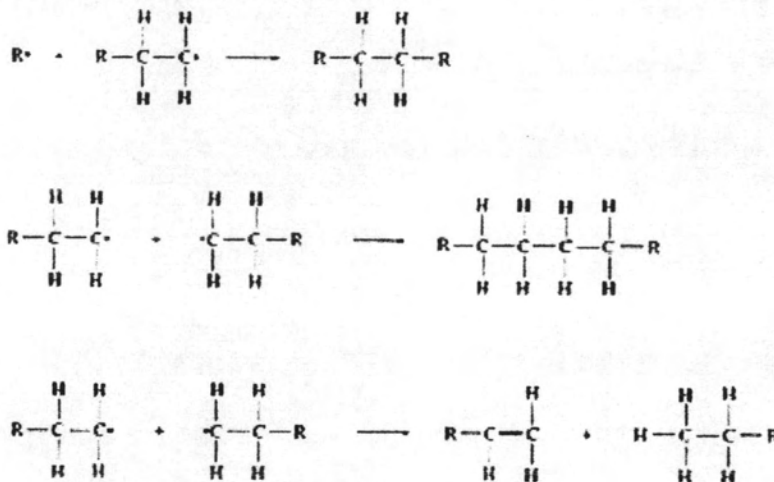


บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) [1-3]

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุด เพราะมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ ราคาถูก มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีเยี่ยม มีความทนทานต่อสารเคมีดีมาก ขึ้นรูปง่าย มีความเหนียว และยืดหยุ่น เป็นต้น ซึ่งพอลิเอทิลีนในทางการค้าส่วนใหญ่ ได้จากการพอลิเมอไรส์แก๊สเอทิลีนด้วยกระบวนการแบบรวมตัว (addition polymerization) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นไปได้ทั้งแบบเชิงเส้น (linear) และแบบกิ่งก้านสาขา (branched) ขึ้นกับกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวของแก๊สเอทิลีน

พอลิเอทิลีนมีความหนาแน่น $0.91-0.965 \text{ g/cm}^3$ สามารถยืดตัวได้สูงถึง 5 เท่า ฉีกขาดยาก มีลักษณะคล้ายซีเมนต์ ไม่เกาะติดน้ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก ทนความร้อนได้น้อย แต่ทนความเย็นได้ถึง -70°C โดยไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ทนกรดและด่างอ่อน แต่เกิดปฏิกิริยาช้าๆ กับ oxidizing acids ไม่ทนน้ำมันและไขมัน โดยเฉพาะน้ำมันก๊าด น้ำมันเบนซิน สามารถสกัดกันน้ำและไอน้ำได้ดี แต่สกัดกันแก๊สไม่ดี จึงเหมาะสำหรับบรรจุอาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ และเนื้อ เป็นต้น นิยมใช้ทำถุงบรรจุอาหารและเสื้อผ้า ตุ๊กตาเด็กเล่น ดอกไม้พลาสติก ภาชนะบรรจุเครื่องใช้ในครัว

ถาดน้ำแข็งในตู้เย็น ขวด ภาชนะบรรจุของเหลว พลาสติกคลุมโรงเพาะชำ และของใช้ราคาถูกอีกมากมาย

หากจะแบ่งประเภทของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่น อาจแบ่งได้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) มีความหนาแน่น 0.91-0.925 g/cm³ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (medium density polyethylene, MDPE) มีความหนาแน่น 0.925-0.926 g/cm³ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) มีความหนาแน่น 0.941-0.965 g/cm³

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ [2]

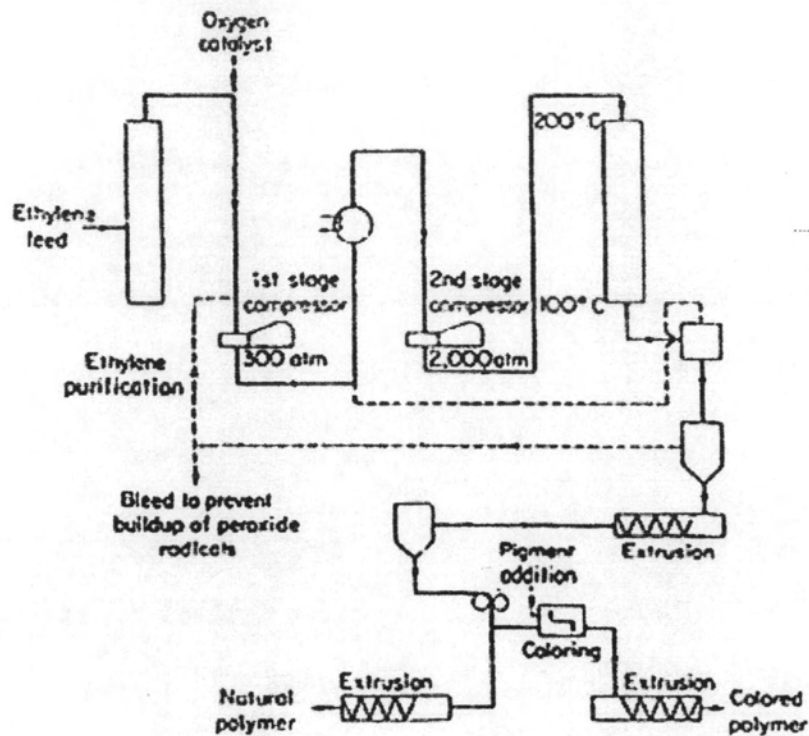
	LDPE	MDPE	HDPE
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.91-0.925	0.925-0.926	0.941-0.965
ปริมาตร (in ² /lb)	30.25	29.8	29.2
ความต้านแรงดึง (psi)	1,000-2,300	1,200-3,500	3,100-5,500
ความทนแรงกระแทก	ไม่ฉีกขาด	0.5-16.0	0.8-20
ทนความร้อน (°F)	180-220	220-250	250
ความสามารถดูดความชื้น 24 ชม.	0.015	0.01	0.01
ความง่ายต่อการตีไฟ (in/min)	1.04	1.02	1.02
ทนแสงแดด	พอใช้	พอใช้	พอใช้
ทนกรดอ่อน	ไม่ได้	ได้	ได้
ทนกรดแก่	ไม่ทน oxidizing acids	ถูกทำลายอย่างช้าๆ จาก oxidizing acids	ถูกทำลายอย่างช้าๆ จาก oxidizing acids
ทนด่างอ่อน-แก่	ได้	ได้	ได้
ทนสารละลายอินทรีย์	ได้ต่ำกว่า 140°C	ได้ต่ำกว่า 140°C	ได้ต่ำกว่า 170°C

