



การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพเพื่อรักษาคุณภาพ
ผลิตภัณฑ์จากข้าว

Improvement of Bioplastic Packaging Film for Preservation
of Rice Products

กัลทิมา เขาว์ชาญชัยกุล
ฉันททิพ สกุลเหมฤทัย
วรรณุช ดีละมัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ
นวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. ๒๕๖๔ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมนานาเคลย์ที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพื่อพัฒนาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศ ด้วยสารเพิ่มเนื้อซึ่งเป็นงานวิจัยในเฟสที่ 1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ถูกเตรียมสารคอมพาวด์และขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และเครื่องอัดด้วยความดัน ตามลำดับ นาโนเคลย์ถูกปรับเปลี่ยนปริมาณ 0 3 5 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก ผลของปริมาณนาโนเคลย์ถูกประเมินโดยการทดสอบแรงดึง การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน การวัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน จากผลการทดลองพบว่า ค่ามอดุลัสความต้านแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลงไม่มากนักและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าต่ำกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำที่สุด ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้น และเริ่มมีปริมาณผลึกคงที่เมื่อปริมาณนาโนเคลย์ 5 %โดยน้ำหนัก และปริมาณผลึกลดลงเมื่อปริมาณนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก นาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก การลดลงของปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเนื่องจากนาโนเคลย์เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีที่ปริมาณนาโนเคลย์ 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก สำหรับสมบัติป้องกันการซึมผ่าน พบว่า การเติมนานาเคลย์ช่วยปรับปรุงสมบัติการกั้นการซึมผ่านของไอน้ำแต่ไม่ผลต่อการกั้นก๊าซออกซิเจน

คำสำคัญ: บรรจุภัณฑ์/พลาสติกชีวภาพ/การซึมผ่านของแก๊ส/การซึมผ่านของน้ำ/สมบัติทางกล

Abstract

In this research work, the effect of adding nanoclay on improving the properties of polybutylene succinate (PBS) was investigated to develop a suitable formulation for bioplastic packaging for containing rice products under vacuum conditions. This work is phase 1 of the research work. PBS and nanoclay were mixed and processed as specimens using a twin screw extruder and a compression molding machine, respectively. The content of nanoclay was varied as 0, 3, 5, 10 and 15 wt%. The effect of nanoclay content was investigated by tensile test, morphological analysis, thermal analysis, and water vapor and oxygen permeability measurements. The result showed that the tensile modulus tended to increase with increasing nanoclay content, while the ultimate tensile stress slightly decreased and the elongation at break of the composites was lower than that of neat PBS, especially lowest at 15 wt% nanoclay. The crystallinity of PBS increased with increasing nanoclay content, remained constant at 5 wt% nanoclay, and then tended to decrease at 15 wt% nanoclay. Nanoclay acts as a nucleating agent. The decrease in crystallinity of PBS is due to the poor dispersion of nanoclay at 10 and 15 wt% nanoclay. For barrier properties, the addition of nanoclay improved the water vapor barrier but had no effect on the oxygen barrier.

Keywords: Packaging/Bioplastic/Gas Permeability/Water Permeability/Mechanical Properties

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง โดยมีระยะเวลาการดำเนินการวิจัย 2 ปี สำหรับรายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนของงานวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 คณะวิจัยจึงอยากขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

คณะวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	4
2.2 บรรจุภัณฑ์	11
2.3 นาโนเคลย์	14
2.4 วัสดุเชิงประกอบ	20
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	24
3. วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีหลักที่ใช้ในงานวิจัย	26
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	27
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	28
4. ผลการวิจัย	35
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	45
บรรณานุกรม	46
ประวัติย่อผู้วิจัย	49

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	4
2.2	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	4
2.3	กราฟแสดงปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และออร์แกนอเคลย์ที่เวลาต่างๆ กัน ภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 90 %	8
2.4	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	11
2.5	แสดงสูตรทางเคมีและโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ลอโนที่ผลิตโดย Nanocor	16
2.6	โครงสร้างทางเคมีของชั้นซิลิเกตเตตระไฮดรอน ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอน และการจัดเรียงโครงสร้างทางเคมีในมอนอเมอร์ลอโน	17
2.7	ลักษณะการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์	19
2.8	มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น	22
2.9	ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส	23
3.1	เม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต BioPBS เกรด FD92PM ของบริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไปโอเค จำกัด	26
3.2	ลักษณะผงนาโนเคลย์ ชื่อทางการค้า Nanomer เกรด I.31PS ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด	27
3.3	แผนการดำเนินงานการศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสถานะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ	27
3.4	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แบบหมุนไปทางเดียวกัน ยี่ห้อ Xinda รุ่น SHJ-20 จากบริษัท Enmach จำกัด	29
3.5	เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Cometechnic รุ่น QC-601T	30
3.6	เครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus	31
3.7	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH	32
3.8	เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ ยี่ห้อ Mocon รุ่น Permatran-W 3/34 G ของบริษัท Mocon	32
3.9	เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านก๊าซบนแผ่นฟิล์ม ยี่ห้อ Brugger รุ่น GDP-C ของบริษัท Brugger Feinmechanik GmbH	33
3.10	เครื่องอัลตราไมโครโทม ยี่ห้อ Leica รุ่น Ultracut UCT	34
3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION ยี่ห้อ Jeol รุ่น JEM-2010	34
4.1	ลักษณะเม็ดสารคอมปาวด์วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน	35

รูปที่		หน้า
4.2	ผลของการเติมนาโนเคลย์ที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน	36
4.3	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน	37
4.4	ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ทรานสมิสชัน ณ กำลังขยาย 10,000 เท่า	38
4.5	ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ทรานสมิสชัน ณ กำลังขยาย 50,000 เท่า	39
4.6	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน	40
4.7	กราฟเทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมเหลวผลึกพอลิบิทีลีนซัคซิเนตในวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	41
4.8	เปอร์เซ็นต์ผลึกของพอลิบิทีลีนซัคซิเนตในวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	42
4.9	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน	43
4.10	อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิทีลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน	44

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิพรอพิลีน	6
2.2	อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ ณ อุณหภูมิ การทดสอบต่างๆ กัน	13
2.3	กลุ่มหลักของเคลย์ที่มีในธรรมชาติ	15

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารนอกจากมีหน้าที่หลักในการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารแล้วยังต้องทำหน้าที่ยืดอายุการเก็บรักษา ปกป้องและป้องกันการปนเปื้อน รวมถึงส่งเสริมให้ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารนั้นๆ ควบคู่ไปด้วย สำหรับผลิตภัณฑ์จากผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์จากข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยสามารถเกิดการเสื่อมคุณภาพ สีและกลิ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีสาเหตุมาจากความชื้น เชื้อรา และการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ นอกจากนี้ยังอาจถูกมอดกัดกินได้อีกด้วย ดังนั้นในการยืดอายุและรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวสามารถทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ข้าวมาทำการบรรจุในถุงพลาสติกสุญญากาศที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันแก๊สและความชื้นที่ดี เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้น และแก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับข้าว และควรทำมาจากพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) เพื่อช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น การพัฒนาฟิล์มพลาสติกเพื่อนำมาใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุข้าวในระบบสุญญากาศควรมีสมบัติทางกลที่ดีเพื่อป้องกันความเสียหายของตัวผลิตภัณฑ์ และลดโอกาสการปนเปื้อนสิ่งสกปรก มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สที่ดีเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยสภาวะสุญญากาศ และควรย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพเพื่อช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกและเป็นการสร้างภาพลักษณ์ที่ดีต่อตัวผลิตภัณฑ์

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) เป็นพลาสติกชีวภาพกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพที่เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ข้าว เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ และสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตสามารถได้มาจากพืช นอกจากนี้พลาสติกทั้งสองชนิดยังมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติความคงรูป และมีความแข็งแรงสูง สมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สที่ดี และมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นจากสารประกอบอินทรีย์ได้ดี โดยมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) จึงมีส่วนช่วยในการเก็บรักษากลิ่นของอาหาร แต่อย่างไรก็ตาม พอลิแลคติกแอซิดยังคงมีข้อเสีย คือ มีความเหนียวต่ำ และมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ปานกลาง [1-3] ส่วนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติทางกลใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) สามารถสัมผัสกับอาหารได้ มีความเหนียวสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถทำเป็นชั้นปิดผนึกได้ โดยการปิดผนึกที่อุณหภูมิต่ำ [4-5] มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านแก๊สได้สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดและสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำค่อนข้างต่ำ [2] จากการพิจารณาสมบัติของพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิด พบว่า พลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิดมีความเป็นไปได้สูงในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าว โดยต้องมีการปรับปรุงสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำของพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากพลาสติกชีวภาพทั้งสองชนิดมี

สมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำที่ไม่ดี เพราะมีโครงสร้างทางเคมีที่ชอบน้ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการปรับปรุงสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำของพลาสติกชีวภาพสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณผลึกของพลาสติกชีวภาพ [6-7] และการเติมสารเพิ่มเนื้อที่มีขนาดในระดับนาโน [8-9] ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมีแนวทางการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุข้าวสารในระบบสุญญากาศ โดยทำการปรับปรุงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกชีวภาพด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ และทำการหาปริมาณสัดส่วนของพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าว

โครงการวิจัยนี้ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการพัฒนาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ และงานวิจัยส่วนที่สองเป็นการพัฒนาสมบัติทางกลของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ พร้อมทั้งเผยแพร่และถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้ให้แก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง โดยโครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาดำเนินการ ทั้งหมด 2 ปีงบประมาณ และเนื้อหาในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เล่มนี้เป็นรายละเอียดของงานวิจัยในส่วนที่หนึ่ง คือ การพัฒนาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อซึ่งเป็นการศึกษาผลของการเติมนาโนเคลย์ที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติการรับแรงดึง สมบัติทางความร้อน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจน และสัณฐานวิทยาของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และสารเพิ่มเนื้อที่มีผลต่อสมบัติทางกล และการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ
- 1.2.2 เพื่อนำองค์ความรู้ด้านบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพถ่ายทอดให้กับผู้มีส่วนเกี่ยวข้องนำผลงานไปใช้ประโยชน์
- 1.2.3 เพื่อส่งเสริมให้เกิดการนำพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัย สำหรับงานวิจัยในส่วนที่หนึ่ง ประกอบด้วย พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และนาโนเคลย์
- 1.3.2 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) และเครื่องอัดความดันสูง (Compression molding machine)
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา สำหรับงานวิจัยในส่วนที่หนึ่ง คือ ปริมาณของนาโนเคลย์
- 1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้

- สมบัติการรับแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM
- สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊ส
- สมบัติทางความร้อน
- สันฐานวิทยา

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน

1.4.1 การศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ (ดำเนินการวิจัยในปีงบประมาณ 2564)

ทำการศึกษาค้นคว้าของการเติมนาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนซีคซีเนต โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณนาโนเคลย์ ตั้งแต่ 0 ถึง 15 %โดยน้ำหนัก และทำการผสมพอลิบิวทิลีนซีคซีเนตและนาโนเคลย์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทำการประเมินผลจากการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจน สมบัติทางความร้อน และสันฐานวิทยา และทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.4.2 การพัฒนาสมบัติทางกลของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ (ดำเนินการวิจัยในปีงบประมาณ 2565)

จากปีงบประมาณ 2564 เลือกสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซีคซีเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์มาทำการปรับปรุงสมบัติทางกล โดยการนำพอลิแลกติกแอซิดมาทำการผสมร่วมกับพอลิบิวทิลีนซีคซีเนตและนาโนเคลย์ โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซีคซีเนต โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดด้วยความดันสูง และทำการประเมินผลจากการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจน สมบัติทางความร้อน และสันฐานวิทยา และทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

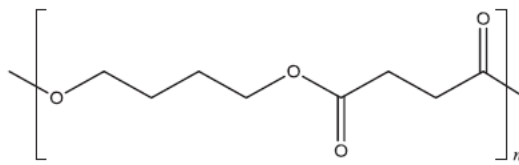
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – เสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการผลของการเติมอนุภาคนาโนของสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพ ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความรู้และทักษะทางการวิจัยให้กับนักวิจัยไทย
- 1.5.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – ส่งเสริมทำให้เกิดการใช้พลาสติกชีวภาพมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.5.3 ด้านวิชาการ – เผยแพร่องค์ความรู้เชิงวิชาการในรูปแบบของการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการ และ/หรือการประชุมวิชาการ ภายหลังการเสร็จสิ้นโครงการวิจัย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

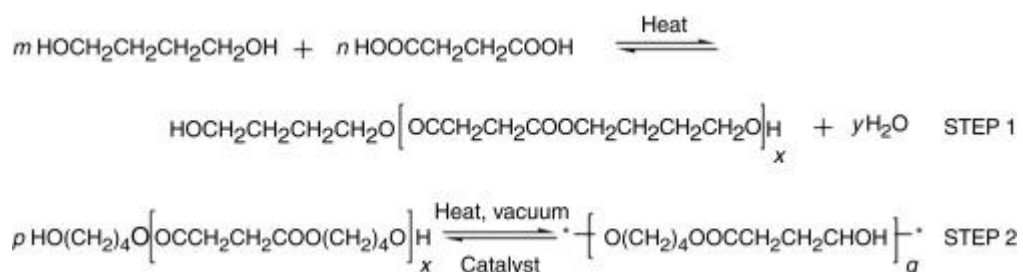
2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจัดเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) เช่นเดียวกับพอลิแลกติกแอซิด โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังรูปที่ 2.1 สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างกรดซัคซินิก (Succinic acid) และ 1,4 บิวเทนไดออล (1,4- butandiol) ซึ่งโมโนเมอร์ทั้งสองชนิดนี้สามารถผลิตได้มาจากสารปิโตรเคมี หรือจากการหมักสารชีวมวลหรือวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ เช่น การหมักขานอ้อย หรือข้าวโพดเพื่อผลิตกรดซัคซินิก ดังนั้นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงสามารถจัดเป็นพลาสติกชีวภาพ และสามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางธรรมชาติ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเป็นผลึกสูง และสามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการหลอมเหลวแบบพลาสติกทั่วไป มีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และสามารถสัมผัสกับอาหารได้ [2, 4, 10-13]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [13]

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาขั้นตอนแรกคือ ปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน (Esterification) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไดแอซิด (Diacid) และไดออล (Diol) และปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2 คือ ปฏิกิริยาการควบแน่นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเพื่อสร้างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [14]



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [14]

2.1.1 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

➤ สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [2, 13-15]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกเช่นเดียวกับพอลิแลกติกแอซิดมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันกับพอลิแลกติกแอซิด โดยมีค่าความหนาแน่น 1.260 g/cm^3 แต่มีจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลว ประมาณ 114-116 องศาเซลเซียส และมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว -30/-32 องศาเซลเซียส สำหรับการเกิดผลึกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอัตราการเกิดผลึกและปริมาณผลึกสูง ผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสงจึงมีผลทำให้ชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีลักษณะทึบแสง พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ α และ β สำหรับโครงสร้างผลึกแบบ β สามารถถูกพบเมื่อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอยู่ภายใต้การทำให้ยัดตัว [2, 13, 15]

สำหรับสมบัติทางกลพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่ามอดูลัส และค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่มีค่ามอดูลัส และค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดค่อนข้างมาก พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความสามารถในการยัดตัวได้ดี โดยมีค่าการยัดตัวสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดมากเหมาะที่จะนำมาใช้งานแทนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ สำหรับสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่า พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติด้านการซึมผ่านทั้งแก๊สและไอน้ำต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พบว่า พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่มีสมบัติด้านการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ สำหรับความทนต่อความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด พบว่า พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทนต่อความร้อนได้สูงกว่าพอลิแลกติกแอซิด โดยมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากความร้อนที่ 97 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิแลกติกแอซิดมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากความร้อนที่ 66 องศาเซลเซียส [2, 13]

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) มีสมบัติที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [14] พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection) การอัดรีด การเป่าเป็นฟิล์ม และกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงสมบัติและกรรมวิธีการขึ้นรูปของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงถือว่ามันเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพอลิโอเลฟิน [14-15] เมื่อพิจารณาถึงความนิ่มและสมบัติการป้องกันการซึมผ่านแก๊สที่ค่อนข้างต่ำของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงทำให้การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้งานจำเป็นต้องมีการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปผสมกับวัสดุอื่นๆ เช่น การเติมสารเพิ่มเนื้อ หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติเป็นที่น่าสนใจ [15]

