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) จากเซลลูโลส เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สก๊อตเทปใส, กระดาษแก้ว, กระดาษห่อเครื่องสำอางค์ กระดาษห่อขนมและลูกกวาด เป็นต้น

2. พลาสติกสังเคราะห์ : พลาสติกสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่ได้รับความสนใจ ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรง ซึ่งผลิตจากกระบวนการเลี้ยงแบคทีเรีย *Alcaligenes eutrophus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีน้ำตาลกลูโคสมากเกินไป ส่วนใหญ่อาหารเลี้ยงเชื้อผลิตจากน้ำตาลที่ได้จากข้าวสาลี ข้าวโพดและหัวผักกาดหวาน (sugar beet) ซึ่งเป็นภาวะที่แบคทีเรียพวกนี้จะผลิตสารพอลิเมอร์พวก พอลิเบต้าไฮดรอกซีอัลคาน (poly-beta-hydroxyalkane;PHA) ซึ่งเป็นอาหารสะสมที่แบคทีเรียผลิตไว้เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานยามขาดสารอาหารจากภายนอก การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อต่างๆ กัน จะทำให้แบคทีเรียผลิตพอลิเมอร์ของสารดังกล่าวที่มีลักษณะแตกต่างกันตามความเหมาะสม ตัวอย่างของพอลิเมอร์พวกนี้ได้แก่ พอลิไกลโกลิกแอซิด [poly(glycolic acid), PGA], พอลิแลคติกแอซิด [poly(L-lactic acids), PLLA] ซึ่งนำไปใช้ในการผลิตแผ่นรองผ้าอ้อม และกระป๋องโยเกิร์ต, พอลิ-แอปซิลอนคาโพรแลกโตน[poly(ε-caprolactone), PLA], พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต [Poly(3-hydroxybutyrate), PHB] และโคพอลิเมอร์ poly(3-hydroxybutyrate)-co-poly(3-hydroxy-valerate) (PHBV) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พลาสติกเหล่านี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูง

2.13 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยตรวจสอบจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน

การหายใจของจุลินทรีย์ (การหายใจของดิน) อธิบายได้จากปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในระบบหรือปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น[15] อันเกิดจากการกระทำของแบคทีเรีย, เชื้อรา, สาหร่าย และ โปรโตซัวในกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ [16] โดยการหายใจของดินนั้นเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์

การตั้งการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้น จะใช้ดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเตรียมได้จากการร่อนดินผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร โดยมีวิธีการวัดปริมาณของแก๊สหลายแบบ ดังนี้

- ทำการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบปิด โดยการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยการใช้สารละลายเบสเป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลาเริ่มต้นและสุดท้ายด้วยเทคนิค gas chromatography
- การวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการอัดอากาศซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์อิสระเข้าไปในระบบอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตามระยะเวลาที่กำหนด แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น
- ทำการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการ DIC (dissolved inorganic carbon) ด้วยเครื่อง DOC analyzer โดยปราศจากการเผา
- ทำการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการไทเทรตกับสารละลายเบส เช่น แบริยมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนพัทธ์ และคณะ [13] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้อีบีเอสแว็กซ์ (EBS wax) เป็นสารช่วยผสม ผสมด้วยเครื่องผสมอครีคแบบเกลียวคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบจากการศึกษาพบว่า การใส่ EBS wax สามารถช่วยให้แป้งกระจายตัวใน LDPE ได้ดีขึ้น การรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของแป้งน้อยลง เนื่องจากโมเลกุลของ EBS wax ส่วนที่มีขั้วยึดจับกับแป้ง และส่วนที่ไม่มีขั้วรวมตัวกับ LDPE และการเติมแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้การดูดซึมน้ำ และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง แต่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นทดสอบลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของแป้งมันสำปะหลัง

Huang และคณะ [17] ได้เตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวโพดที่ถูกพลาสติกไฮดรอกซีด้วยกลีเซอรอล และ MMT ด้วยเทคนิคสอดแทรกแบบหลอมเหลว (melt intercalation) ด้วยเครื่องอครีคแบบเกลียวเดี่ยว (single screw extruder) จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่า MMT กระจายตัวสม่ำเสมอในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และจากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อปริมาณ MMT อยู่ในช่วง 0-30% ชิ้นงานมีความต้านแรงดึงได้ถึง 27 MPa ขณะที่ความเครียดลดลงจาก 85 เหลือ 18% ส่วนยังสัมพันธ์ (Young's modulus) มีค่าถึง

207 MPa และการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อปริมาณ MMT เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่ใช้งานทั่วไป

Ma และคณะ [18] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและ MMT ด้วยกระบวนการอัดรีดแบบหลอมเหลว 2 ขั้นตอน (dual-melt extrusion) ขั้นตอนแรกเป็นการตัดแปร MMT ด้วยซอร์บิทอลโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งจัดเป็น green process เพราะไม่มีการใช้สารละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ ยังไม่มีน้ำเสียที่ได้จากการล้าง MMT ที่ถูกตัดแปรแล้วอีกด้วย ส่วนในขั้นที่ 2 ทั้งแป้งข้าวโพด ซอร์บิทอล มอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกตัดแปร และพอร์มาไมด์ได้ถูกนำไปผสมด้วยเครื่องปั่นแบบความเร็วสูง (high speed mixer) ก่อนนำไปผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวเพื่อผลิตเป็นวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ intercalate โดยซอร์บิทอลได้เข้าไปขยายช่องระหว่างชั้นผลึกของ MMT ซึ่งทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลสามารถสอดแทรกเข้าไปได้ ซึ่งมีผลทำให้ความต้านแรงดึง ยังสัมพันธ์ และเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MMT ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อย

Zuchowska และคณะ [19] ได้ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอฟีนส์และแป้งมันฝรั่ง โดยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ หรือพอลิโพรพิลีน (PP) กับแป้งมันฝรั่งที่พลาสติกไซซ์ด้วยกลีเซอรอลโดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) เป็นสารช่วยผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายทางชีวภาพของชิ้นงานขึ้นกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งการถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ (microorganism) เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น และพบว่าพอลิโอฟีนส์สามารถถูกย่อยสลายได้โดย LDPE สามารถย่อยสลายได้น้อยกว่า PP เพราะนอกจากสายโซ่จะขาดออก LDPE ยังสามารถเกิดการเชื่อมขวางและเกิดกิ่งได้อีกด้วย ในขณะที่ PP มีแค่การขาดของสายโซ่เท่านั้น

Zhang และคณะ [20] ได้ทดลองเตรียมเส้นใยนาโนคอมพอสิตของ PP และออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT) โดยใช้โพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MAH) เป็นสารช่วยผสม ด้วยกระบวนการแบบหลอมเหลวโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ตามด้วยกระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว (melt spinning) จากการศึกษพบว่า OMMT ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรสามารถกระจายตัวใน PP และช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสในกระบวนการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีผลทำให้อัตราการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ระดับผลึกของเส้นใยนาโนคอมพอสิตระหว่าง PP/OMMT สูงกว่าเส้นใย PP ที่ถูกดึงด้วยอัตราการดึง (draw ratio) เท่ากัน ซึ่งนอกจากทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นยังทำให้การดูดความชื้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใส่ OMMT และ PP-g-MAH ได้เพิ่มหมู่ที่ชอบน้ำในเส้นใยนาโนคอมพอสิต