2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า เมื่อปี ค.ศ. 1939 โดยบริษัทอิมพีเรียลเคมิคัลอินดัสตรี (ICI) ประเทศอังกฤษ ในการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในทางการค้าจะใช้กระบวนการความดันสูง (high pressure process) ปกติใช้ความดัน 1,000-3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิ 80-300 องศาเซลเซียส กระบวนการพอลิเมอไรเซชันเริ่มจากการใส่เอทิลีนมอนอเมอร์ และตัวเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งแตกตัวให้ฟรีเรดิคัล (free radical) ได้แก่ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) อะโซบิสไอโซบิวไทโรไนไตรล์ (azobisisobutyronitrile, AIBN) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก จึงต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพสูง เช่น ใช้น้ำหรือของเหลวเฉื่อย (inert liquid) เช่น เบนซีน ไหลผ่านท่อเพื่อช่วยระบายความร้อน มอนอเมอร์จะเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 แล้วแยกพอลิเอทิลีนออกมาจากเอทิลีนมอนอเมอร์ แล้วนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้มาอัดรีดออกมาเป็นแถบเล็กๆ และตัดเป็นเม็ดต่อไป

ลักษณะเฉพาะของการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำภายใต้ความดันสูงคือ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก ปฏิกิริยานี้จะขึ้นกับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ จึงกล่าวได้ว่าการใช้มอนอเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ทำปฏิกิริยาที่ความดันสูง ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกิ่งก้านสาขา ซึ่งกิ่งก้านสาขาที่เกิดขึ้นจะไม่ยาวนานก็มีคาร์บอนเพียง 2-4 อะตอม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวเริ่มปฏิกิริยา ตัวย้ายโซ่ (chain transfer agent) และการใส่ตัวเริ่มปฏิกิริยาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีลักษณะแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ทำให้เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ความหนาแน่นต่ำ รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดันสูง

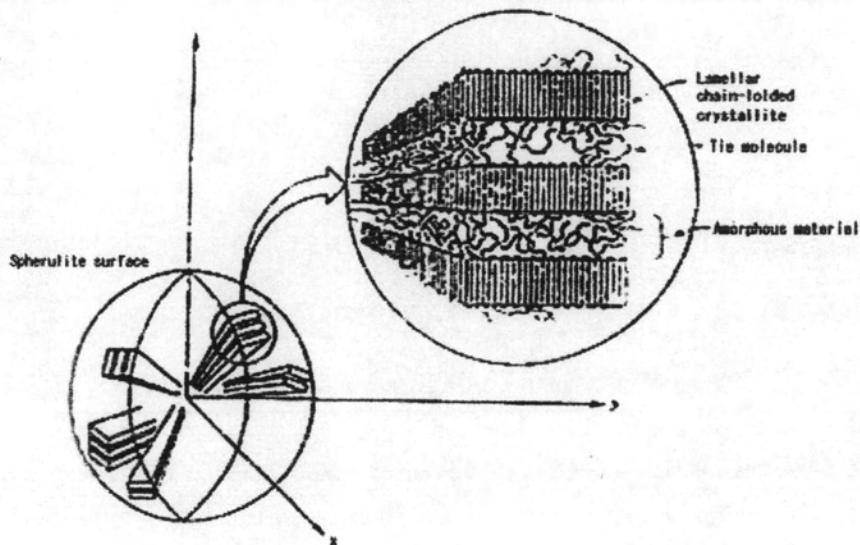


รูปที่ 2.2 แผนภาพการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดันสูง [3]

2.1.2 โครงสร้างและสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแยกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักมากมาย ซึ่งมีทั้งกิ่งสั้น (short chain branch, SCB) และกิ่งยาว (long chain branch, LCB) กระจายปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้มีความหนาแน่นต่ำโมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ และไม่สม่ำเสมอ พอลิเอทิลีนจะค่อนข้างใส และมีความเหนียวพอสมควร นอกจากนี้ สมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) ปริมาณการเกิดผลึก (crystallinity) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution) อีกด้วย

เมื่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอยู่ในสถานะของแข็ง จะมีโครงสร้างสเฟียรูไลต์ (spherulite) ดังแสดงในรูป 2.3 โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์จะพับไปพับมาในบริเวณที่เกิดผลึกและมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (platelet) ซ้อนเป็นชั้นๆ (lamellar) บริเวณอสัณฐานซึ่งเกิดจากกิ่งก้านสาขาสั้นๆ (SCB) ไปรบกวนการพับไปพับมาของโมเลกุล รายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของโครงสร้างสเฟียรูไลต์

ขนาดและการกระจายของสเฟียรูไลต์นั้น มีผลต่อสมบัติทางแสงของพอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีผลึกน้อยมากจะมีความใสมาก พวกที่มีผลึกปานกลาง เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีลักษณะขุ่นและเริ่มทึบแสง ส่วนพอลิเมอร์ที่มีผลึกมากๆ และมีการจัดเรียงตัวของผลึกดีจะทึบแสง เนื่องจากผลึกขัดขวางทางเดินของแสงและทำหน้าที่กระจายแสง นอกจากจะผลิตเป็นฟิล์มหรือแผ่นบางๆ จะทำให้แสงผ่านได้บ้าง