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิพรอพิลีน [14]

สมบัติ ¹	PBS ²	LDPE	HDPE	PP
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้ว (°C)	-32	-120	-120	5
จุดหลอมเหลว (°C)	114	110	129	163
อุณหภูมิการโค้งตัวเนื่องจาก ความร้อน (°C)	97	88	110	145
ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)	57	35	39	44
ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (MPa)	32	12	27	31
ค่ามอดูลัสการดัดงอ (MPa)	656	176	1070	1370
ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%)	700	400	650	800
ค่าดัชนีการไหล ที่ 190 °C (g/10 min)	1.5	2	2	4

หมายเหตุ ¹ ดัดแปลงมาจาก [14]

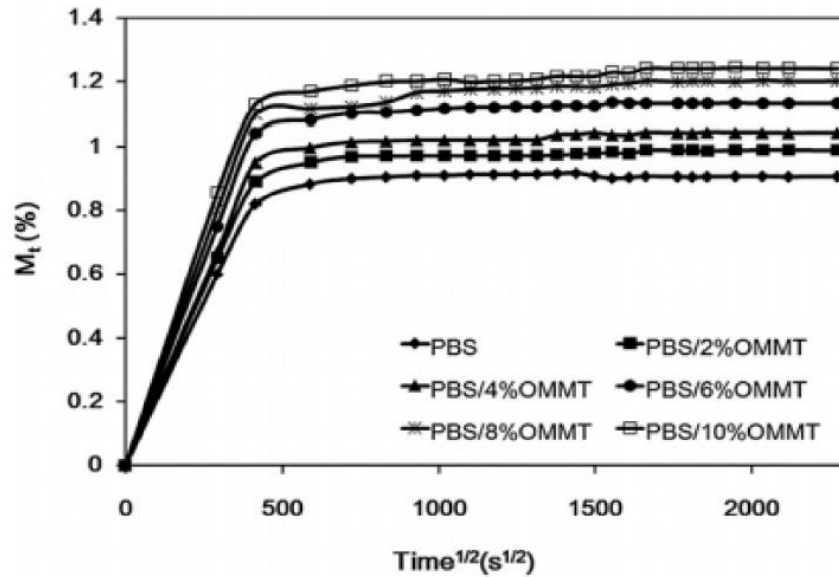
² ชื่อทางการค้า Bionolle (#1001)

➤ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [15]

สมบัติทางกายภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อทำการเติมวัสดุอื่นๆ ลงไป เช่น การเติมสารเสริมแรง หรือสารเพิ่มเนื้อ สมบัติทางกายภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกปรับปรุงด้วยการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ เมื่อนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาผสมกับวัสดุชนิดอื่นสามารถทำให้เกิดการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้นด้วยการลดความหนืดในระหว่างการผสมให้ต่ำลง การกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันในของผสมนำไปสู่การเกิดสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ดี อย่างไรก็ตาม การเติมสารเติมแต่งหรือสารช่วยยึดเกาะถูกต้องการเพื่อให้ได้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ดี ตัวอย่างงานวิจัยวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เช่น การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาผสมกับลิกนิน พบว่า ค่าดัชนีการไหลและค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณลิกนิน จากผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเสริมแรง เช่น เส้นใยธรรมชาติในวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่มีผลทำให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต อีกตัวอย่างงานวิจัยหนึ่ง พบว่าการเติมเส้นใยธรรมชาติในรูปแบบผงมีผลทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเฟสซึ่งการเกิดช่องว่างนี้นำไปสู่การส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ไปยังผงของเส้นใยธรรมชาติมีลดลงส่งผลทำให้สมบัติความทนแรงดึงลดลง นอกจากนี้การเติมเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยปอกระเจา) ลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังมีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลและ

ความชอบน้ำที่สูงของเส้นใยธรรมชาติ ในงานวิจัยหนึ่งได้ทำการศึกษาผลของการเติมเส้นใยธรรมชาติต่างชนิดกันผสมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่า ชานอ้อยและเส้นใยมะพร้าวมีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีการเติมเส้นใยคูร์ว (Curaua fiber) และเส้นใยป่านศรนารายณ์ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณผลึกของเส้นใยชานอ้อยและมะพร้าวมีค่าต่ำกว่า และเส้นใยคูร์วและป่านศรนารายณ์มีความทนต่อน้ำมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณลิกนินที่สูงกว่า สำหรับกรณีการเติมออร์แกโนเคลย์ (Organoclay) หรือออร์แกโนมอนท์มอริลโลไนท์ (Organo-montmorillonite, OMMT) ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่า ออร์แกโนเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยออกตะเดซิลเอมีน (Octadecylamine, ODA) มีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ ณ สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 60 และ 90 % ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากความชอบน้ำของหมู่ออกตะเดซิลเอมีน จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า การเติมออร์แกโนเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยออกตะเดซิลเอมีนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้นแต่มีรูปแบบของกราฟมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมด การเพิ่มขึ้นของการดูดความชื้นเนื่องมาจากหมู่ออกตะเดซิลเอมีนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ

สำหรับสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรงมีรายละเอียดของตัวอย่างงานวิจัย ดังนี้ การเติมเส้นใยคูร์วในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีส่วนช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความต้านทานแรงดัด ส่วนอีกงานวิจัยหนึ่งได้ทำการศึกษาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจา พบว่า เส้นใยปอกระเจาสามารถปรับปรุงสมบัติทางกล โดยวัสดุเชิงประกอบมีค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ เท่ากับ 517.9% ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง 3529.8% ค่าความต้านทานแรงดัด 302.6% และค่ามอดุลัสแรงดัด 1949.1% สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจามีค่าสูงที่สุด เมื่อเติมเส้นใยปอกระเจาปริมาณ 50 %โดยน้ำหนัก สำหรับกรณีการเติมเส้นใยมะพร้าวเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 54.5% ค่ามอดุลัสต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 141.9% ค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้น 45.7% และค่าความมอดุลัสต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้น 97.4% การยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีของเส้นใยธรรมชาติกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีผลทำให้สมบัติทางกลถูกปรับปรุง สำหรับอีกงานวิจัยหนึ่งเป็นการศึกษาผลของการเติมเส้นใยปอแก้วที่มีสมบัติทางกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่า เส้นใยปอแก้วช่วยเพิ่มค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง 53% แต่มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเครียด ณ จุดแตกหักลดลงด้วยการเพิ่มปริมาณเส้นใยปอแก้ว เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอและการเพิ่มขึ้นของปริมาณช่องว่างระหว่างเฟส



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของวัสดุเชิงประกอบพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตและออร์แกนอเคลย์ที่เวลาต่างๆ กัน ภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 90 % [15]

สำหรับสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตมีรายละเอียดของตัวอย่างงานวิจัย ดังนี้ กรณีการเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) และไคโตซาน (Chitosan) ในพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตมีผลทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวลดต่ำลง และปริมาณผลึกเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความหนาของอสัณฐานของพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตลดลงและมีผลทำให้ความหนาของอสัณฐานมีความแปรปรวน จากอีกงานวิจัยหนึ่งได้พบว่า การเกิดผลึกที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีผลทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าแตกต่างกัน เนื่องมาจากโครงสร้างของลากลุ่มและขนาดของผลึกมีความแตกต่างกัน การศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการหลอมเหลวของพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตที่ถูกทำให้เกิดผลึกในระหว่างการให้ความร้อน (Cold-crystallized PBS) พบ พิกทั้งหมด 3 พิก คือ พิกการดูดความร้อน (T_{m1}) เป็นพิกขนาดเล็ก ที่ 42 องศาเซลเซียส พิกการคายความร้อนที่เป็นพิกกว้างที่ 85 องศาเซลเซียส และพิกการดูดความร้อน (T_{m2}) เป็นพิกขนาดใหญ่ที่ 113 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อนพบพิกการดูดความร้อนที่ 92 และ 114 องศาเซลเซียส ผลของการเติมเส้นใยธรรมชาติที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตมีรายละเอียดดังนี้ กรณีการเติมเส้นใยฝ้ายในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกของพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก กรณีการเติมเส้นใยปอแก้วปริมาณ 20 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกของพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น กรณีการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิ(l-ลาคทีด)ที่ลีนซ์ซินเนตมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนและปริมาณผลึกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีส่วนช่วยทำให้เกิดคาร์ไบด์ซึ่งมีส่วนช่วยยับยั้งการเกิดสารที่ถูกสลายตัวจากการะเหยกลายเป็นไอ

ผลของการเติมอนุภาคนาโนที่มีต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีรายละเอียดของตัวอย่างงานวิจัย ดังนี้ กรณีการเติมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs) ร่วมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนมีส่วนช่วยทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น อีกหนึ่งงานวิจัยได้ศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนของฟลูออรีนไมก้า (Fluorine mica) มีผลทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 120 % การเติมอนุภาคนาโนในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรง ความทนต่อความร้อน ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส และความสามารถในการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ กรณีวัสดุเชิงประกอบนาโนระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนซิลิกา พบว่า การเติมนาโนซิลิกาช่วยทำให้ความสามารถในการย่อยสลายตัวเกิดได้เพิ่มมากขึ้น กรณีวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและท่อนาโนคาร์บอนซึ่งถูกผสมกันด้วยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว พบว่า สมบัติทางกลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกปรับปรุง ค่ามอดูลัส ความต้านทานแรงดัดงอเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.64 GPa สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็น 1.2 GPa สำหรับวัสดุเชิงประกอบนาโน ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 88% และมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 5.8×10^{-9} S/cm สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็น 4.4×10^{-3} S/cm สำหรับวัสดุเชิงประกอบนาโน กรณีวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและออร์แกนอมอนท์มอร์ริโลไนท์ พบว่า ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรง สมบัติการป้องกันแก๊ส และสมบัติทนวงไฟถูกปรับปรุงด้วยการเติมอนุภาคนาโนของออร์แกนอมอนท์มอร์ริโลไนท์ วัสดุเชิงประกอบนาโนที่เติมออร์แกนอมอนท์มอร์ริโลไนท์จัดว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือเป็นวัสดุเชิงประกอบสีเขียว

2.1.2 การย่อยสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [12-13, 15]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะถูกย่อยสลายโดยผ่านกระบวนการการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydro-biodegradable) ซึ่งกลไกการย่อยสลายเริ่มต้นจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่บริเวณตำแหน่งพันธะเอสเทอร์ มีผลทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง จนกระทั่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ต่างๆ ต่อไป แผ่นฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีความหนา 40 ไมครอน สามารถย่อยสลายลดลงเหลือ 50%โดยน้ำหนัก ภายในระยะเวลา 1 เดือนในดินที่ใส่เพาะปลูกทั่วไป พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วยการนำไปฝังดิน และไม่มีการปลดปล่อยสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอัตราการสลายตัวทางชีวภาพต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพชนิดอื่นๆ เพราะพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอัตราการเกิดผลึกและปริมาณผลึกสูง ส่งผลทำให้มีความสามารถในการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าต่ำกว่ากรณีพอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone: PCL) ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอิทธิพลต่ออัตราการสลายตัวด้วยวิธีทางชีวภาพ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการสลายตัวแบบไฮโดรไลติก (Hydrolytic degradation) และแบบเอนไซม์ (Enzymatic degradation) ลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณอสัณฐานมีการแตกตัวกันอย่างหลวมๆ จึงเป็นตำแหน่งที่ง่ายต่อการเกิดการสลายตัว นอกจากปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ

แล้วยังคงมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ ประกอบด้วย น้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความบริสุทธิ์ การมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอกซิล และสารเติมแต่งบางชนิดที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งนั้นอาจเกี่ยวข้องกับแบคทีเรีย เอนไซม์ และสารเพิ่มเนื้ออินทรีย์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถย่อยสลายได้ด้วยเชื้อราและแบคทีเรียภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมชาติ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเกิดการย่อยสลายได้ประมาณ 71.9% ภายหลังจาก 90 วัน พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อยู่ในรูปของผงเกิดการสลายตัวได้ง่ายกว่าในรูปของเม็ดหรือทำเป็นฟิล์ม พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดการสลายตัวโดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการพันธะเอสเทอร์ และนำไปสู่การลดลงของน้ำหนักโมเลกุล

สำหรับการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่า กรณีวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง เช่น ปอกระเจา แกลบ และเส้นใยอะบาค้า (Abaca fiber) มีผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเมื่อนำไปฝังดินเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติมีส่วนช่วยเสริมให้เกิดการย่อยสลายตัวด้วยวิธีทางชีวภาพที่รวดเร็วกว่าขึ้น ส่วนกรณีวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมออร์แกนอมอนท์มอร์ริไลน์ที่มีผลทำให้อัตราการสลายตัวช้าลง เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านซึ่งมีผลไปควบคุมการแทรกซึมของจุลินทรีย์ผ่านวัสดุ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของวัสดุเชิงประกอบส่งผลต่ออัตราการสลายตัวด้วยวิธีทางชีวภาพเช่นเดียวกัน เพราะอัตราการสลายตัวด้วยวิธีทางชีวภาพขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนย้ายของน้ำจากพื้นผิวไปยังภายในเนื้อชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และไม้ยางได้เริ่มเกิดการสลายตัวที่เวลา 60 วัน และพบรอยแตกและช่องว่างระหว่างเฟส สำหรับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสลายตัวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คือ ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พื้นที่ผิว สมบัติความชอบน้ำ โครงสร้างทางเคมี และความหนาแน่น

2.1.3 การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้ประโยชน์ [12, 15]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถถูกนำไปใช้แทนที่พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและพอลิโพรพิลีนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกัน พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถถูกนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เช่น ภาคการเกษตร การประมง และวิศวกรรมโยธา สำหรับตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร ขวดน้ำ ฟิล์มคลุมดินสำหรับงานทางการเกษตร ถุงเพาะชำ ถังที่ย่อยสลายได้ กระถางต้นไม้ ตาข่ายสำหรับร่มเงาให้กับพืช แก้วน้ำแบบใช้ครั้งเดียวโดยการเคลือบกับกระดาษ แผ่นซีดี โฟม เส้นด้าย รวมถึงชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น ในรูปที่ 2.4 เป็นภาพตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตซึ่งแสดงถึงการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย

สำหรับแนวโน้มการนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้งานในอนาคต พบว่า ในปัจจุบันบริษัท Mitsubishi Chemical และ Ajinomoto ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตและพัฒนาพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเตรียมกรดซัคซินิกได้จากวัสดุชีวมวล หรือวัสดุทางธรรมชาติ กรดซัคซินิกเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัค

ซิเน็ต ดังนั้นจึงได้มีการคาดการณ์ว่า การผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผลิตจากวัสดุทางธรรมชาติจะมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการผลิตพอลิแลกติกแอซิด และสามารถนำมาใช้งานแทนพอลิแลกติกแอซิด ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทั่วไป นอกจากนี้ทาง บริษัท Mitsubishi Chemical กล่าวว่า พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีศักยภาพเพียงพอในการนำไปใช้งานแทนพอลิโอเลฟินส์ และพอลิสไตรีนในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภทได้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [15]

2.2 บรรจุภัณฑ์

การเลือกใช้วัสดุ และการสร้างบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารจำเป็นต้องคำนึงถึงสภาวะแวดล้อม เพราะมีผลต่อการเสื่อมสภาพ และอายุการเก็บรักษาของอาหารที่บรรจุ

2.2.1 สภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อบรรจุภัณฑ์ [16] แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1. สภาพแวดล้อมทางกายภาพ (Physical environment) เช่น การกระแทก การสั่นสะเทือน การกดทับ
2. สภาพแวดล้อมที่อยู่รอบๆ บรรจุภัณฑ์ (Ambient environment) เช่น ก๊าซ น้ำ ไอน้ำ แสง อุณหภูมิ จุลินทรีย์ ฝุ่น สิ่งสกปรก และไอระเหย
3. สภาพแวดล้อมที่เกิดจากมนุษย์ (Human environment) พฤติกรรมผู้บริโภค กฎหมาย ระเบียบ ข้อบังคับ การออกแบบบรรจุภัณฑ์

2.2.2 ปฏิกริยาการเสื่อมสภาพของอาหาร [16] มีดังนี้

1. ปฏิกริยาเอนไซม์ (Enzyme reactions) การทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับอาหาร ปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w) และการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน โดยปัจจัยทั้งสามปัจจัยเป็นตัวเร่งทำให้อาหารเกิดการเสื่อมสภาพหรือเน่าเสียได้เร็วขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์
2. ปฏิกริยาเคมี (Chemical reactions) ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจาก 2 สาเหตุหลักๆ คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไขมันและแก๊สออกซิเจน (Lipid oxidation) ทำให้ไขมันมีกลิ่นหืน และการเกิดปฏิกิริยาบราวน์นิ่ง (Nonenzyme browning) ทำให้ผักผลไม้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
3. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (Physical changes) เป็นการเสื่อมสภาพของอาหารที่เป็นผลมาจากแรงทางกายภาพ หรือแรงทางกล เช่น การแตกหัก การชำรุด เป็นต้น
4. การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา (Biological changes) เป็นการเสื่อมสภาพของอาหารเนื่องจากการมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนในอาหาร และเพิ่มจำนวนได้ในอาหาร โดยจุลินทรีย์ผลิตเอนไซม์ออกมาย่อยอาหารแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารจนไม่เป็นที่ยอมรับ โดยเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

2.2.3 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w) [16]

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี คือ ค่าที่บอกปริมาณของน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นค่า a_w จึงเป็นค่าที่ควบคุมการเสียของอาหาร โดยอาหารแต่ละชนิดจะมีค่า a_w ที่แตกต่างกัน โดยค่า a_w สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$a_w = \frac{\text{ความดันไอของน้ำในอาหาร (p)}}{\text{ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ (p}_0\text{)}} \quad (2.1)$$

ค่า a_w ของอาหารแต่ละชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับ ความชื้น และอุณหภูมิ

- ณ อุณหภูมิคงที่ ค่า a_w มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น
- อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า a_w ค่อนข้างมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อระดับพลังงานจลน์ของน้ำในอาหาร อุณหภูมิสูงมีผลทำให้น้ำในอาหารมีระดับสูงขึ้นมากกว่าอาหารที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการเก็บอาหารที่อุณหภูมิสูงจึงมีผลทำให้อาหารเสียได้ง่ายกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุลินทรีย์จำพวกรา ยีสต์ และแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดี

2.2.4 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ [17] (Water vapour transmission rate of biopolymers)

อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำถูกใช้ในการอธิบายสมบัติป้องกันการซึมผ่านน้ำของพอลิเมอร์ ค่า WVTR เป็นปริมาณน้ำ (Q) ที่แพร่ผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) ภายในหนึ่งหน่วยเวลา (t) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 โดยที่หน่วยของ WVTR คือ $\text{g}/(\text{m}^2\text{day})$

$$\text{WVTR} = \frac{Q}{At} \quad (2.2)$$

ความสามารถในการแพร่ผ่านน้ำของพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับ ความมีขั้วของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล ความสมมาตรของสายโซ่ ปริมาณผลึก การจัดเรียงตัว และอุณหภูมิ ตารางที่ 2.2 แสดงค่า WVTR ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สามารถละลายตัวได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ จากตารางที่ 2.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ค่า WVTR เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ช่องว่างอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วพลาสติกชีวภาพมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของน้ำต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกทางการค้า เนื่องจากพลาสติกชีวภาพมีหมู่ที่มีขั้วซึ่งจัดเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic groups)

ตารางที่ 2.2 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ ณ อุณหภูมิการทดสอบต่างๆ กัน [17]

Film	WVTR ($\text{g}/\text{day}/\text{m}^2$)		
	T = 6°C	T = 25°C	T = 49°C
PHBV-6	1.8	13	124
PHBV-12	3.1	21	204
PHBV-18	3.5	26	245
PLA(annealed at 130°C)	27	82	333
PLA	54	172	1100
PCL	41	177	1170
Bionolle	59	330	2420
BAK 1095	134	680	3070
Cellulose acetate propionate	590	1700	5200
Cellulose acetate	1020	2920	7900

2.3 นาโนเคลย์ [18-21]

นาโนเคลย์ (Nanoclay) เป็นอนุภาคนาโนที่ได้รับความสนใจในการนำมาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยพิจารณาจากในปี ค.ศ. 2005 นาโนเคลย์เป็นสารที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรตั้งแต่ ~ 1 ถึง 100 นาโนเมตร สัดส่วนการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมนาโนเคลย์ในทางการค้าคิดเป็นอัตราส่วน 1 ใน 4 ของปริมาณการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมนาโนอนุภาคนาโนทั้งหมด วัสดุนาโนเคลย์ที่สำคัญ คือ มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite, MMT) ในทางเคมีเคลย์ตามธรรมชาติอาจถูกอธิบายว่าเป็นไฮดรอสซิลิเกต (Hydrous silicate) ลักษณะโดยทั่วไปของเคลย์คือ โครงสร้างตามธรรมชาติมีรูปร่างคล้ายแผ่นชีต ไฮดรอสซิลิเกตที่มีลักษณะเป็นแผ่นชีตนี้โดยทั่วไปถูกกล่าวถึงเป็นไฟโลซิลิเกต (Phyllosilicates) แต่ละอนุภาคของเคลย์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.004 มิลลิเมตร คอลลอยด์เคลย์มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากกว่า หรือเล็กกว่า 0.001 มิลลิเมตร และถูกพบในลักษณะเป็นชั้นของซิลิเกต (layered silicates) [18-19]

2.3.1 ประเภทและโครงสร้างของเคลย์ [18]

เคลย์ สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลักๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ประกอบด้วย กลุ่มคาโอลิไนท์ (Kaolinite) กลุ่มมอนต์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ (Montmorillonite/Smectite) กลุ่มอิลไลต์ (Illite) และกลุ่มคลอไรท์ (Chlorite)

1. กลุ่มคาโอลิไนท์มี 3 ส่วนประกอบ ประกอบด้วย คาโอลิไนท์ ดิคไคท์ (Dickite) และแนคราइट (Nacrite) โดยแต่ละตัวมีสูตรเคมี คือ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ การมีสูตรเคมีที่เหมือนกันของกลุ่มคาโอลิไนท์แสดงให้เห็นว่ากลุ่มนี้มีโครงสร้างแบบพหุสัณฐานหรือมีสูตรเหมือนกันแต่มีโครงสร้างแตกต่างกัน แต่ละตัวของแผ่นชีตซิลิเกต (Si_2O_5) ทำพันธะกับชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์/อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_4$) เคลย์เหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในเซรามิก สี ยาง กระดาษ และพลาสติก
2. กลุ่มมอนต์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ ประกอบด้วย มอนต์มอริลโลไนท์ ทัลค์ (Talc) ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) ซาโปไนท์ (Saponite) และนอนโตรไนท์ (Nontronite) สูตรเคมีโดยทั่วไปของเคลย์กลุ่มนี้ คือ $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{H}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Zn})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \text{XH}_2\text{O}$ ความแตกต่างที่สำคัญของสมาชิกในกลุ่มนี้ คือ ลักษณะเฉพาะทางเคมี โครงสร้างที่เป็นชั้นบรรจุด้วยชั้นของซิลิเกตที่แซนวิชกับชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์/อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กลุ่มมอนต์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ ถูกใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในสีและยาง เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในการขึ้นรูปทรายด้วยแม่พิมพ์และในการขุดเจาะโคลน และเป็นพอร์ซีเลนที่ทนต่อไฟฟ้า ทนต่อความร้อน และทนต่อการกร่อน หนึ่งในส่วนประกอบของกลุ่มมอนต์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ คือ ทัลค์มีอยู่ในแป้งฝุ่นทาหน้าแบบดั้งเดิม
3. กลุ่ม อิลไลต์ เป็น เคลย์ ชนิดทั่วไปเท่านั้น สูตรทางเคมีโดยทั่วไป คือ $(\text{K}, \text{H}) \text{Al}_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \text{XH}_2\text{O}$ โครงสร้างของเคลย์กลุ่มนี้คล้ายกับกลุ่มมอนต์มอริลโลไนท์ คือ ชั้นของซิลิเกตที่ทำแซนวิชกับชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์/อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กลุ่มอิลไลต์ ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในการขุดเจาะโคลน

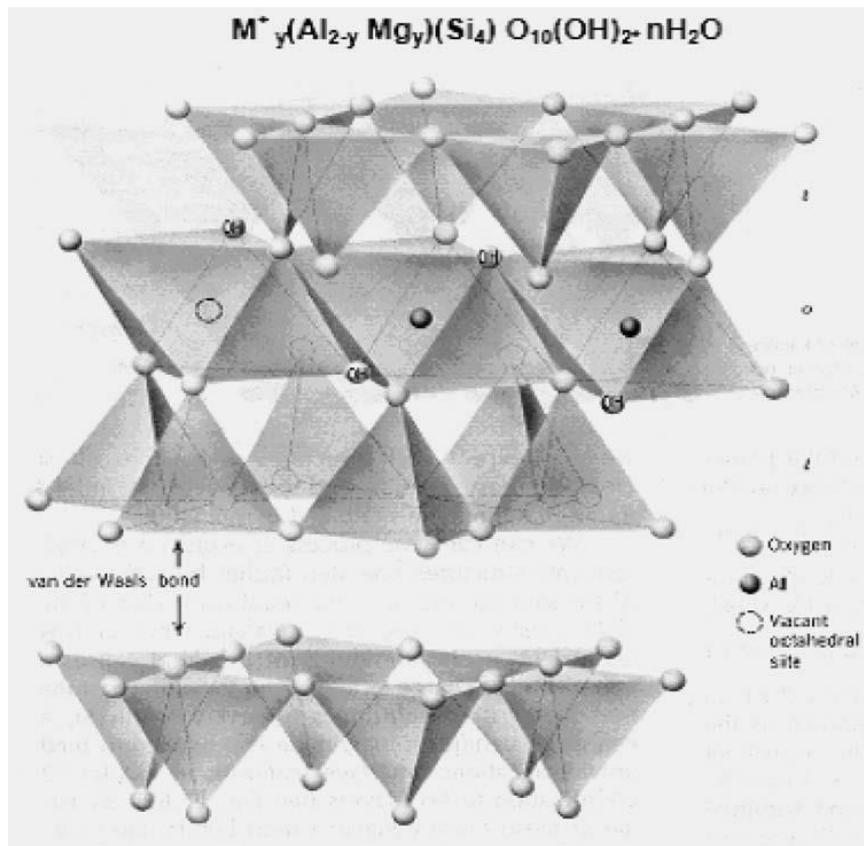
4. กลุ่มคลอไรต์เป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ ประกอบด้วย อะเมไซต์ (Amesite) คาโมไซต์ (Chamosite) คูกี้ (Cookeite) และแดฟไนท์ (Daphnite) กลุ่มคลอไรต์มีสูตรและโครงสร้างที่แตกต่างกัน และไม่มีสูตรเคมีทั่วไป

ตารางที่ 2.3 กลุ่มหลักของเคลย์ที่มีในธรรมชาติ [18]

Solution	Group Name	Member Minerals	General Formula	Remarks
1	kaolinite	kaolinite, dickite, nacrite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	members are polymorphs (composed of the same formula and different structure)
2	montmorillonite or smectite	montmorillonite, pyrophyllite, talc, vermiculite, sauconite, saponite, nontronite	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{H})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Zn})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	X indicates varying level of water in mineral type
3	illite	illite	$(\text{K}, \text{H})\text{Al}_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	X indicates varying level of water in mineral type
4	chlorite	(i) amesite, (ii) chamosite, (iii) cookeite, (iv) nimite etc.	(i) $(\text{Mg}, \text{Fe})_4 \text{Al}_4 \text{Si}_2 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$ (ii) $(\text{Fe}, \text{Mg})_3 \text{Fe}_3 \text{AlSi}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$ (iii) $\text{LiAl}_5 \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$ (iv) $(\text{Ni}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6 \text{AlSi}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	each member mineral has separate formula; this group has relatively larger member minerals and is sometimes considered as a separate group, not as part of clays

โครงสร้างของอนุภาคเคลย์มีลักษณะเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยแผ่นซีทโครงสร้างแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ออกตะฮีดรอน (Octahedral) และเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) แผ่นซีทเตตระฮีดรอนประกอบด้วย โครงสร้างเตตระฮีดรอนของซิลิกอน-ออกซิเจนเชื่อมโยงกับโครงสร้างเตตระฮีดรอนที่อยู่ข้างเคียงโดยการใช้มุม 3 มุมร่วมกันส่งผลให้เกิดโครงร่างตายข่าย 6 ด้าน มุมที่ 4 ของแต่ละโครงสร้างเตตระฮีดรอนที่เหลืออยู่และอยู่ใกล้กันสร้างเป็นแผ่นซีทออกตะฮีดรอน แผ่นซีทออกตะฮีดรอนโดยปกติประกอบด้วย อะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมประสานกันกับออกซิเจนจากแผ่นซีทเตตระฮีดรอนและประสานกันกับไฮดรอกซิล แผ่นซีท 2 แผ่นร่วมกันสร้างเคลย์ 1 ชั้น และหลายชั้นอาจเข้าร่วมกันในผลึกเคลย์ 1 ผลึกด้วยไอออนบวกระหว่างชั้น แรงวัลเดอวาลส์ แรงไฟฟ้าสถิตย์ หรือด้วยพันธะไฮโดรเจน

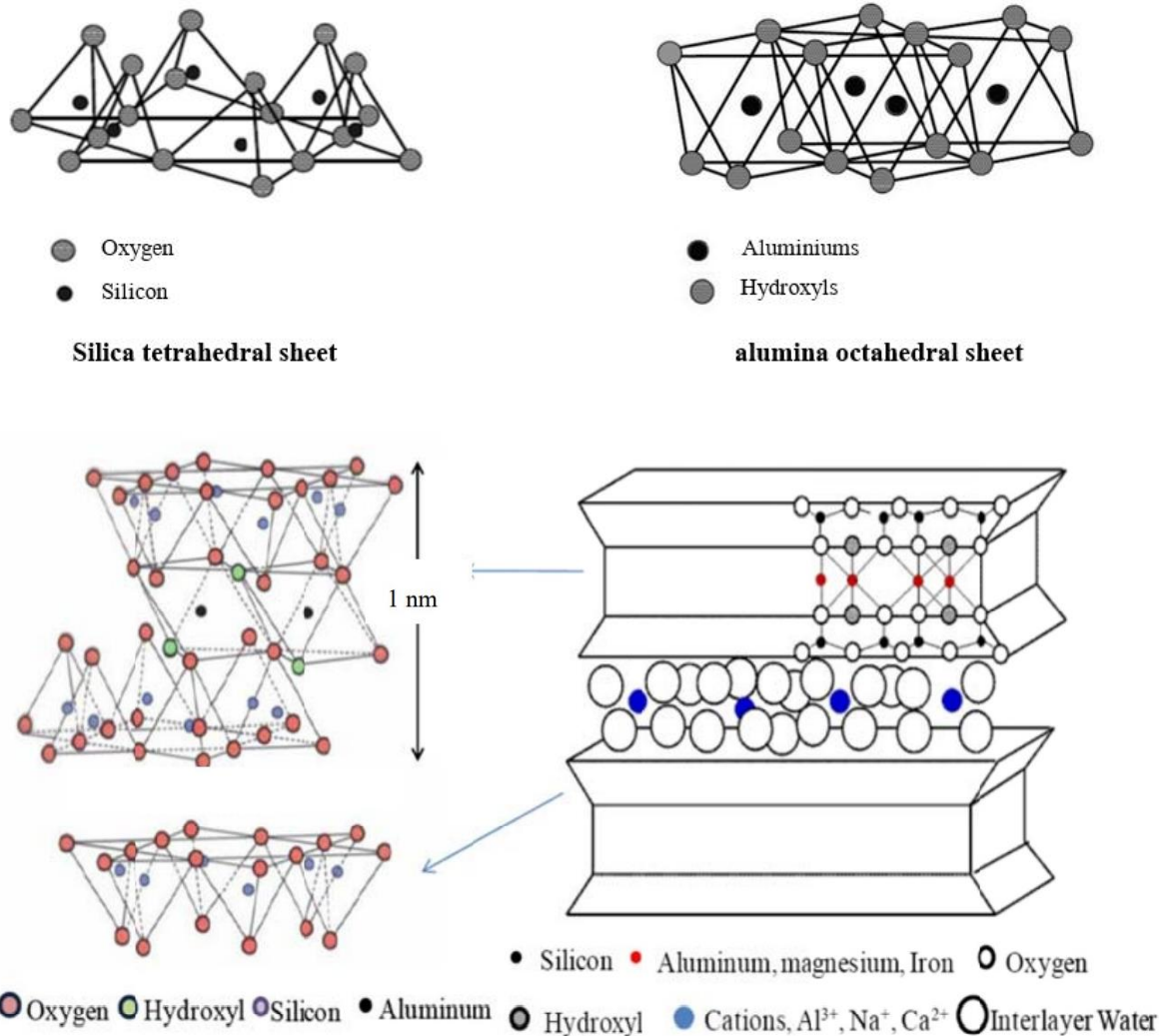
รูปที่ 2.5 แสดงสูตรทางเคมีและโครงสร้างทางเคมีของเคลย์ที่ถูกผลิตโดย Nanocor หน่วยโครงสร้างเบื้องต้น ได้แก่ เตตระฮีดรอนของซิลิกา และออกตะฮีดรอนของอะลูมิเนียม ไอออนบวก Si^{+4} มีการประสานกันกับออกซิเจนเป็นเตตระฮีดรอน ในขณะที่ไอออนบวก Al^{+3} เกิดการประสานกันเป็นออกตะฮีดรอน