นอกจากนี้ ขนาดของผลึกและการกระจายขนาดของผลึก ยังมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อีกด้วย กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดเล็กจะมีความต้านแรงกระแทกสูงกว่า ขาดยากและเหนียวกว่าพอลิเมอร์ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่

กึ่งยาวๆ ของพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นต่ำมีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกและความหนาแน่นน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะกึ่งยาวๆ จะเพิ่มการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (entanglement) ซึ่งเมื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกึ่งยาวๆ จำนวนมากไปผ่านกระบวนการเป่าฟิล์มจะทำให้เสถียรภาพของลูกโป่ง (bubble stability) เพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกึ่งยาวๆ จำนวนน้อย กล่าวคือ ลูกโป่งไม่แตกง่ายขณะเป่าฟิล์ม

โดยสรุปสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คือ มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.91-0.925 g/cm³ มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีความใส ความอ่อนตัว สามารถต้านแรงดึงและแรงกระแทกพอสมควร มีการไหลตัวดี พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำไปทำฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ถุงพลาสติก ผ้าพลาสติก ทำของใช้ในบ้านในครัว ของเด็กเล่น ใช้หุ้มลวดไฟฟ้า และใช้ในงานก่อสร้าง เป็นต้น

2.2 แป้ง (starch) [4-7]

แป้งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งพืชสังเคราะห์และเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ที่บริเวณราก เมล็ด และผลในรูปของเม็ดแป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่เกิดจากกลูโคสแต่ละหน่วยมาต่อกันเป็นสายยาว เมื่อเติมกรด หรือเอนไซม์ที่สามารถย่อยแป้งได้ จะทำให้แป้งถูกย่อยสลายกลายเป็นน้ำตาลและกลูโคส

แป้งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 g/cm³ เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือเป็นแท่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-1,000 ไมโครเมตร

หน่วยย่อยที่สุดของแป้งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรโมเลกุลเป็น (C₆H₁₀O₅)_n ต่อกันด้วยพันธะของกลูโคส แป้งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักคือ อะไมโลส และอะไมโลเพกตินในอัตราส่วนที่ต่างกันขึ้นกับชนิดของแป้ง โดยส่วนมากเป็นอะไมโลเพกติน ปกติแป้งมีอะไมโลสประมาณร้อยละ 20-30 และมีอะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 70-80

แป้งจัดเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่นของกลูโคส หน่วยของกลูโคสที่อยู่ในแป้งจัดเป็นหน่วยของกลูโคสที่ปราศจากน้ำ (anhydroglucose unit) น้ำในโมเลกุลของกลูโคสจะหายไปในขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้น (step polymerization) พันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วยในโมเลกุลของแป้ง เรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งพันธะนี้สามารถถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ได้ด้วยกรด

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เกษตรกรไทยได้หันมาปลูกมันสำปะหลังแทนพืชไร่อื่นๆ โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือปรากฏว่ามันสำปะหลังได้ปลูกแทนปอเกือบทั้งหมด ที่เป็นเช่นนี้เพราะมันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกดูแลรักษาง่าย และทำรายได้ดีกว่าพืชไร่อื่นๆ นอกจากนี้ ตลาดมันสำปะหลังของโลกยังคงค่อนข้างดีอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจากประโยชน์ที่ได้รับจากมันสำปะหลังนั้นมากมาย คนส่วนใหญ่จึงทราบเพียงว่ามันสำปะหลังใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์ และทำแป้งเท่านั้น แต่แท้ที่จริงแล้วมันสำปะหลังให้ประโยชน์มากมายหลายด้าน ทุกส่วนของต้นมันสำปะหลังล้วนแต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น

แป้งมันสำปะหลังซึ่งผลิตโดยการนำหัวมันสดมาผ่านเครื่องร่อนให้ดินและทรายหลุด และผ่านเข้าเครื่องล้าง เครื่องสับ และขูดหัวมัน และบดหัวมัน โดยใช้น้ำผสมตามลำดับ ซึ่งจะได้น้ำแป้งแล้วผ่านเข้าเครื่องกรองแยกกากน้ำแป้ง กากมันที่ได้จะนำไปตากแห้งเพื่อจำหน่ายต่อไป ส่วนน้ำแป้งจะถูกนำผ่านเครื่องฟอก และขจัดยางโดยใช้ไโอกำมะถัน ทำให้น้ำแป้งขาวบริสุทธิ์ นำผ่านเครื่องสลัดให้ชื้นและสลัดให้แห้ง แล้วสุดท้ายผ่านเข้าเครื่องอบจะได้แป้งผงตามต้องการ ซึ่งแป้งมันสำปะหลังนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง โดยเฉพาะการผลิตน้ำเชื่อมและหัวเขื่อน้ำตาล ผลิตผงชูรส ผลิตแป้งแปรรูป และอย่างอื่นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ และทำขนม

แป้งมันสำปะหลังจะประกอบด้วยเม็ดแป้ง 2-8 เม็ดมารวมตัวกัน แต่ละเม็ดมีความยาวตั้งแต่ 5-35 ไมครอน เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านแบนไม่สม่ำเสมอ เม็ดแป้งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจน และในบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งด้วย โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลส ร้อยละ 18 และมีอะไมโลเพกตินร้อยละ 82 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีค่าประมาณ 2.10×10^5 และ 3.0×10^5 ตามลำดับ