รูปที่ 2.5 แสดงสูตรทางเคมีและโครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนท์ที่ถูกผลิตโดย Nanocor [18]

2.3.2 เคลย์มอนต์มอริลโลไนท์ [18-20]

เบนโตไนท์ (Bentonite) เป็นแหล่งของมอนต์มอริลโลไนท์ในธรรมชาติที่สำคัญ โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์ ประกอบไปด้วย ชั้นอะลูมิเนียมออกเตดราฮีดรอน (aluminium octahedral) ที่อยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของซิลิเกตเตตระฮีดรอน (silicate tetrahedral sheet) และระหว่างชั้นมีช่องว่างที่มีประจุไอออนบวกของโซเดียมไอออน (Na^+) หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่ทำหน้าที่ยึดชั้นของเคลย์เอาไว้ อย่างแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 นอกจากมอนต์มอริลโลไนท์ในเบนโตไนท์อาจจะมีผลึกของควอตซ์ (Quartz) คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) โดยทั่วไปเคลย์ที่ได้มาจากเบนโตไนท์อาจมีสมบัติของการฟอร์มิซโทรพิก-เจล (Thixotropic-gel formation) กับน้ำ มีค่าการดูดซับน้ำสูง และความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง สมบัติเหล่านี้ของเคลย์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำที่เข้ามาแทรกตัวในเคลย์ และไอออนบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้ในช่องว่างระหว่างชั้นของแผ่นชีท [18-19]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของชั้นซิลิเกตเตตระฮีดรอน ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอน และการจัดเรียงโครงสร้างทางเคมีในมอนท์มอริลโลไนท์ [19-20]

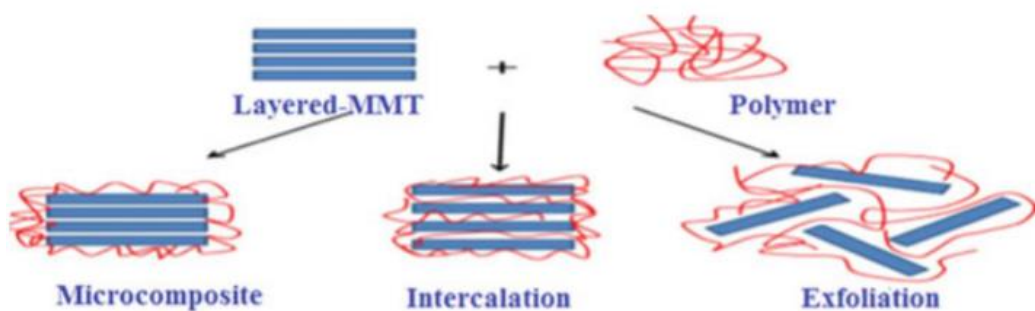
ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิว และอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอนเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญที่ต้องการในนาโนเคลย์ ความยาวและความกว้างของอนุภาคอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 20-30 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับความยาว มีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เฉลี่ยสูงที่สุดที่เป็นไปได้ คือ 200-500 ปริมาณนาโนเคลย์เพียงเล็กน้อยแสดงพื้นที่ผิวที่สูง นั่นคือ ผลิตภัณฑ์นาโนเคลย์มีพื้นที่ผิวเกิน 750 ตารางเมตร/กรัม อนุภาคของนาโนเมตรอาจเป็นขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของเรซิน เมื่อนาโนเคลย์ถูกปรับปรุงผิว การเข้ากันอย่างใกล้ชิดระหว่างอนุภาคนาโนเคลย์และโมเลกุลเรซินมีผลทำให้เกิดพื้นที่ผิวที่ถูกจำกัดขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาคซึ่งมีผลทำให้สัดส่วนหนึ่งของเรซินไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ผลของการเติมนาโนเคลย์จำนวนหลายอนุภาคมีผลทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่ถูกจำกัดไม่ให้อาจเคลื่อนที่ได้ [18]

เคลย์หรือมอนท์มอริลโลไนท์ที่ถูกศึกษาสำหรับการนำไปใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ เป็นสารเติมแต่งในอาหารเพื่อเสริมสร้างสุขภาพและความแข็งแรง สำหรับด้านเชื้อแบคทีเรียที่มีผลทำให้ฟันผุและเหงือกอักเสบ เป็นตัวดูดซับสำหรับสีย้อม และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำมอนท์มอริลโลไนท์มาใช้ประโยชน์เป็นสารเพิ่มเนื้อในเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซต เคลย์ถูกชี้ว่าสามารถช่วยดูดซับสารพิษในอาหารและแบคทีเรีย และสารพิษจากการเผาผลาญเพื่อช่วยต่อต้านอาการคลื่นไส้ อาเจียนและท้องเสีย ผลิตภัณฑ์ที่มีมอนท์มอริลโลไนท์สามารถทำงานทันทีในช่องทางเดินอาหารและทำการจับสารพิษส่งผลทำให้สารพิษถูกขับออกจากร่างกายผ่านทางอุจจาระได้ปริมาณสูงมาก เคลย์ยังสามารถถูกใช้เป็นยาในการต้านทานการแพร่ระบาดของอหิวาตกโรค [18]

2.3.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ [18, 21]

สำหรับวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ สามารถเตรียมได้ 3 วิธี คือ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชัน (In situ polymerization) วิธีการใช้สารละลาย (Solution method) และกระบวนการหลอมเหลว (Melt intercalation) และเมื่อพิจารณากระบวนการเตรียมทั้ง 3 วิธี พบว่า กระบวนการหลอมเหลวเป็นวิธีการที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับอุตสาหกรรม เพราะไม่มีการใช้สารละลายซึ่งช่วยลดต้นทุนและลดปริมาณของเสีย และยังสามารถนำเครื่องจักรที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปได้อีกด้วย

สำหรับลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เป็นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ซึ่งมีผลทำให้เกิดการกระจายตัวในรูปแบบที่ต่างกัน การเกิดการแทรกสอดของสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่างชั้นของเคลย์ เรียกว่า intercalation ส่วนการกระจายตัวของชั้นเคลย์และการแยกออกจากกันของชั้นเคลย์ เรียกว่า exfoliation จากรูปที่ 2.7 จะพบว่า กรณีของวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบ intercalation สายโซ่พอลิเมอร์จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์มีเพิ่มมากขึ้น แต่ยังคงโครงสร้างแบบเป็นชั้นเคลย์และไม่เกิดการแยกออกจากกัน ส่วนกรณีวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบ exfoliation ชั้นเคลย์จะเกิดการกระจายตัวได้ดีกว่าแบบ intercalation โดยชั้นเคลย์ถูกแยกออกจากกัน และสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี วัสดุเชิงประกอบนาโน แบบ exfoliated nanocomposite จะมีการปรับปรุงสมบัติทางกล (ค่าความเหนียว ความต้านทานแรงดึง ค่ามอดุลัสความทนแรงดึง) สมบัติทางกายภาพ (การป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ ความใส และการหดตัว) และสมบัติทางความร้อน (เสถียรภาพทางความร้อน การลามไฟ และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน) ที่ดีกว่ากรณีวัสดุเชิงประกอบนาโน แบบ intercalated nanocomposite สมบัติต่างๆ ข้างต้นของพอลิเมอร์สามารถถูกปรับปรุงโดยการเติมนาโนเคลย์เพียงเล็กน้อย (1-5 %)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [21]

ปัจจุบันได้มีการนำนาโนเคลย์มาใช้งานในการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์เพิ่มมากขึ้นและได้มีการตรวจสอบการทนต่อความร้อนและการหน่วงไฟของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ การทนต่อความร้อนของเคลย์มีค่าสูงซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้มันถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในพอลิเมอร์ด้วยการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ การปรับปรุงความทนต่อความร้อนในพอลิเมอร์โดยการเติมนาโนเคลย์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอน (aspect ratio) ของนาโนเคลย์ อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอนที่มากกว่า 100 ถูกต้องการสำหรับการปรับปรุงความทนต่อความร้อน อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอนที่เพิ่มขึ้นและต้นทุนที่ต่ำของนาโนเคลย์เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์เพื่อพัฒนาสมบัติการกันความร้อนและเพื่อการนำมาใช้งานในทางการค้า นาโนเคลย์ที่นิยมนำเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ คือ มอนท์มอริลโลไนท์ แผ่นซีทในมอนท์มอริลโลไนท์ประกอบด้วยการจัดเรียงตัวของแผ่นซีทเตตระฮีดรอนและแผ่นซีทออกตะฮีดรอน ในอัตราส่วน 2:1 แผ่นซีทในระนาบผลึกมีประจุลบและหมู่ไฮดรอกซิลที่เชื่อมโยงกับอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม แรงไฟฟ้าสถิตเป็นแรงเริ่มแรกที่ทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างแผ่นซีท อย่างไรก็ตาม มันสามารถเกิดการแยกออกจากกันของแผ่นซีทได้ ดังนั้นอนุภาคนาโนเคลย์สามารถมีลักษณะเป็นการแทรกตัวอยู่ร่วมกันของแผ่นซีท (Intercalation) หรือการลอกออกจากกันของแผ่นซีท (Exfoliation) สำหรับผลึกของเคลย์ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคนาโน มันสามารถถูกเรียกว่าเป็น Intercalated clay และเมื่อมันเกิดเป็นแผ่นซีทเคลย์แบบเดี่ยวๆ มันถูกเรียกว่าเป็น Exfoliated clay แรงกระทำระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์เมทริกซ์ขึ้นอยู่กับพันธะไฮดรอกซิลและประจุที่มีอยู่ในอนุภาคนาโนเคลย์เป็นสำคัญ การเติมนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์มีผลทำให้พอลิเมอร์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์มีค่าอยู่ในช่วง 30-40 ppm/°C นอกจากการเติมนาโนเคลย์จะช่วยปรับปรุงการขยายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์แล้วยังมีส่วนช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

2.4 วัสดุเชิงประกอบ (Composites) [22]

2.4.1 ความหมายและองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่เกิดจากของผสมที่ประกอบด้วยส่วนผสมหรือเฟสตั้งแต่ 2 เฟสหรือมากกว่านั้น มีลักษณะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้การพิจารณาว่าวัสดุเป็นวัสดุเชิงประกอบหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากหลัก 3 ประการ ดังนี้

- ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องมีอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากกว่า 5 %
- ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากสมบัติของส่วนผสม เช่น ในกรณีของพลาสติก ถึงแม้จะมีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นและเหตุผลในทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบ
- ส่วนผสมต้องไม่ผสมกลืนกันเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งแยกเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ สามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. เมทริกซ์ (matrix) คือ ส่วนผสมที่โดยส่วนใหญ่แล้วมีสัดส่วนที่มาก และอยู่ในลักษณะต่อเนื่องโดยปกติแล้วสมบัติของเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยส่วนผสมตัวอื่นที่นำเข้ามาผสมรวมด้วย
2. สารเสริมแรง (reinforcement, reinforcing phase) คือ ส่วนผสมที่ทำหน้าที่ส่งเสริมสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์ให้ดีขึ้น รูปร่างของสารเสริมแรงมีผลต่อประสิทธิภาพของสารเสริมแรง โดยปกติสารเสริมแรงมีรูปร่างที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หรืออนุภาค

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

- สัดส่วนของส่วนผสม (volume fraction) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด กฎของการผสมเป็นดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\chi_c = \chi_m V_m + \chi_f V_f \quad (2.3)$$

โดยที่ χ_c คือ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ต้องการทราบ

χ_m คือ สมบัติที่ต้องการทราบของเมทริกซ์

χ_f คือ สมบัติที่ต้องการทราบของสารเสริมแรง

V_m คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์

V_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเสริมแรง

- ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส (interface) ของเมทริกซ์และสารเสริมแรงมีบทบาทที่มีความสำคัญซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การนำกฎการผสมมาใช้ได้อย่างไม่สมบูรณ์เนื่องจากต้องคำนึงความแข็งแรงและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสด้วย
- รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

- ขนาดของเกรนของเมทริกซ์
- สมบัติของส่วนผสมเอง

2.4.3 ความแข็งแรงระหว่างเฟส

ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเฟสที่แข็งแรงสามารถทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ มีการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังสารเสริมแรงได้โดยผ่านทางพื้นผิวระหว่างเฟส

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงระหว่างเฟส คือ

1. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบในสถานะหนึ่งที่เมทริกซ์สามารถไหลได้ และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับของเหลว ความสามารถในการเปียก ณ ที่นี้อธิบายเกี่ยวกับความสามารถที่ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถแพร่ขยายไปบนพื้นผิวของของแข็ง (สารเสริมแรง) ความสามารถในการเปียกที่ดีหมายความว่า ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถไหลไปบนพื้นผิวของสารเสริมแรงปกคลุมไปทั่วทุกตำแหน่งที่ไหลไปกระทบ ณ ตำแหน่งพื้นผิวที่ไม่เรียบของสารเสริมแรง ของเหลวสามารถไหลเข้าไปแทนที่อากาศทั้งหมดได้ การเปียกเกิดขึ้นได้ถ้าความหนืดของเมทริกซ์ไม่สูงมากเกินไปและถ้าการเปียกนั้นส่งผลทำให้ค่าพลังงานอิสระ (free energy) ของระบบลดลง การกระจายตัวของของเหลวที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ต้องมีสมการเป็นดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} < \gamma_{SG} \quad (2.4)$$

โดยที่ γ_{LG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ

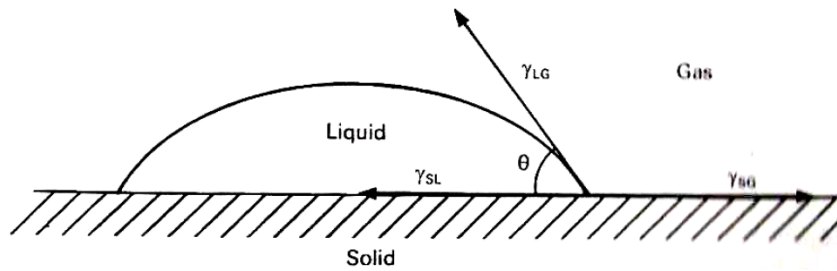
γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

γ_{SG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและก๊าซ

สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (spreading coefficient, SC) เป็นดังสมการที่ 2.5 เมทริกซ์สามารถเปียกสารเสริมแรงได้ เมื่อสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเป็นบวก

$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.8 ค่ามุมสัมผัส (contact angle) มีค่าอยู่ในช่วง $0^\circ < \theta < 180^\circ$ และองศาของการเปียกมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อมุม θ ลดลง และถ้ามุม $\theta > 90^\circ$ มักถือว่าของเหลวไม่สามารถเปียกของแข็งได้



รูปที่ 2.8 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น [22]

2. การยึดเกาะระหว่างเฟส (Interfacial bonding)

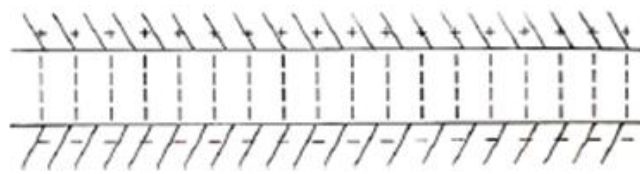
เมื่อเมทริกซ์สามารถสัมผัสกับสารเสริมแรงหรือเปื่อยผิวสารเสริมแรงนั้น ทำให้มีพันธะระหว่างเฟสเกิดขึ้น พันธะชนิดต่างๆ อาจถูกสร้างขึ้นในเวลาเดียวกัน เช่น พันธะทางเชิงกลและทางไฟฟ้า และกลไกของพันธะสามารถเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างขั้นตอนการผลิตที่หลากหลาย เช่น ในกรณีที่มีการนำสารคู่ควบ (coupling agent) มาใช้ในการปรับปรุงผิว

- 1) พันธะทางเชิงกล (mechanical bonding) คือ การเชื่อมต่อกันในทางเชิงกล (mechanical interlocking หรือ keying) ของสองพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ก) ลักษณะของพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสยิ่งมีความขรุขระมากขึ้น ยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยการหดรัดตัวของเมทริกซ์บนสารเสริมแรงยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลเกิดได้ง่ายขึ้น พันธะทางเชิงกลจะมีประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อระหว่างเฟส ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นความแข็งแรงของการได้รับแรงเฉือน แต่ถ้าได้รับแรงในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างเฟส หรือการที่รอยต่อได้รับแรงดึง ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีค่าต่ำ เว้นเสียแต่ว่า ณ บริเวณรอยต่อนั้นมีลักษณะของพื้นผิวรอยต่อคล้ายกับบริเวณ A ในรูปที่ 2.9(ก) จำนวนมาก ๆ ซึ่งมีมุมแบบวกกลับเข้าไปข้างใน (re-entrant angle)
- 2) พันธะที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต (electrostatic bonding) คือ พันธะไฟฟ้าสถิตเป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงที่มีพื้นผิวที่มีประจุแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข) จึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าขึ้น แรงกระทำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในระยะทางการจัดเรียงของอะตอมในช่วงสั้นๆ เท่านั้น การปนเปื้อน ณ บริเวณผิวและการที่มีก๊าซถูกดักไว้ที่ผิวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกลไกดังกล่าวลดลง
- 3) พันธะทางเคมี (chemical bonding) คือ พันธะทางเคมีเกิดขึ้นจากหมู่ทางเคมีของเมทริกซ์และสารเสริมแรงสามารถเข้ากันได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.9(ค) ความแข็งแรงของพันธะทางเคมี ขึ้นอยู่กับปริมาณหรือจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ และชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เมทริกซ์และสารเสริมแรงไม่มีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์และสารคู่ควบ เช่น สารไซเลน (silane) ซึ่งมีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้าได้กับเมทริกซ์และสารเสริมแรงอยู่ภายในโครงสร้างโมเลกุล มันจึงทำ หน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ง)

- 4) พันธะที่เกิดจากการแพร่เข้าหากัน (interdiffusion bonding) คือ พันธะนี้เกิดขึ้นจากการที่สายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบทั้งสองชนิดสามารถแพร่เข้าหากันและทำให้เกิดการพันกันขึ้นระหว่างเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.9(จ) ความแข็งแรงของพันธะนี้ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของการพันกัน ชนิดและจำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเกิดการพันได้



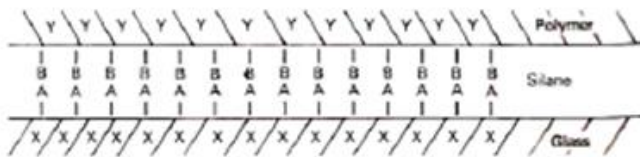
(ก)



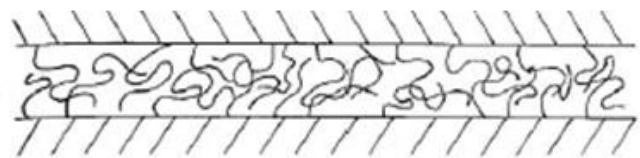
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.9 ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส [22]

(ก) mechanical bonding

(ข) electrostatic bonding

(ค) chemical bonding

(ง) chemical bonding as applied to a silane coupling agent

(จ) interdiffusion bonding

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Duan, Z. (2013) [23] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำในพลาสติกชีวภาพ จากงานวิจัยพบว่า ทั้งพอลิแลกติกแอซิดและพอลิবিทิลีนซัคซิเนตสามารถปรับปรุงสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ด้วยการเติมนาโนเคลย์ โดยค่า WVTR ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้น แต่ค่า WVTR ของพอลิবিทิลีนซัคซิเนตมีการลดลง เนื่องจากการเติมนาโนเคลย์และมีค่าน้อยกว่าพอลิแลกติกแอซิด ทั้งนี้เป็นเพราะพอลิবিทิลีนซัคซิเนตมีความเป็นผลึกสูงจึงมีผลทำให้นาโนเคลย์กระจายตัวได้ไม่เท่ากับกรณีการเติมนาโนเคลย์ลงในพอลิแลกติกแอซิด นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของปริมาณผลึกพอลิแลกติกแอซิดที่มีต่อการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำพบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tsuji และคณะ คือ ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น

Dukalska, L. และคณะ (2013) [24] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่มีต่ออายุการเก็บรักษาอาหาร และคุณภาพของอาหารหลากหลายชนิด โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่ผ่านการดัดยัด 2 ทิศทาง (BOPP) ซึ่งเป็นฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในทางการค้า จากงานวิจัยพบว่า พลาสติกที่ย่อยสลายได้มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีนที่ผ่านการดัดยัด 2 ทิศทาง โดยฟิล์มพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเคลือบสารป้องกันการซึมผ่าน (Ceramis®-PLA-SiOx) และฟิล์มที่ทำมาจากเซลลูโลสดัดแปรสามารถรักษาคุณภาพแอปเปิ้ลในน้ำสลัดและแครอทหั่นฝอยได้ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่ผ่านการดัดยัด 2 ทิศทางโดยการประเมินจากสัดส่วนของออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหายใจของผักผลไม้สด กรณีการบรรจุน้ำสลัดกับเนื้อในมายองเนสที่ทำการบรรจุในระบบสุญญากาศ และต้องมีการรักษาสภาพโดยการให้ความร้อน พบว่า ฟิล์ม พอลิแลกติกแอซิด และพอลิไฮดรอกซีবিทีเรด (poly-3-hydroxybutyrate, PHB) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม เนื่องจากช่วยยืดอายุการเก็บรักษา

Karkhanis, S.S. และคณะ (2018) [25] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมผลึกนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanocrystal) ลงในพอลิแลกติกแอซิดที่มีต่อสมบัติความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจน โดยทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าอัดรีดเป็นฟิล์ม จากงานวิจัย พบว่า ฟิล์มพอลิแลกติกแอซิดที่เติมผลึกนาโนเซลลูโลสมีค่าความสามารถในการซึมของไอน้ำและความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนลดต่ำลง 40% และ 75% เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิดตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะผลของเส้นทางที่มีความคดเคี้ยวเพิ่มมากขึ้นที่ถูกสร้างขึ้นจากการมีอยู่ของผลึกนาโนเซลลูโลสไปขัดขวางการแพร่ของไอน้ำและแก๊สออกซิเจน และการเติมผลึกนาโนเซลลูโลสมีผลทำให้ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Chi, H. และคณะ (2018) [26] ได้ทำการศึกษาผลของให้ความดัน (0, 200 และ 400 MPa) ในระหว่างการขึ้นรูปฟิล์มจากสารละลายของการขึ้นรูปฟิล์มพอลิแลกติกแอซิดและอนุภาคนาโนของเงินที่มีต่อสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และโครงสร้างจุลภาค จากผลงานวิจัยพบว่า การเพิ่มความดันในระหว่างการขึ้นรูปฟิล์มมีผลทำให้ฟิล์มมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะความดันที่

สูงช่วยเสริมการสร้างโครงสร้างร่างแหระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและอนุภาคนาโนของเงินให้มีการอัดตัวรวมกันได้แน่นมากขึ้น นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติด้วยการให้ความดันสูงยังมีส่วนช่วยลดการแพร่ของอนุภาคเงินออกจากฟิล์ม

Rodriguez-Urbe, A. และคณะ (2021) [27] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมทัลค์ที่มีต่อสมบัติทางกลและการซึมผ่านของไอน้ำและการซึมผ่านของออกซิเจนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จากงานวิจัยพบว่าการเติมทัลค์ 20 %โดยน้ำหนักลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีผลในการปรับปรุงค่ามอดุลัสแรงดึงและแรงดัดค่าความต้านทานแรงดัด และค่าความต้านทานแรงกระแทก และยังมีผลในการปรับปรุงสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน โดยทำให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำและการซึมผ่านของออกซิเจนมีค่าลดลงประมาณ 60 %เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี สำหรับในรายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนของการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งการศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ โดยทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิবিทิลีนซัคซิเนตด้วยการเติมนาโนเคลย์ ตั้งแต่ 0 ถึง 15 %โดยน้ำหนัก

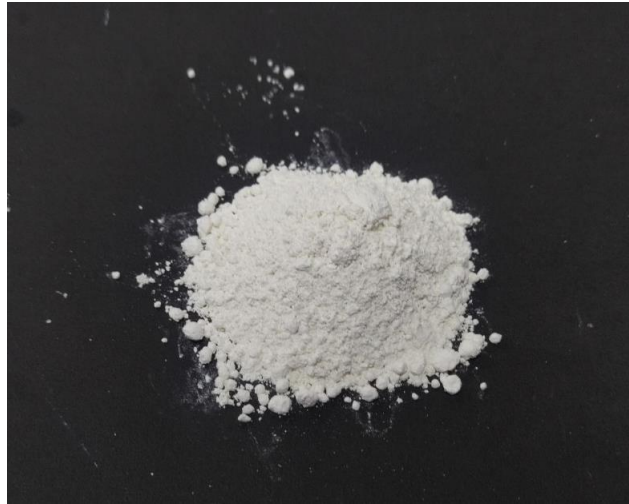
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีหลักที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิবিทิลีนซัคซิเนต ชื่อทางการค้า BioPBS เกรด FD92PM ของบริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคมี จำกัด มีลักษณะเป็นเม็ด ดังรูปที่ 3.1

3.1.2 นาโนเคลย์ ชื่อทางการค้า Nanomer เกรด I.31PS ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด เป็นมอนทอมอริลโลไนท์เคลย์ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย octadecylamine 15-35 %โดยน้ำหนัก และ aminopropyltriethoxysilane 0.5-5 %โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ดังรูปที่ 3.2

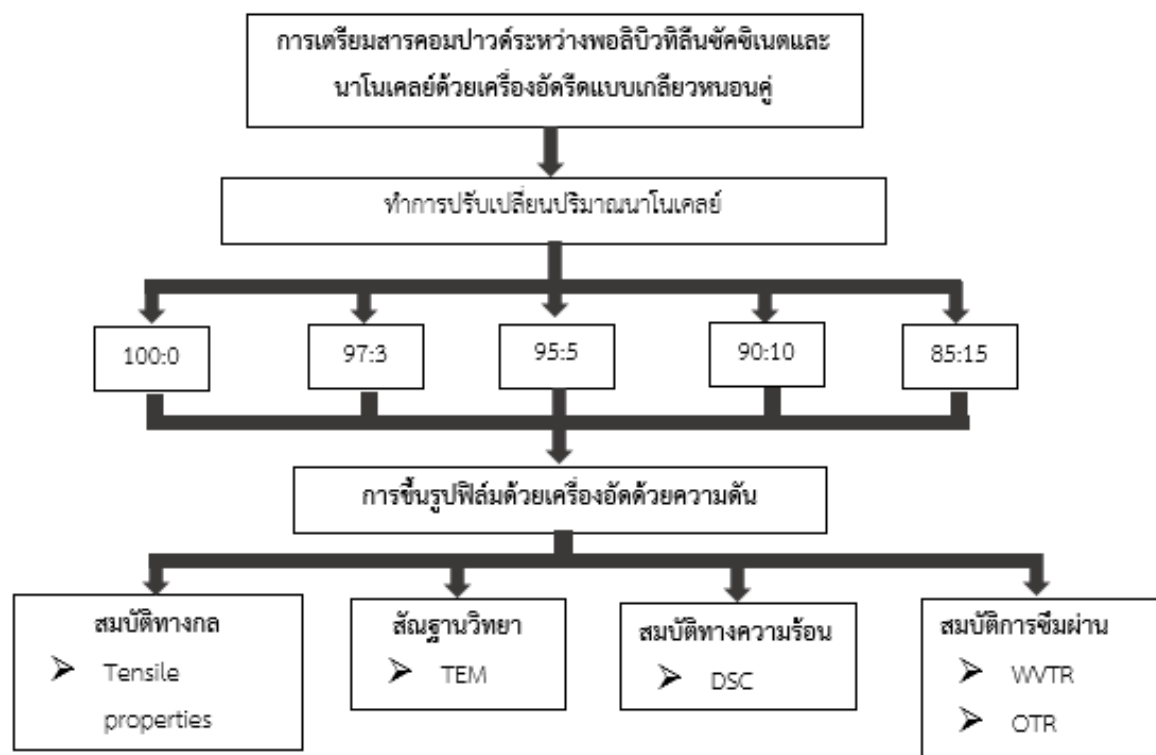


รูปที่ 3.1 เม็ดพอลิবিทิลีนซัคซิเนต BioPBS เกรด FD92PM ของบริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคมี จำกัด



รูปที่ 3.2 ลักษณะผงนาโนเคลย์ ชื่อทางการค้า Nanomer เกรด I.31PS ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.3 แผนการดำเนินงานการศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ

สำหรับแผนการดำเนินการวิจัยสำหรับโครงการวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ มีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3.3 โดยเริ่มต้นจากการเตรียมสารคอมปาวด์ระหว่างพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดความดัน และทำการประเมินผลของการเติมนาโนเคลย์ด้วยการทดสอบสมบัติทางกล สันฐานวิทยา สมบัติการซึมผ่าน และสมบัติทางความร้อน

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 วิธีการดำเนินการศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมสารคอมปาวด์
2. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
3. ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารคอมปาวด์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์มาทำการอบเพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
2. นำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาทำการผสมกันด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง เป็นเวลา 1 นาที โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณนาโนเคลย์ที่ 0, 3, 5, 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก
3. นำของผสมจากข้อที่ 2 มาทำการเตรียมสารคอมปาวด์ โดยการนำของผสมมาผ่านกระบวนการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แบบหมุนไปทางเดียวกัน ยี่ห้อ Xinda รุ่น SHJ-20 จากบริษัท Enmach จำกัด ดังรูปที่ 3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจากตำแหน่งป้อนเม็ดถึงหัวขึ้นรูป คือ 80, 120, 140, 150, 150 และ 160 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบสกรู 200 รอบ/นาที ชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีด (Extrudate) ถูกทำให้เย็นตัวด้วยระบบรางน้ำหล่อเย็น และทำการตัดเป็นเม็ดสารคอมปาวด์
4. นำเม็ดคอมปาวด์มาทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่ออบไล่ความชื้น



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แบบหมุนไปทางเดียวกัน ยี่ห้อ Xinda รุ่น SHJ-20 จากบริษัท Enmach จำกัด

3.3.1.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำเม็ดของสารคอมปาวด์ที่ได้จากหัวข้อ 3.3.1.1 มาทำการอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
2. จากนั้นนำเม็ดของสารคอมปาวด์มาทำการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC-601T ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาด $14 \times 14 \times 0.03 \text{ cm}^3$ สำหรับสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูป มีรายละเอียดเป็นดังนี้
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ 180 องศาเซลเซียส
 - ขั้นตอนการอุ่นให้ความร้อน (preheat) ใส่สารคอมปาวด์ในแม่พิมพ์ทำการอุ่นให้ความร้อน แก่เม็ดคอมปาวด์จนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งไว้ จากนั้นทำการอุ่นเม็ดคอมปาวด์ เป็นเวลา 5 นาที
 - ขั้นตอนการอัดด้วยความดัน (compress) ทำการปิดแม่พิมพ์ ด้วยความดัน 2000 psi เป็นเวลา 5 นาที
 - ขั้นตอนการหล่อเย็น (cooling) ทำการหล่อเย็นชิ้นงานเป็นเวลา 3 นาที ด้วยน้ำหล่อเย็น หลังจากนั้นทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