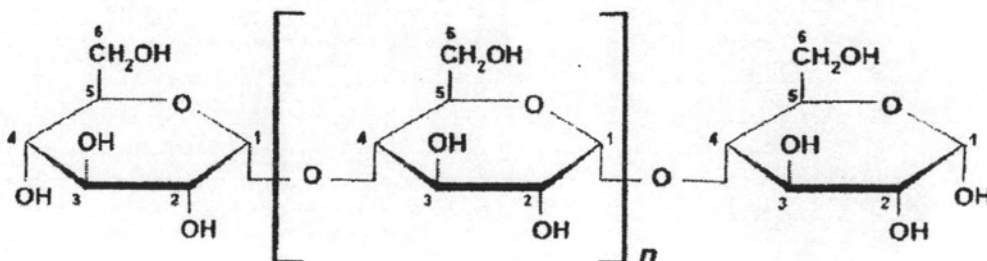
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งทุกชนิดสามารถทดแทนกันได้ ดังนั้น การผลิตและการค้าแป้งแต่ละชนิดที่มีอยู่ในโลก จึงมีอิทธิพลต่อการผลิตและการค้าแป้งชนิดอื่นด้วย เนื่องจากแป้งมีสมบัติคล้ายคลึงกัน ดังจะเห็นๆ ได้ว่าแป้งมีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยแป้งแต่ละชนิดมีขนาดของ n แตกต่างกันไป เป็น สารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรต ซึ่งหน่วยกลูโคสในสายโซ่สามารถแสดงได้เป็นหน่วย แอนไฮโดรกลูโคส (AGU) หรือหน่วยกลูโคไพราโนซิล (glucopyranosyl unit) ซึ่งมาเกิดจากพันธะ โควาเลนต์เชื่อมโยงระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วย และทำให้โมเลกุลของน้ำถูกกำจัดออกไปในระหว่าง การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น เนื่องจากแป้งที่พบอยู่ในต้นพืชได้จากกระบวนการ สังเคราะห์ทางชีวภาพ ดังนั้น ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลแป้งจึงเกี่ยวกับเอนไซม์ หน่วย กลูโคสต่อกันผ่านอะตอมของออกซิเจนที่ติดกับอะตอมของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคส กับอะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสถัดไป เกิดเป็นพอลิเมอร์สายยาวขึ้น พันธะเชื่อมโยง ระหว่างหน่วยกลูโคสนี้เรียกว่า "พันธะกลูโคไซด์" (glucoside bond)

2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง (structure of starch)

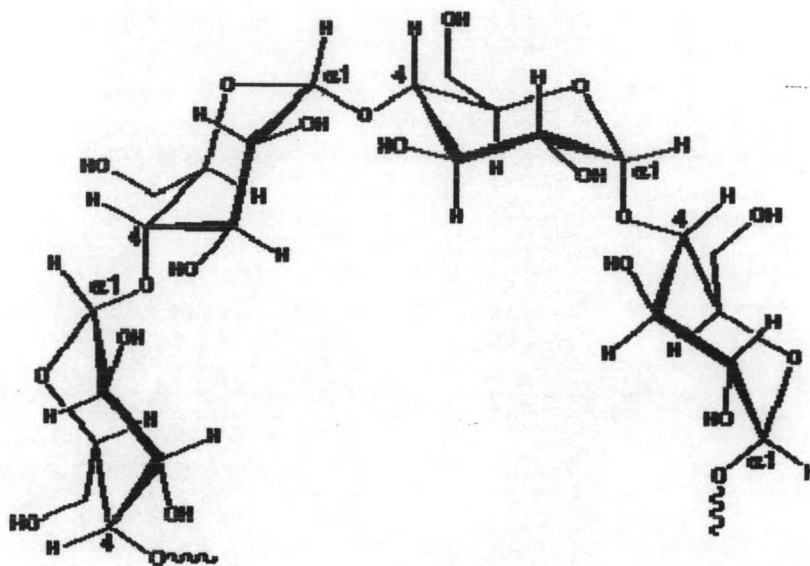
แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ

1. อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่ตรง (linear polymer) ประกอบด้วยหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก แบบ α -1,4 ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสจะขึ้นกับแหล่งที่ให้แป้งและภาวะของกระบวนการที่ใช้แยก แป้ง อะไมโลสประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย โดยแป้งส่วนใหญ่มี อะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 25 มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส [6]

นอกจากนี้ อะไมโลสอาจจัดตัวอยู่ในรูปโครงสร้างแบบเกลียว (helical structure) โดยประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส 6 หน่วยย่อยต่อ 1 เกลียว และแต่ละเกลียวจะเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.5

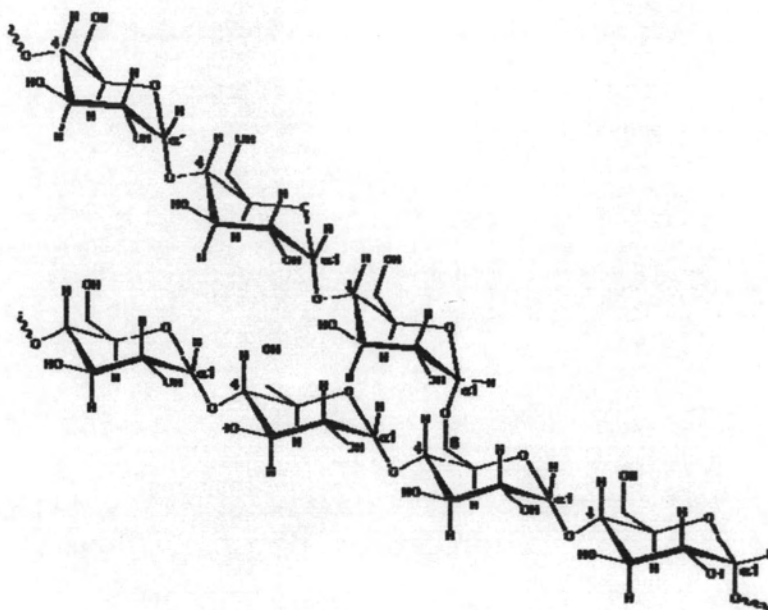


รูปที่ 2.5 การจัดตัวในรูปแบบโครงสร้างแบบเกลียวของอะไมโลส [6]