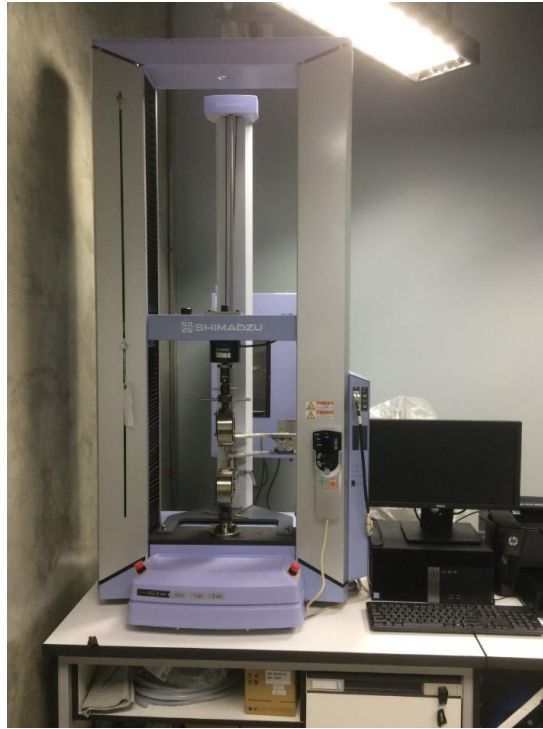


รูปที่ 3.5 เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T

3.3.1.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดันมาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus ของบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.6 ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D882 ชิ้นงานทดสอบมีขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตร ความยาว 140 มิลลิเมตร และความหนา 0.300 มิลลิเมตร มีระยะห่างของหัวจับชิ้นงาน 100 มิลลิเมตร สภาพะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่หัวจับชิ้นงาน 100 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break)



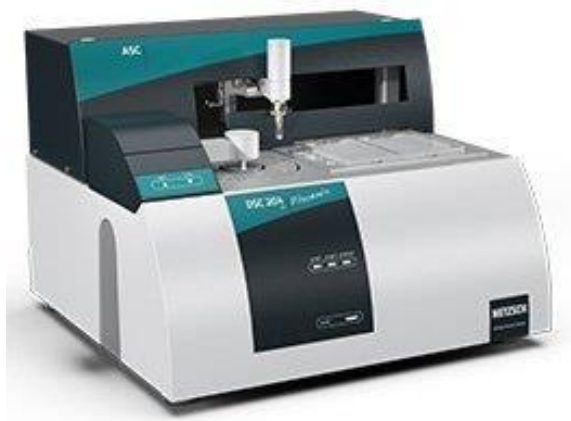
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus

- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimetry, DSC)

การหาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (%Crystallinity, $\%X$) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ทำการประเมินด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3.7 ทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percentage crystallinity, X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$X_{c\text{PBS}} = \frac{\Delta H_{m\text{PBS}}}{\Delta H_{m^0, \text{PBS}} \times W_{\text{PBS}}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ $H_{m\text{PBS}}$ คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว (Melting enthalpy) ของชิ้นงานทดสอบ
 $H_{m^0, \text{PBS}}$ คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว สำหรับกรณีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 110.3 J/g [28-29]
 W_{PBS} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 3.7 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH [30]

- การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapour Transmission Rate, WVTR)

การหาค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM F1249-20 ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ ยี่ห้อ Mocon รุ่น Permatran-W 3/34 G ของบริษัท Mocon ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 10×10 เซนติเมตร² และมีความหนา 0.300 มิลลิเมตร สภาพที่ใช้ในการทดสอบ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ที่อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ ยี่ห้อ Mocon รุ่น Permatran-W 3/34 G ของบริษัท Mocon [31]

- การทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate, OTR)

การหาค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1434-82 Procedure M ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านก๊าซบนแผ่นฟิล์ม ยี่ห้อ Brugger รุ่น GDP-C ของบริษัท Brugger Feinmechanik GmbH ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3.9 ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 10×10 เซนติเมตร² และมีความหนา 0.300 มิลลิเมตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านก๊าซบนแผ่นฟิล์ม ยี่ห้อ Brugger รุ่น GDP-C ของบริษัท Brugger Feinmechanik GmbH [32]

- การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา

สำหรับการตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเคลย์ในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope, TEM) โดยทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิไบทีลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์มาทำการตัดเป็นแผ่นฟิล์มบางที่มีความหนา 85 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไมโครโทม (Ultramicrotome) ยี่ห้อ Leica รุ่น Ultracut UCT ดังรูปที่ 3.10 ที่อุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียส ตัดชิ้นงานด้วยมีดเพชร หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มาทำการตรวจสอบการกระจายตัวของนาโนเคลย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน ยี่ห้อ Jeol รุ่น JEM-2010 ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.11 ที่ความต่างศักย์ 200 kv



รูปที่ 3.10 เครื่องอัลตราไมโครโทม ยี่ห้อ Leica รุ่น Ultracut UCT



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน ยี่ห้อ Jeol รุ่น JEM-2010

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของเม็ดสารคอมปาวด์วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณ 0 3 5 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก จากรูปพบว่า สีของเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีลักษณะเป็นสีขาวโปร่งแสง ส่วนกรณีเม็ดสารคอมปาวด์ของวัสดุเชิงประกอบมีลักษณะเป็นสีขาวอมเหลืองและทึบแสงมากกว่ากรณีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต สีของเม็ดสารคอมปาวด์ของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มสีอมเหลืองเข้มมากขึ้นเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มมากขึ้น



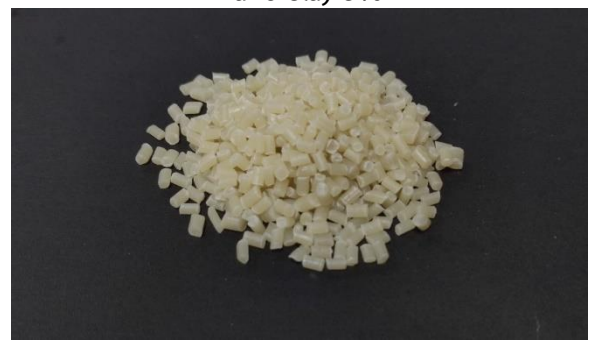
PBS 100 %



Nano clay 3%



Nano clay 5%

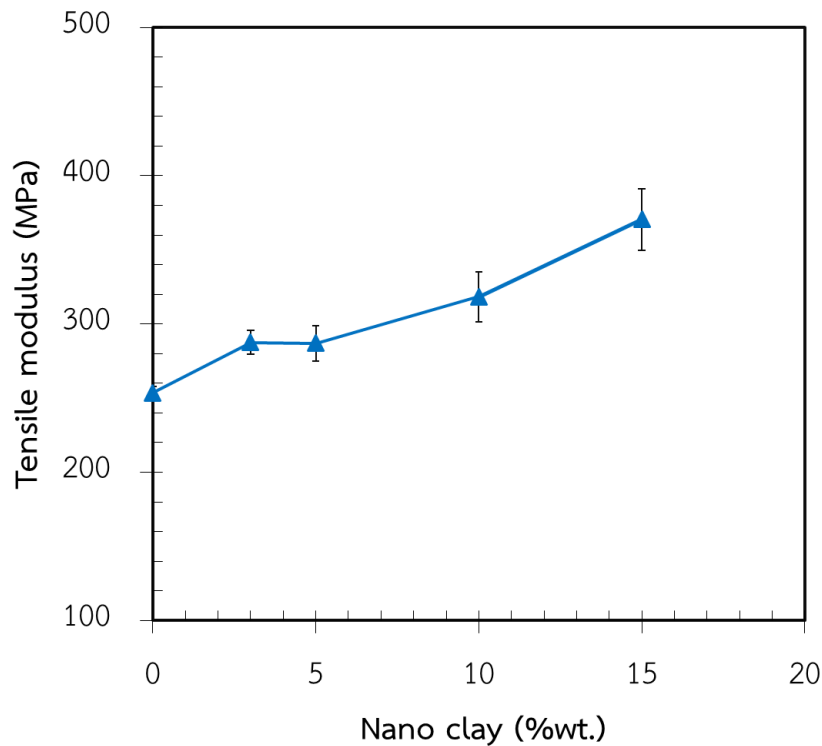


Nano clay 10%



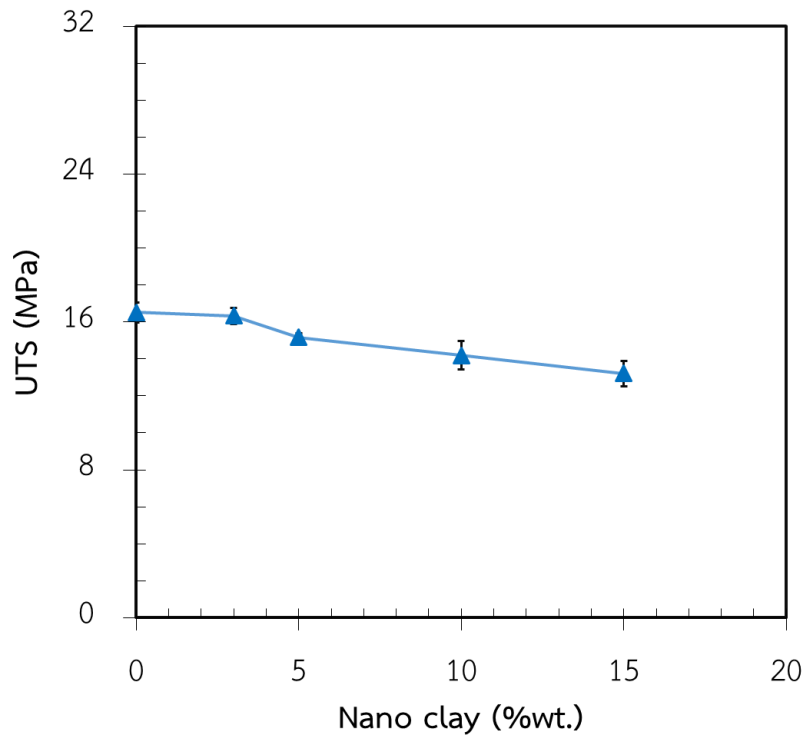
Nano clay 15%

รูปที่ 4.1 ลักษณะเม็ดสารคอมปาวด์วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน



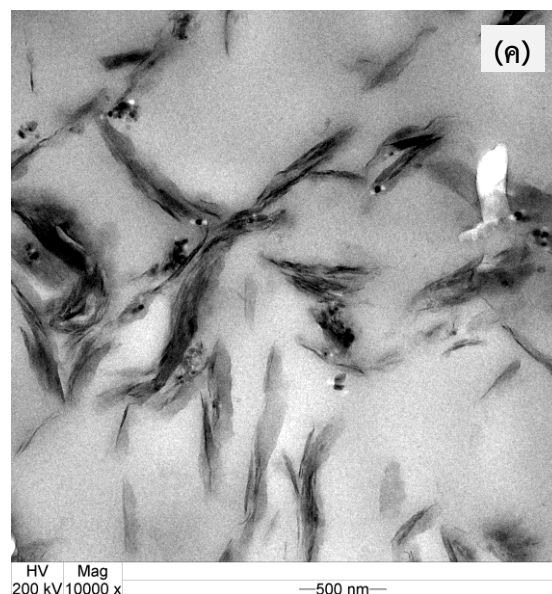
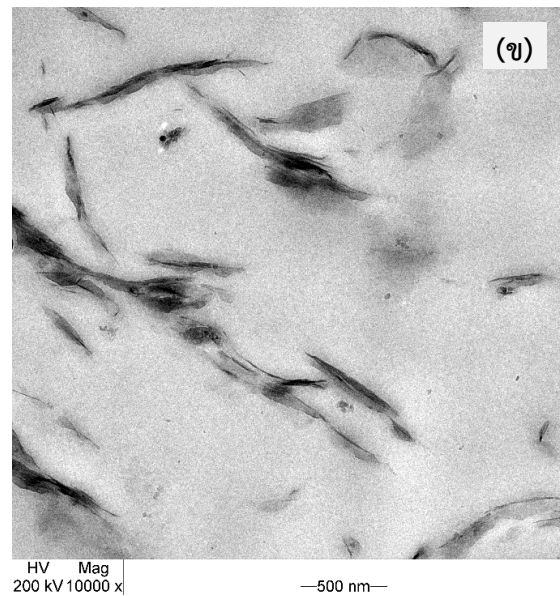
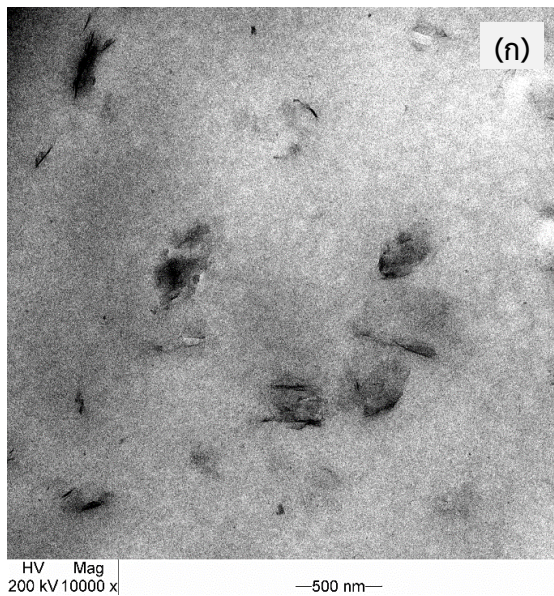
รูปที่ 4.2 ผลของการเติมนาโนเคลย์ที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอพ็อกซีเรซินและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 4.2 แสดงผลของการเติมนาโนเคลย์ ปริมาณตั้งแต่ 0 - 15 %โดยน้ำหนัก ที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอพ็อกซีเรซินและนาโนเคลย์ จากผลการทดลองพบว่า ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเคลย์ โดยกรณีการเติมนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 146 % เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอพ็อกซีเรซิน ทั้งนี้เป็นเพราะนาโนเคลย์ซึ่งเป็นเคลย์มอนท์มอริลโลไนท์ที่มีความคงรูปสูงกว่าพอลิเอพ็อกซีเรซิน จากงานวิจัยของ Bathija และคณะ พบว่า มอนท์มอริลโลไนท์มีค่ามอดุลัสอยู่ที่ประมาณ 7.26 GPa [33]



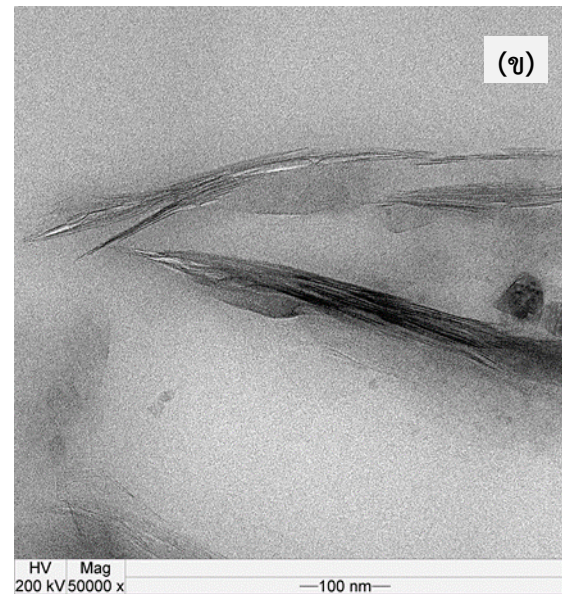
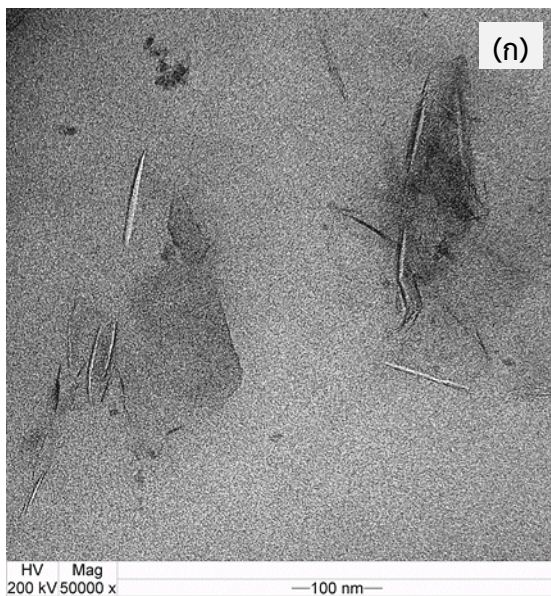
รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 4.3 แสดงผลของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่เป็นผลมาจากปริมาณนาโนเคลย์ จากผลการทดลอง พบว่า การเติมนาโนเคลย์มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง โดยพบว่า กรณีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณน้อยๆ (3 %โดยน้ำหนัก) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่อเติมนาโนเคลย์ 5 %โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มการลดลงไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากนาโนเคลย์มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากทำให้เกิดการกระจายตัวได้ยาก เพราะอนุภาคยังเล็กยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก จึงมีโอกาที่จะเกิดการรวมตัวกันได้มากขึ้น จากรูปที่ 4.4 เป็นภาพสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน จากรูปพบว่า กรณีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณ 5 %โดยน้ำหนัก นาโนเคลย์มีการกระจายตัวได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) แต่เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้นาโนเคลย์กระจายได้ยากมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) ซึ่งเป็นภาพแสดงการกระจายตัวของนาโนเคลย์ของกรณีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนัก อนุภาคนาโนเคลย์มีการรวมกลุ่มกันมากขึ้น



รูปที่ 4.4 ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซักซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ทรานสมิสชัน ณ กำลังขยาย 10,000 เท่า

- (ก) วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีปริมาณนาโนเคลย์ 5 %โดยน้ำหนัก
- (ข) วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีปริมาณนาโนเคลย์ 10 %โดยน้ำหนัก
- (ค) วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีปริมาณนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก

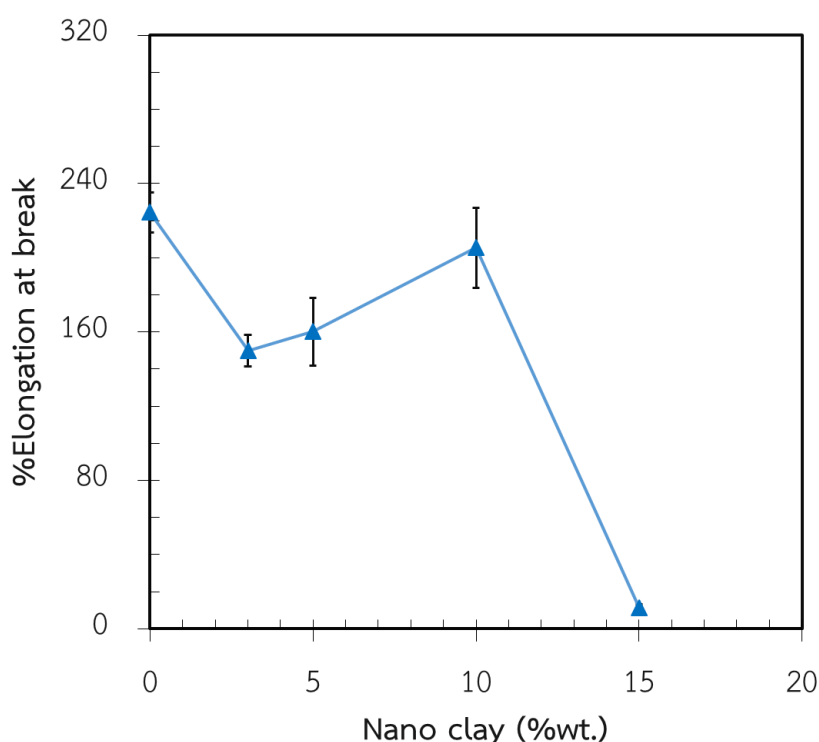


รูปที่ 4.5 ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ทรานสมิสชัน ณ กำลังขยาย 50,000 เท่า

- (ก) วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณนาโนเคลย์ 5 %โดยน้ำหนัก
- (ข) วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณนาโนเคลย์ 10 %โดยน้ำหนัก
- (ค) วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.5 เป็นภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ทรานสมิสชัน ณ กำลังขยาย 50,000 เท่า จากรูปแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ กรณีการเติมนาโนเคลย์ 5 %โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.5(ก) พบว่า นาโน

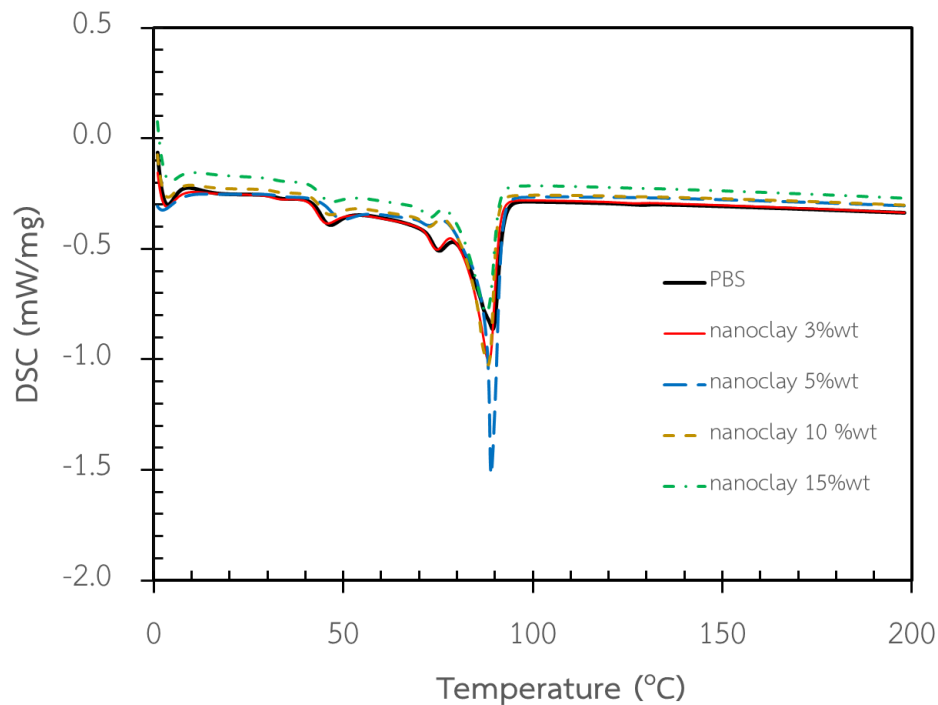
เคลย์บางส่วนเกิดการกระจายตัวแบบ Exfoliation (นาโนเคลย์เกิดการแยกออกของชั้นนาโนที่รวมตัวกันอยู่) บางส่วนเกิดการกระจายตัวแบบ Intercalation (พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นเคลย์ที่รวมตัวกัน) กรณีปริมาณนาโนเคลย์ 10 %โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.5(ข) พบว่า นาโนเคลย์บางส่วนเกิดการกระจายตัวแบบ Intercalation และแบบ Tactoid (ชั้นของนาโนเคลย์ยังคงเกาะกลุ่มรวมกันพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่สามารถแทรกเข้าระหว่างชั้นนาโนเคลย์) ส่วนกรณีการเติมนาโนเคลย์ 15 % โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.5(ค) พบว่า ชั้นนาโนเคลย์ส่วนใหญ่ยังคงรวมกลุ่มกัน หรือการกระจายตัวแบบ Tactoid มีเพียงบางส่วนที่เกิดการกระจายตัวแบบ Intercalation จากผลกระจายตัวของนาโนเคลย์ที่มีแนวโน้มการเกิดกระจายตัวแบบ Exfoliation มีลดลงเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวนี้อาจเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบในรูปที่ 4.3 มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มสูงขึ้น



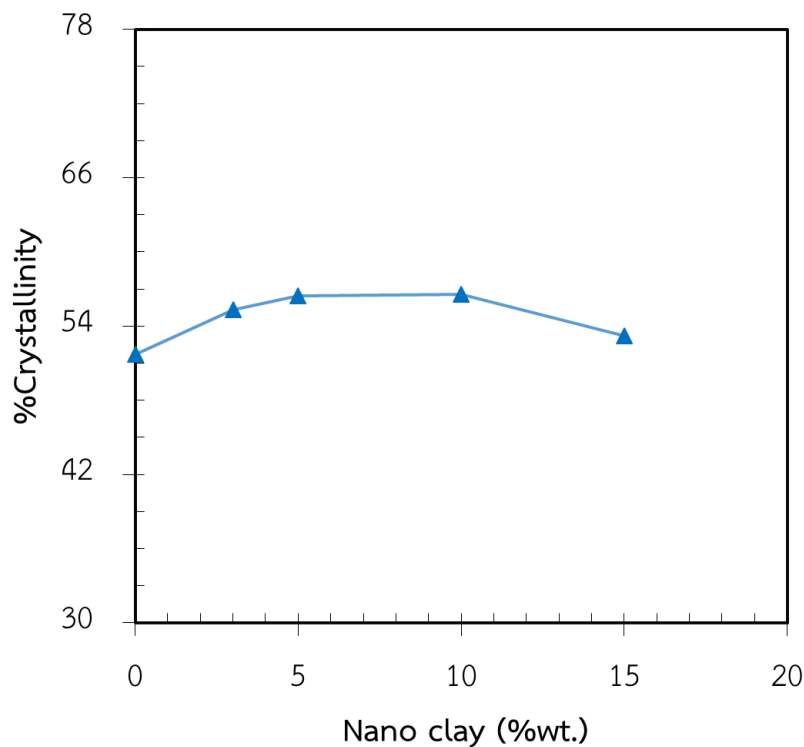
รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 4.6 แสดงผลของการเติมนาโนเคลย์ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและนาโนเคลย์ จากผลการทดลองพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าต่ำกว่ากรณีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีการเติมนาโนเคลย์ ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมนาโนเคลย์มีผลทำให้วัสดุมีความคงรูปมากขึ้น ดังแสดงผลในรูปที่ 4.2 จึงส่งผลให้การยืดตัวของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำเกิดได้ยากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลของปริมาณนาโนเคลย์ พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การ

ยึดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้นจาก 3 – 10 %โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมปริมาณนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงอย่างชัดเจนมาก ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ 3 5 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก มีค่าประมาณ 66.69 71.31 91.49 และ 5.13 % เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีการเติมนาโนเคลย์ ตามลำดับ

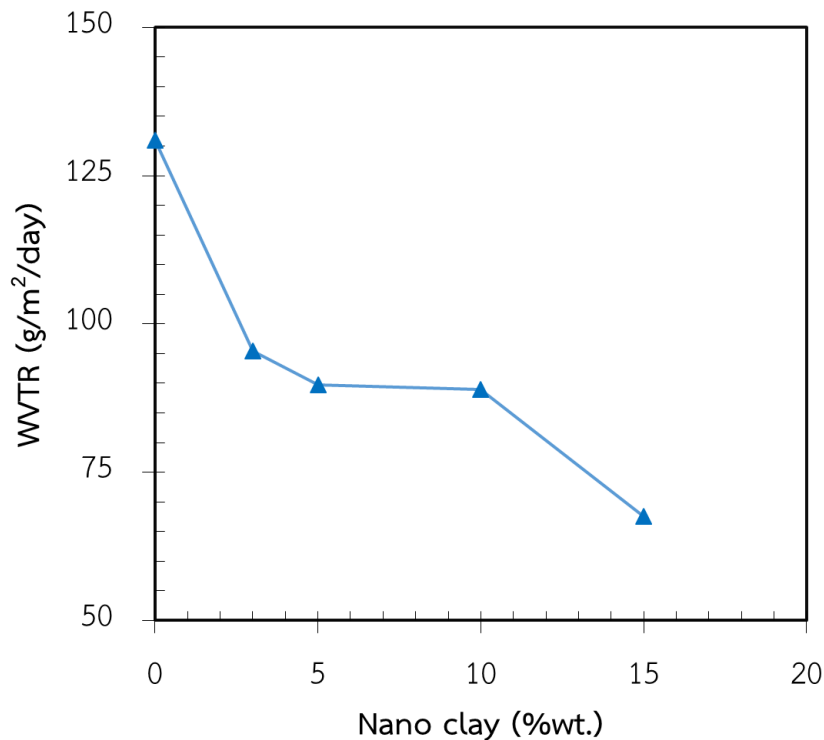


รูปที่ 4.7 กราฟเทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมเหลวพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



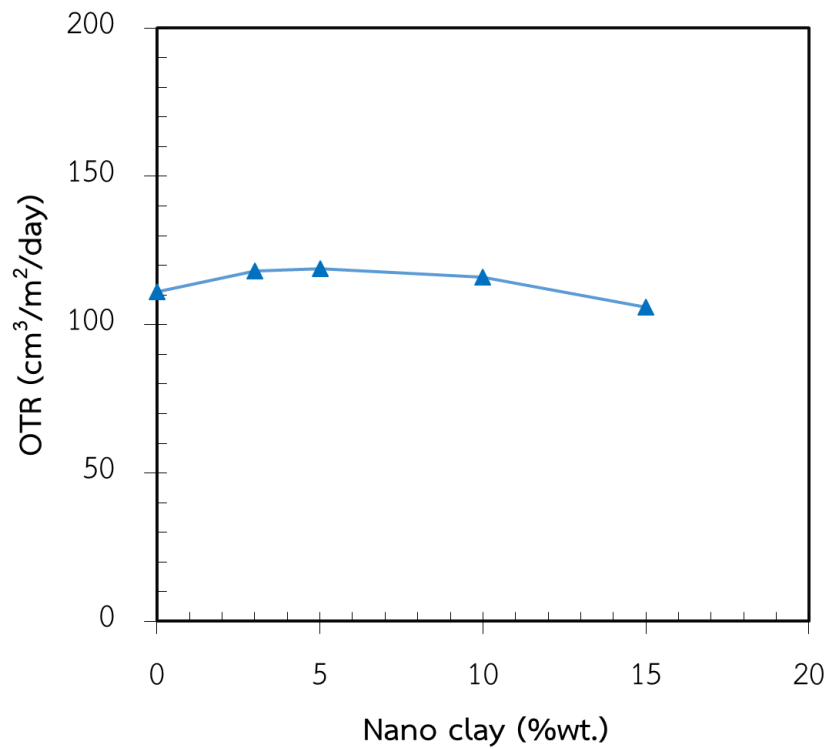
รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ผลึกของพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตในวัสดุเชิงประกอบพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟเทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จากรูปพบว่า พื้นที่ของพีคการหลอมเหลวของผลึกพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูง เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 5 %โดยน้ำหนัก และเริ่มมีแนวโน้มพื้นที่ของพีคการหลอมเหลวของผลึกพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตลดลงเมื่อปริมาณนาโนเคลย์มากกว่า 5 %โดยน้ำหนัก และจากรูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลึกของพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตในวัสดุเชิงประกอบพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จากรูปพบว่า ปริมาณผลึกของพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีการเติมนาโนเคลย์ 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกของพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตแสดงให้เห็นว่านาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ส่วนกรณีการเติมนาโนเคลย์ 10 %โดยน้ำหนัก ปริมาณผลึกของพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตมีค่าใกล้เคียงกับกรณีการเติมนาโนเคลย์ 5 %โดยน้ำหนัก และกรณีการเติมนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก ปริมาณผลึกของพอลิ بوتทรีนซัคซิเนตมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณนาโนเคลย์ที่มากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพในการกระจายตัวของนาโนเคลย์เกิดได้ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.9 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 4.9 แสดงค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน จากกราฟพบว่า ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มสูงขึ้น โดยกรณีการเติมนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าต่ำกว่ากรณีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ประมาณ 48.40 % ทั้งนี้เป็นเพราะนาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และการมีอยู่ของนาโนเคลย์ช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวของเส้นทางในการแพร่ของไอน้ำ



รูปที่ 4.10 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของวัสดุเชิงประกอบพอลิบูทีลีนซีคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 4.10 แสดงค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของวัสดุเชิงประกอบพอลิบูทีลีนซีคซิเนตที่มีการเติมนาโนเคลย์ปริมาณต่างๆ กัน จากกราฟพบว่า การเติมนาโนเคลย์มีผลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของวัสดุเชิงประกอบไม่มากนัก

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาหาสูตรบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวในสภาวะสุญญากาศด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อ โดยการศึกษาค้นคว้าของการเติมนาโนเคลย์ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ปริมาณ 0 – 15 %โดยน้ำหนัก และทำการประเมินผลด้วยการทดสอบแรงดึง การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน การทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สมบัติความต้านทานแรงดึง พบว่า การเพิ่มปริมาณนาโนเคลย์มีผลทำให้ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงไม่มากนัก ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า การเติมนาโนเคลย์มีผลทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง โดยพบการลดลงอย่างมากของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสำหรับกรณีการเติมนาโนเคลย์ 15 %โดยน้ำหนัก
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกระจายมีแนวโน้มลดลง โดยสามารถสังเกตพบ การกระจายตัวแบบ Tactoid สำหรับกรณีการเติมนาโนเคลย์ 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก
- สมบัติทางความร้อน พบว่า ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเคลย์ในช่วงเริ่มต้น แต่ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเริ่มมีค่าคงที่และลดลงเมื่อปริมาณนาโนเคลย์ 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก
- สมบัติการซึมผ่าน พบว่า การเติมนาโนเคลย์ช่วยปรับปรุงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำให้มีค่าลดลง เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มสูงขึ้น แต่การเติมนาโนเคลย์ไม่มีผลต่อค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