เนื่องจากอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงทำให้มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ อย่างไรก็ตาม โมเลกุลของอะไมโลสมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น และมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้อะไมโลสจัดเรียงตัวขนานกันและใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห และส่งผลให้สมบัติไฮโดรฟิลิกลดลง สารละลายที่ได้จะมีลักษณะขุ่น

ในสารละลายเจือจางจะเกิดการรวมตัวกันของอะไมโลสที่ติดกันเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ แต่สำหรับที่ความเข้มข้นสูงๆ ผลของความเกะกะ (steric hindrance) ขัดขวางการรวมตัว แต่มีการจัดตัวเพียงบางส่วนระหว่างช่องของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ได้เจลที่มีร่างแหสามมิติยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปมักทำให้เกิดฟิล์มที่มีความแข็งแรง ปรากฏการณ์ยึดติดระหว่างโมเลกุลอะไมโลสเรียกว่า "รีโทรเกรดชัน" (retrogradation)

2. อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นส่วนของกลูโคสที่ต่อกันเป็นสาย ซึ่งมีกิ่งก้านสาขาแตกแขนงออกไป โครงสร้างที่เป็นสาย ประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสที่มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,4 ส่วนรอยต่อระหว่างโซ่หลักกับกิ่งก้านต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,6 โดยโครงสร้างในส่วนที่เป็นอะไมโลเพกตินจะคิดเป็นร้อยละ 75 ของแป้ง และมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [6]

อะไมโลเพกตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลส และการที่มีโซ่สาขาของโมเลกุลอะไมโลเพกตินทำให้ลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และขัดขวางการเรียงตัวของสายโซ่ให้ใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้สารละลายของอะไมโลเพกตินจึงมีลักษณะใส ฟิล์มที่ได้จากอะไมโลเพกตินไม่มีความแข็งแรง และไม่สามารถโค้งงอได้เหมือนฟิล์มที่ได้จากอะไมโลส

สายโซ่หลักของอะไมโลเพกตินและอะไมโลสที่เรียงขนานติดกันจะมีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนที่ติดกันได้ ทำให้เกิดกลุ่มของโครงผลึก (micellar crystallites) ซึ่งเป็นตัวยึดให้แป้งอยู่เป็นเม็ด และมีสมบัติไบรฟริงเจนซ์ (birefringence) ซึ่งสามารถแสดงให้ทราบได้โดยการเกิดโพลาไรเซชันครอส (polarization cross)

ส่วนของแป้งที่เอื้อต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ คือ โครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรง โดยจุลินทรีย์ย่อยสลายด้วยเอนไซม์เบตาอะไมเลส (β -amylase) ทำลายเฉพาะพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,4 เท่านั้น ส่วนพันธะไกลโคซิดิกแบบ α -1,6 ไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้น การย่อยแป้งซึ่งส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะไมโลเพกติน จึงได้เป็นสายสั้นของแป้งที่เรียกว่า “เดกซ์ทริน” (dextrin) เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด [7]

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณอะไมโลเพกติน (เปอร์เซ็นต์)
ข้าวโพด	28	72
มันฝรั่ง	21	79
ข้าวสาลี	28	72
มันสำปะหลัง	17	83
ข้าวเหนียว	0	100
ข้าวฟ่าง	28	72
ข้าว	17	83
สา쿠	27	73
ท้าวยายม่อม	20	80
ข้าวโพด (amylase maize)	50-80	20-50

2.3 แร่ดินเหนียว (mineral clay) [8]

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ทุติยภูมิที่เกิดจากการผุพังของหิน โดยอนุภาคมีขนาดเล็กระดับไมครอน มีธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างของแร่ดินเหนียว หรือสารประกอบแอนไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกต (anhydrous aluminosilicates) ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมินา (alumina) และซิลิกา (silica) และระหว่างชั้นมีไอออนบวกของโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม หรือเหล็กแทรกอยู่ จากโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียวออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

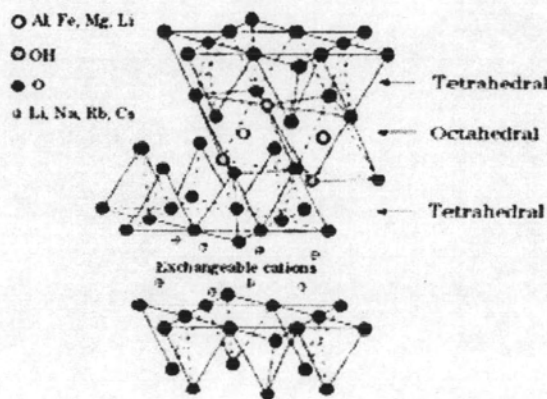
1. Kaolinite มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเรียงสลับกับชั้นของอะลูมินา
2. Illite เป็นแร่ดินชนิด 2:1 ในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอะลูมินาอยู่ และในแต่ละหน่วยมีไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้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

แร่ดินเหนียวที่นิยมนำมาใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม kaolinite และกลุ่ม smectite โดยกลุ่ม kaolinite นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น กระจก เบื้อง ถ้วยชาม และสุขภัณฑ์ เป็นต้น สำหรับกลุ่ม smectite ที่รู้จักกันดี ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระดาษ หรือใช้เป็นโคลนขุดเจาะ (drilling mud) และเป็นสารหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามพัฒนาสมบัติของแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้เพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวให้ได้ดินที่ชอบสารอินทรีย์ หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า ออร์แกโนฟิลิกลีคล์ (organophilic clay) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น ใช้เป็นสารปรับความหนืดในสี หมึกพิมพ์ และจาระบี