บรรณานุกรม

1. Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M. and Tsuji, H., 2010, **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**, John Wiley & Sons, Inc.
2. Jost, V., 2018, "Packaging Related Properties of Commercially Available Biopolymers- An Overview of the Status Quo", **Express Polymer Letters**, Vol. 12, pp. 429-435.
3. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554, "พอลิแลกติกแอซิด: พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้", **วิศวกรรมสารมก.**, ฉบับที่ 77, หน้า 99-110.
4. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ รายงานการศึกษาระดับสมบูรณ โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ
5. PTT MCC Biochem Co., Ltd., 2019, **Application: BioPBS-Flexible Packaging**. [Online] Available: www.pttmcc.com/new/content.php?mid=W130, July 5, 2019.
6. Hu, Y., Topolkaraev, V., Hiltner, A. and Bare, E., 2001, "Measurement of Water Vapor Transmission Rate in Highly Permeable Films", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 81, pp. 1624-1633.
7. Tsuji, H., Okino, R., Daimon, H. and Fujie, K., 2006, "Water Vapor Permeability of Poly(lactide)s: Effects of Molecular Characteristics and Crystallinity", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 99, pp. 2245-2252.
8. Thellen, C., Orrot, C., Froio, D., Ziegler, D., Lucciarini, J., Farrell, R., D'Souza, N.A. and Ratto, J.A., 2005, "Influence of Montmorillonite Layered Silicate on Plasticized Poly(L-lactide) Blown Films", **Polymer**, Vol. 46, pp. 11716-11727.
9. Zenkiewicz, M. and Richert, J., 2008, "Permeability of Polylactide Nanocomposite Films for Water Vapour, Oxygen and Carbon Dioxide", **Polymer Testing**, Vol. 27, pp.835-840.
10. กรมวิทยาศาสตร์บริการ.สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553, **พ ล า ส ต ก ย่ อ ย ส ล า ย ได้ ท า ง ชี ว ภ า พ** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR 12.pdf>.
11. ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล, 2553, "ไบโอซึกซินิก: ทางเลือกใหม่สำหรับเคมีภัณฑ์สีเขียว", **วารสาร MTEC**, ตุลาคม – ธันวาคม 2553, หน้า 54-58.
12. เบญจมาศ บัณยัต, 2554, "การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการลามไฟของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสำหรับใช้ทำกรอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์", **วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

13. Niaounakis, M., 2015, **Biopolymers: Processing and Products**, William Andrew, pp. 1-77.
14. Kutz, M., 2016, **Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications**, 2nd ed., William Andrew, pp. 127-143.
15. Rafiqah, S.A., Khalina, A., Harmaen, A.S., Tawakkal, I.A., Zaman, K., Asim, M., Nurrazi, M.N. and Lee, C.H., 2021, "Review on Properties and Application of Bio-based Poly(butylene succinate)", **Polymers**, Vol. 13, 1436
16. รายงานผลการสัมมนา เรื่อง **Plastic Packaging and the Shelf Life of Food** จัดโดย ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 26-27 พฤศจิกายน 2557 อาคารอมรภูมิรัตน์ สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
17. Duan, Z., 2013, "Water Vapour Permeability of Bio-based Polymers", **Doctoral Dissertation**, Loughborough University
18. Uddin, F., 2008, "Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals", **Metallurgical and Materials Transactions A**, Vol. 39A, pp. 2804-2814.
19. Calabi Floody, M., Theng, B.K.G., Reyes, P. and Mora, M.L., 2009, "Natural Nanoclays: Applications and Future Trends a Chilean Perspective", **Clay Minerals**, Vol. 44, pp. 161-176.
20. ผศ.ดร.กษมา จารุกุล และ ผศ.ดร.นิธินาถ ศุภกาญจน์, (2553), **ผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างโพลีโพรพิลีนและเส้นใยป่านครนารายณ์ (รายงานการวิจัย)**, สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
21. Jawaid, M., Qaiss, A.K. and Bouhfid, R., 2016, **Nanoclay Reinforced Polymer Composites**, pp. 1-28, Springer.
22. Mathews, F.L. and Rawlings, R.D., 1994, **Composite Materials: Engineering and Science**, Chapman & Hall, Oxford, pp. 29-64.
23. Duan, Z., 2013, "Water Vapour Permeability of Bio-based Polymers", **Doctoral Dissertation**, Loughborough University.
24. Dukalska, L., Ungure, E., Augspole, I., Muizniece-Brasava, S., Levkane, V. and Tatjana, R., 2013, "Evaluation of the Influence of Various Biodegradable Packaging Materials on the Quality and Shelf Life of Different Food Products", **Proceedings of the Latvia University of Agriculture**, Vol. 30, pp. 20-34.

25. Karkhanis, S.S., Stark, N.M., Sabo, R.C. and Matuana, L.M., 2018, “Water Vapor and Oxygen Barrier Properties of Extrusion-blown Poly(lactic acid)/Cellulose Nanocrystals Nanocomposite Films”, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 114, pp. 204-211.
26. Chi, H., Xue, J., Zhang, C., Chen, H., Li, L. and Qin, Y., 2018, “High Pressure Treatment for Improving Water Vapour Barrier Properties of Poly(lactic acid)/Ag Nanocomposite Films”, **Polymers**, Vol. 10, 1011.
27. Rodriguez-Urbe, A. Wang, T., Pal, A.K., Wu, F., Mohanty, A.K. and Misra, M., 2021, “Injection Moldable Hybrid Sustainable Composites of BioPBS And PHBV Reinforced with Talc and Starch as Potential Alternatives to Single-use Plastic Packaging”, **Composites Part C: Open Access**, Vol. 6, 100201.
28. Then, Y.Y., Ibrahim, N.A., Zainuddin, N., Chieng, B.W., Ariffin, H. and Wan Yunus, W.M.Z., 2015, “Effect of 3-Aminopropyltrimethoxysilane on Chemically Modified Oil Palm Mesocarp Fiber/Poly(butylene succinate) Biocomposite”, **Bioresources**, Vol. 10, pp. 3577-3601.
29. Hu, X., Su, T., Pan, W., Li, P. and Wang, Z., 2017, Difference in Solid-state Properties and Enzymatic Degradation of Three Kinds of Poly(butylene Succinate)/Cellulose Blends”, **RSC Advances**, Vol. 7, pp. 35496–35503.
30. NETZSCH, 2022, **DSC 204 F1 Phoenix®**. [Online] Available: www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/differential-scanning-calorimetry/dsc-204-f1-phoenix/, February 5, 2022.
31. Inspection Systems Pty, 2022, **PERMATRAN-W 3/34 WVTR Analyser**. [Online] Available: <https://inspectionssystems.com.au/product/permeation-instruments/wvtr-permeation-analysers/permatran-w-3-34-wvtr-analyser/>, February 5, 2022.
32. Syntech Innovation Co., Ltd., 2010, **Gas Permeability Tester/ เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซบนแผ่นฟิล์ม**. [Online] Available: www.bestsci.com/Material-Technology/Film-analysis/Gas-Permeability-Tester-GDP-C-Brugger.html, February 5, 2022.
33. Bathija, A.P., Prasad, M., Liang, H. and Upmanyu, M., 2008, “Elastic Properties of Clay Minerals”, **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, Vo. 27, pp. 1610-1614.

ประวัติย่อผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02 836 3000
E-mail : kantima.c@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ. (วัสดุศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ
การสลายตัวของพอลิเมอร์
พลาสติกชีวภาพ

6. ประสบการณ์งานวิจัย

International Journal

1. Chaochanchaikul, K. and Pongmuksuwan, P., 2022, "Influence of Ozonized Soybean Oil as a Biobased Plasticizer on the Toughness of Polylactic Acid", **Journal of Polymers and the Environment**, in Press.
2. Srinara, T., Lowrattanaounjit, N. and Chaochanchaikul, K., 2020, "Improvement of Mechanical Properties of Polylactic Acid/Oil Palm Fiber Composites by Alkali Treatment", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 901, pp. 73-78.
3. Chaochanchaikul, K., 2019, "Improvement of Mechanical Properties and Water Absorption in Wheat Gluten by Epoxidized Natural Rubber", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 891, pp. 163-168.
4. Hachana, N., Wongwanchai, T., Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2017, "Influence of Crosslinking Agent and Chain Extender on Properties of Gamma-Irradiated PLA", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 25, pp. 323-333.
5. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, "Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
6. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
7. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
8. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, "Photodegradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering", **Express Polymer Letters**, Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
9. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2012, "Influence of Lignin Content on Photodegradation in Wood/HDPE Composites under UV Weathering", **BioResources**, Vol. 7, No. 1, pp. 38-55.

10. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2011, "Structural and Thermal Stabilizations of PVC and Wood/PVC Composites by Metal Sterates and Organotin", **BioResources**, Vol. 6, No. 3, pp. 3115-3131.
11. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of Molecular Structures and Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO₂ Stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, No. 6, pp. 1354-1365.
12. Pattamasattayasonti, N., Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of UV-Weathering Aging and CeO₂ Based Coating Layer on Mechanical and Structural Changes in Wood/PVC Composites", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16.
13. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchuan, C., Rosarpitak, V., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of Cross-section Design and Loading Direction on Creep and Fatigue Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 42-49.
14. Sombatsompop, N., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K., Pulngern, T. and Rosarpitak, V., 2010, "Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
15. Chaochanchaikul, K., Kositchaiyong, A., and Sombatsompop, N., 2009, "Blending Techniques Affecting Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/LDPE and CaCO₃/LDPE Composites", **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 17, No. 5, pp. 281-290.
16. Sombatsompop, N., Taptim, K., Chaochanchaikul, K., Thongpin, C. and Rosarpitak, V., 2008, "Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite", **Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry**, Vol. 45, No. 7, pp. 534-541.
17. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical Characterization of E-Chopped Strand Glass Fiber Reinforced Wood/PVC Composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, No. 6, pp. 535-550.

18. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "On Adhesion Mechanisms and Interfacial Strength in ABS/Wood Sawdust Composites", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 27, No. 8, pp. 669-678.
19. Sombatsompop, N., Uawongsuwan, P. and Chaochanchaikul, K., 2007, "Effect of Molecular Structure on Extrudate Swell Behavior for Different Thermoplastic Melts in an Electro-magnetized Die", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 47, No. 3, pp. 270-280.
20. Prachayawarakorn, J., Kumsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2006, "Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.102, No. 1, pp. 598-606.
21. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2005, "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of PVC/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 96, No. 1, pp. 213-221.
22. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 53, No. 9, pp. 1210-1218.
23. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, "Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 52, No. 12, pp. 1847-1855.

วารสารวิชาการระดับชาติ

1. กัลลิตา เชาวน์ชาญชัยกุล และ อัมมา กระจำนัง, "การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน", **วารสารวิชาการปทุมวัน**, ปีที่ 11, ฉบับที่ 31, 2564.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.ฉันทิพ สกุลخمฤทัย
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Chuntip Sakulphaemaruehai

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก
อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 02 549 3484-5
E-mail : chuntip.s@en.rmutt.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วัสดุศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วท.ม. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Ph.D. (Environmental Technology) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยียาง
วัสดุพอลิเมอร์
วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์
สารเติมแต่งยางและพอลิเมอร์

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Sriloy, N., Wimolmala, E., Sombatsompop, N., Kumnuantip, C. and Thongpin, C., 2010, "Effects of Silica Based Fillers, Surface Treatment and Curing Method on Mechanical Properties of Silica/Unsaturated Polyester Composites", *Macromolecular Research*, Vol. 18, pp. 372-379.

2. Sombatsompop, N. and Kumnuantip, C., 2006, "Comparison of Physical and Mechanical Properties of NR/ Reclaimed Rubber Blends Vulcanized by Conventional Thermal or Microwave Irradiation Methods", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 100, pp. 5039-5048.
3. Kumnuantip, C. and Sombatsompop, N., 2003, "Dynamic Mechanical Properties and Swelling Behaviour of NR/Reclaimed Rubber Blends", **Materials Letters**, Vol. 57, pp. 3167-3174.
4. Kumnuantip, C. and Sombatsompop, N., 2003, "Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire-Tread Reclaimed Rubber/NR Compounds", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 87, pp. 1723-1731.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ดร.วรณูช ดีละมัน
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Woranuch Deelaman

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02-8363016 หรือ 081-0677254
E-mail : woranuch.d @rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยทักษิณ
วท.ม.(การจัดการสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ปร.ด. (การจัดการสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Environmental managemet
Sediment
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Apiratikul, R., Pongpiachan, S. and Deelaman, W., 2021, "Spatial Distribution, Sources and Quantitative Human Health Risk Assessments of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban and Suburban Soils of Chile", **Environmental Geochemistry and Health**.

2. Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Choochuay, C., Iadtem, N., Suttinun, O., Wang, Q.Y., Xing, L., Li, G.H., Han, Y.M., Hashmi, M.Z. and Cao, J.J., 2020, "Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Terrestrial Soils in Chile", **Journal of South American Earth Sciences**, Vol. 99, 102514.
3. Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Choochuay, C., Iadtem, N., Charoenkalunyuta, T. and Promdee, K., 2020, "Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Terrestrial Soils of King George Island, Antarctica", **Journal of South American Earth Sciences**, Vol. 104, 102832.
4. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Iadtem, N., Suttinun, O., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Hashmi, M.Z., Palakun, J., Poshyachinda, S., Aukkaravittayapun, S., Surapipith, V. and Cao, J., 2020, "Effects of Agricultural Waste Burning on pm_{2.5}-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-Soluble Ionic Species in the Ambient Air of Chiang-Mai, Thailand. **Polycyclic Aromatic Compound**, pp. 1–22.
5. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Suttinun, O., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Palakun, J., Poshyachinda, S., Aukkaravittayapun, S., Surapipith, V. and Cao, J., 2020, "Long-range Transboundary Atmospheric Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-soluble Ionic Species in Southern Thailand", **Aerosol and Air Quality Research**, Vol. 20, pp. 1591–1606.
6. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Deelamana, W., Wang, Q., Li, X., Li, G., Han, Y., Palakun, J., Cao, J., 2020, "Impacts of PM_{2.5} sources on Variations in Particulate Chemical Compounds in Ambient Air of Bangkok, Thailand", **Atmospheric Pollution Research**, Vol. 11, pp. 1657-1667.
7. Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Choochuay, C., Hattayanone, M., Deelaman, W., Iadtem, N., Bunsomboonsakul, S., Palakun, J., Poshyachinda, S., Leckngam, A., Somboonpon, P., Panyaphirawat, T., Aukkaravittayapun, S., Wang, Q.Y., Xing, L., Li, G.H. and Han, Y.M., 2019, "Vertical Profile of Organic and Elemental Carbon in Sediments of Songkhla Lake, Thailand", **Limnology**, Vol. 20, pp. 203–214.
8. Pongpiachan, S., Deelaman, W., Choochuay, C., Iadtem, N., Surapipith, V., Hashmi, M.Z., Latif, M., Sohail, M., Eqani, SAMAS., Charoenkalunyuta, T. and Promdee, K., 2019, "Data Relating to Spatial Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in

- Terrestrial Soils of Pakistan and King George Island, Antarctica”, **Journal Data in Brief**, Vol. 25, 104327.
9. Deelaman, W., Chaochanchaikul, K. and Tungsudjawong, K., 2018, “Effect of Banana Fibers on Mechanical and Physical Properties of Light Weight Concrete Blocks”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 879, pp. 151–155.
 10. Deelaman, W., Lakthandee, M., Inchan, W., Srilarat, P. and Panthong, N., 2017, “Development Plant Pots from Carbon Powder and Oil Palm Fiber”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 176–179.
 11. Deelaman, W., Lakthandee, M., Inchan, W., Srilarat, P. and Panthong, N., 2017, “Development Plant Pots from Carbon Powder and Oil Palm Fiber”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 176–179.
 12. Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Muprasit, J., Feldens, P. and Schwarzer, K., 2013, “Risk Assessment of the Presence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coastal Areas of Thailand Affected by the 2004 tsunami”, **Marine Pollution Bulletin** , Vol. 76, pp. 370-378.
 13. Tipmanee, D., Deelaman,W., Pongpiachan, S., Schwarzer, K. and Sompongchaiyakul, P., 2012, “Using Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) as a Chemical Proxy to Indicate Tsunami 2004 Backwash in Khao Lak Coastal Area”, **Thailand. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, Vol. 12, pp. 1441–1451.