แร่ดินเหนียวมีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้ว ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางและนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ (nanoclays) และนาโนคอมพอสิต (nanocomposites)

2.3.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนต์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไป คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ จัดเป็นแร่ที่กำลังนิยมนำมาใช้เตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นหรือเป็นแผ่นซ้อนกันแบบ 2:1 กล่าวคือ ประกอบด้วยชั้นของซิลิกา 2 ชั้น ชั้นของอะลูมินา 1 ชั้น แทรกอยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยแต่ละชั้นมีความหนาเพียง 0.7-1.0 นาโนเมตร แต่มีความยาวประมาณ 1,000 เท่า ทำให้มีค่า aspect ratio สูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ ช่องว่างระหว่างชั้น เรียกว่า gallery หรือ interlayer พื้นผิวของชั้นอะลูมินอสิลิเกตมีประจุลบ จึงยึดเกาะกันด้วยประจุบวกของไอออนโลหะ เช่น โซเดียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น

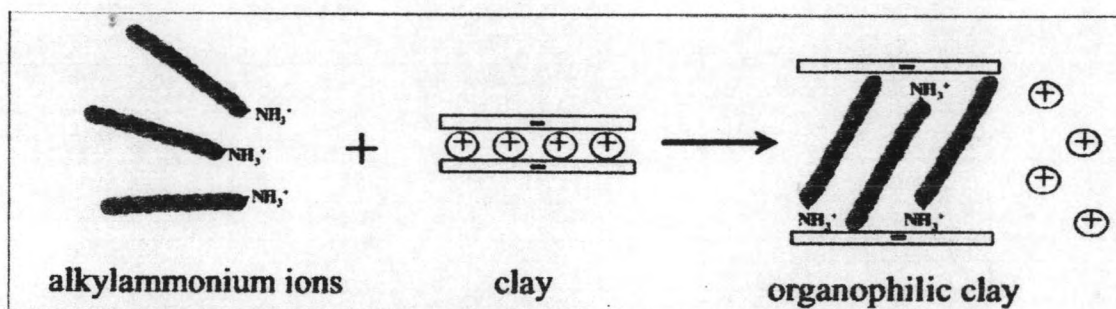


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [8]

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (โดยทั่วไปความหนาของชั้นผลึกขยายจนถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก จึงนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น (ในถาดปฏิภูลของสัตว์เลี้ยง เช่น แมว) รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.3.2 ออร์แกโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay)

การที่พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นไฮโดรฟิลิก จึงเป็นการยากที่จะเข้าร่วมตัวกับออร์แกนิกพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ให้มีสมบัติชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทนโดยการแทนที่ประจุต่างๆ (รูปที่ 2.8) ด้วยประจุของสารอินทรีย์ ได้แก่ดินเหนียวที่เรียกว่า ออร์แกโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) หรือออร์แกโนเคลย์ (organoclay) นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกจะขยายตัวตามขนาดและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ที่เข้าไปแทนที่ ทำให้ชั้นผลึกห่างกัน และเกาะกันอย่างหลวมๆ ซึ่งถ้าระยะห่างระหว่างชั้นมากขึ้น ยิ่งทำให้ง่ายต่อการแยกชั้นผลึกออกจากกันเป็นอนุภาคขนาดนาโนเมตร



รูปที่ 2.8 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของดินเหนียว [8]

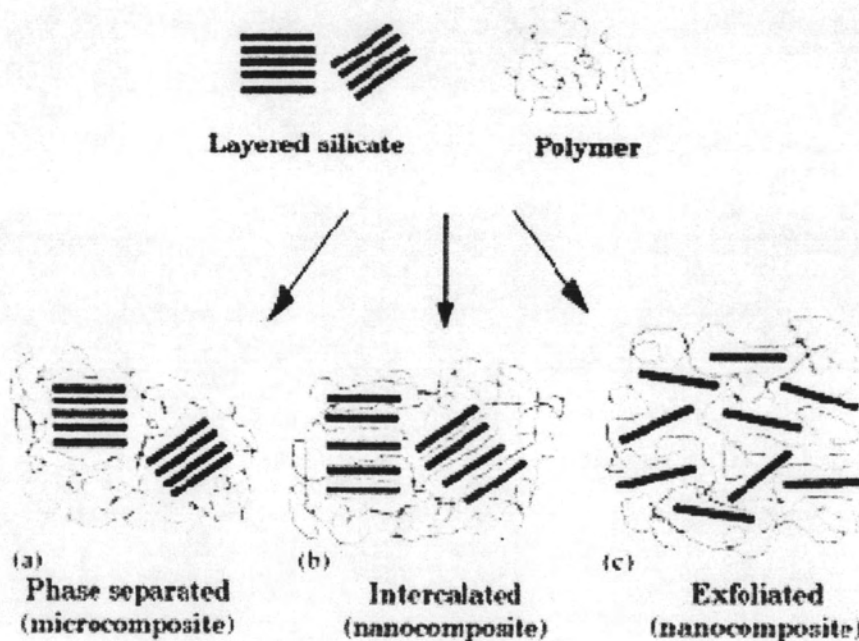
2.4 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites) [8]

นาโนคอมพอสิต เป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่จะช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตแบบทั่วไปทั้งในด้านความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานต่อสารเคมี และลดความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น นาโนคอมพอสิตที่ได้รับความสนใจและพัฒนากันอย่างหลากหลายในปัจจุบันคือ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต เป็นวัสดุที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยการเติมสารที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ เพราะจะเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงให้มากยิ่งขึ้น

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้พัฒนาสำเร็จสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D laboratory โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposites) เนื่องจากเมื่อได้ผสมพอลิเมอร์กับ ออร์แกนอเคลย์แล้ว ทำให้ชั้นซิลิเกตขยายห่างจากกัน จึงเรียกว่า พอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต (polymer-clay nanocomposites) ซึ่งการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูป 2.9

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

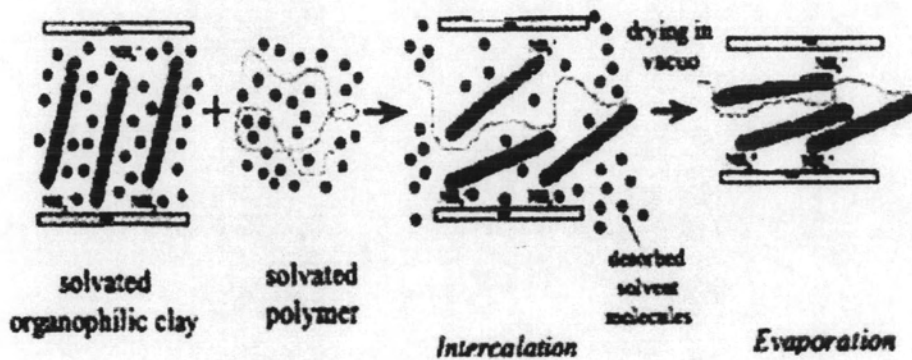


รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิดคอมพอสิต [8]

2.4.1 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

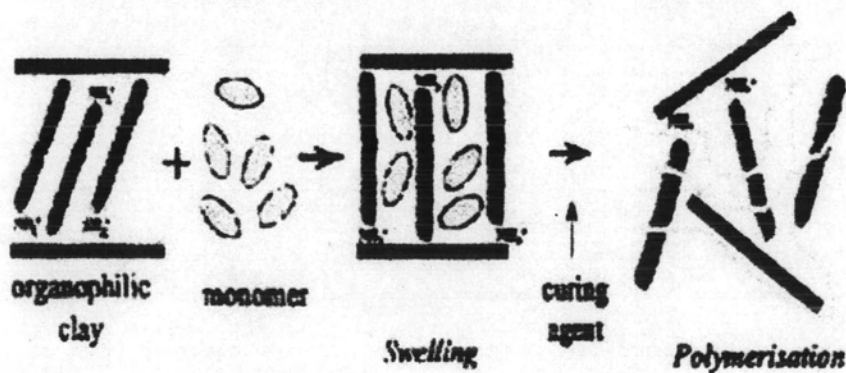
การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิตในปัจจุบันมี 3 วิธี คือ

1. Solution intercalation โดยสารละลายพอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



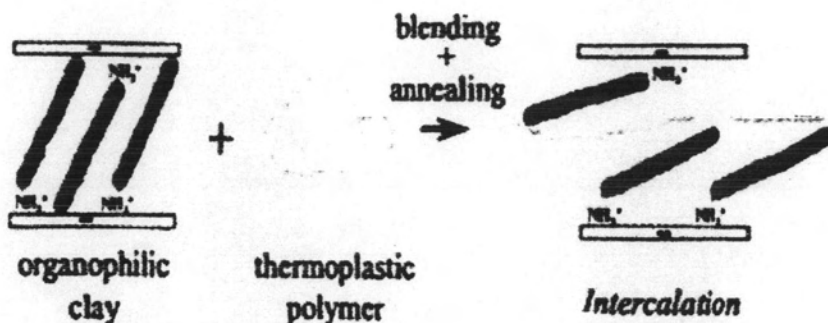
รูปที่ 2.10 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตด้วยวิธี Solution intercalation [8]

2. *In situ* polymerization โดยการแทรกมอนอเมอร์เข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ แล้วจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตด้วยวิธี *In situ* polymerization [8]

3. Melt intercalation โดยการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแทรกเข้าไประหว่างชั้นในโครงสร้างของเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตด้วยวิธี Melt intercalation [8]

2.4.2 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต

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

2.4.3 ผลึกภัณฑ์สำคัญของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น timing-belt cover โครงบุใต้หลังคา คอนโซล ตัวถัง ล้อรถยนต์ และถังน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ

2. สีพ่นรถยนต์ ให้ความคงทนมากขึ้น
3. แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยา/อาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหารเสียสภาพยืดอายุสินค้าให้ยาวนานขึ้น
4. ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
5. ลูกเทนนิส ลูกบอลล ป้องกันการสูญเสียแก๊สภายในลูกบอลล ลูกเทนนิส
6. แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ช่วยให้ทนความร้อนได้มากขึ้น การหดตัวลดลง ...

2.4.4 แนวโน้มการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

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

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

ประเทศไทย : มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

1. อุตสาหกรรมยานยนต์ : ชิ้นส่วนรถยนต์ (สนับสนุน Detroit Thailand)
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ : สารคอมพอสิตอุดฟัน สายยางหรือท่อต่างๆ
3. ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต : ประกันล้อรถ ให้ความทนทาน แก้ปัญหายางเสื่อมสภาพเร็ว
4. ผลิตภัณฑ์กีฬา : ลูกบอลล ลูกเทนนิส
5. อุตสาหกรรมเกษตร : ฟิล์มการเกษตร ฟิล์มห่อผัก ผลไม้ ฟิล์มเลี้ยงต้นอ่อน
6. อุตสาหกรรมเสื้อผ้า แฟชั่น : เส้นใยนาโนคอมพอสิต ทนไฟ ให้ความอบอุ่น ย้อมสีติดได้ดี

7. พลังงานและสิ่งแวดล้อม : ตัวตรวจวัดแก๊สอันตราย บำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ของแข็ง (solid battery) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน; lithium ion battery
8. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร : ฟิล์มด้านแก๊สออกซิเจนซึมผ่าน ลดโอกาสอาหารเสื่อมสภาพ เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งชนิดต่างๆ เพื่อให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ มีดังนี้

Arvanitoyannis และคณะ [9] ได้ทดลองผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้า โดยใช้แป้งในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 20 30 และ 40 ทำการผสม ด้วยเครื่องอัดรีด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด จากการศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกันแก๊ส พบว่าที่ปริมาณแป้งมากกว่าร้อยละ 30 จะมีสมบัติเชิงกลต่ำลง และมีสมบัติการสกัดกันแก๊สต่ำลงเมื่ออัตราส่วนของแป้งเพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมากกว่าร้อยละ 10 ขึ้นไป

Thakore และคณะ [10] ได้ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/แป้งมันฝรั่ง, LDPE/แป้งมันฝรั่งตัดแปรด้วยฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (STAc) และ LDPE/แป้งมันฝรั่ง/STAc โดยใช้ปริมาณแป้งมากถึง 30% ซึ่ง STAc มีความไม่ชอบน้ำจึงเข้ารวมตัวกับ LDPE ได้ดี จากการผสม STAc 10% มีผลทำให้แป้งกระจายตัวใน LDPE ได้ดีขึ้น และเมื่อปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านแรงดึง การยืดตัว และความต้านแรงกระแทกลดลง ซึ่งการเติม STAc เข้าไปในแป้งทำให้สมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการยืดตัว และความเหนียว ซึ่งพบว่าการใช้ LDPE และ STAc ในอัตราส่วน 90/10 นั้นเหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตาม การเติม STAc เข้าไปในแป้งมีผลทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำกว่าการใช้แป้งมันฝรั่งอย่างเดียว

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตของแป้งกับแร่ดิน มีดังนี้

Wilhelm และคณะ [11] ได้ทดลองนำแร่ดิน (mineral clay) มาเป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้ง Cara ที่พลาสติไซเซอร์ด้วยกลีเซอรอล ซึ่งเตรียมด้วยวิธี solution intercalation ในตัวกลางที่เป็นน้ำ แล้วจึงหล่อเป็นฟิล์มในแม่แบบ อัตราส่วนของแป้งและแร่ดินเท่ากับ 100/0, 95/5, 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพบว่าเมื่อเติมแร่ดินลงไป 30% ฟิล์มมีมอดุลัสเพิ่มขึ้นถึง 70% เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ใส่แร่ดิน และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR แสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลได้แทรกเข้าไประหว่างชั้นดิน ผลของ DMA แสดงว่าแป้งและกลีเซอรอลเข้ากันได้บางส่วน และกลีเซอรอลที่ไม่เข้าร่วมตัวกับแป้งยังอยู่ในของผสมและแทรกเข้าไประหว่างชั้นดินด้วย

Chen และคณะ [12] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (แป้งมันสำปะหลังที่ถูกพลาสติไซส์ด้วยกลีเซอรอล) กับเคลย์ 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) คาโอลิน (kaolin) เฮกโทไรท์ (hectorite) และเฮกโทไรท์ดัดแปร (modified hectorite) โดยใช้วิธี melt intercalation ด้วยเครื่องบดผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD แสดงว่า MMT และเฮกโทไรท์ที่ไม่ถูกดัดแปรสามารถเกิดนาโนคอมพอสิตกับแป้งได้ ส่วนคาโอลินและเฮกโทไรท์ที่ถูกดัดแปร เกิดเป็นคอมพอสิตแบบทั่วไป (conventional composites) ซึ่งเคลย์ทุกชนิดที่ใส่เข้าไปมีผลทำให้มอดุลัสของชิ้นงานสูงขึ้น แต่คอมพอสิตแบบทั่วไปจะมีมอดุลัสต่ำกว่า นาโนคอมพอสิตเมื่อใส่เคลย์ในระดับเดียวกัน นอกจากนี้ ยังพบว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก MMT มีมอดุลัสสูงกว่าที่เตรียมจากเฮกโทไรท์ที่ไม่ถูกดัดแปรเล็กน้อย

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแร่ดิน มีดังนี้

Morawiec และคณะ [13] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตจาก LDPE ผสมกับ organically-modified MMT (OMMT) ปริมาณร้อยละ 3 หรือ 6 โดยน้ำหนัก และใช้ maleic anhydride-g-LDPE เป็นสารช่วยผสม โดยวิธี การผสมแบบหลอมเหลวด้วย internal mixer และขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ ผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่า ชั้นของซิลิเกตเกิดการ

แยกออกจากกัน (exfoliation) และนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่าคอมพอสิตที่เตรียมจาก LDPE กับ OMMT ที่ไม่ได้ใส่สารช่วยผสม ซึ่งชั้นของซิลิเกตไม่แยกออกจากกัน (nonexfoliated OMMT) ดังนั้น maleic anhydride-g-LDPE นอกจากส่งเสริมให้เกิดการแยกออกของชั้นดิน และมีแรงยึดเกาะกับ LDPE ได้ดี ยังมีส่วนทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

Rahmad และคณะ [14] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตจาก LDPE และมอนต์มอริลโลไนต์ โดยวิธีผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ โดยผสมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณร้อยละ 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเป่าเป็นฟิล์มชั้นเดียว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่ MMT ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้การซึมผ่านของออกซิเจนผ่านฟิล์มลดลง 30% นอกจากนี้ ยังเพิ่มความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดโดยไม่ทำให้การยืดตัวของฟิล์มลดลงมากนัก อย่างไรก็ตาม การใส่ MMT ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติการสกัดกั้น (barrier property) เพิ่มขึ้น และผลจาก XRD แสดงว่าไม่มีโครงสร้างแบบ intercalate แต่เป็นแบบ exfoliate การเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์อาจทำได้โดยการให้แรงเฉือนและเวลาในการผสมที่เพียงพอ รวมทั้งการใส่สารช่วยผสม เช่น PE-g-MA