

โดย

สังกัด คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน มีนาคม พ.ศ. 2568

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มเนื้อที่เป็นวัสดุที่ยั่งยืนชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน ที่มีต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน ค่าการดูดซับน้ำ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด พิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อชนิดและ ปริมาณต่าง ๆ กันถูกเตรียมด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป และมีการเติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเนื้อที่ถูกเลือกใช้ คือ นาโนเคลย์ เส้นใยป่านครนารายณ์ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีการ เปลี่ยนปริมาณ 0 - 15 % โดยน้ำหนัก จากผลการวิจัย พบว่า พิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเติม คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก มีสมบัติการรับแรงดึงสูงที่สุด จากการวิเคราะห์ ทางสัณฐานวิทยา พบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ แต่นาโนเคลย์และ เส้นใยป่านครนารายณ์กระจายตัวได้ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น สมบัติความทนต่อน้ำ พบว่า นาโนเคลย์ สามารถทำให้ค่าการดูดซับน้ำของพิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 43 % ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลดลงได้มากที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยป่านครนารายณ์ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเติม คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในขณะที่การเติมนาโนเคลย์และเส้นใยป่านครนารายณ์มีแนวโน้มทำให้ ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ: เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ/วัสดุที่ยั่งยืน/สมบัติทางกล/ความทนต่อน้ำ/บรรจุภัณฑ์อาหาร

Abstract

This research work was to study the effects of adding various types and contents of sustainable fillers on the mechanical properties, thermal properties, water absorption, and morphology of thermoplastic starch (TPS) from corn starch. Thermoplastic starch films with different types and contents of fillers were prepared using the casting method, with glycerol added as a plasticizer. The fillers used include nanoclay, sisal fibers, and carboxymethyl cellulose (CMC), varying from 0 – 15 wt%. The results revealed that TPS films containing 10 wt% CMC exhibited the highest tensile strength. Morphological analysis revealed that CMC demonstrated good compatibility with TPS, whereas the dispersion of nanoclay and sisal fibers decreased as their content increased. Regarding water resistance, nanoclay significantly reduced the water absorption of TPS films at 43% relative humidity and 24 hours, followed by sisal fibers and CMC, respectively. The glass transition temperature (T_g) of TPS tended to increase with the addition of CMC, whereas the addition of nanoclay and sisal fibers led to a decrease in the T_g of TPS.

Keywords: Thermoplastic starch / sustainable material / mechanical properties / water resistance / food packaging



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 คณะวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณสาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

คณะวิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาบิล	4
2.2 สารเพิ่มเนื้อ	10
2.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	20
3. วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 วัสดุดิบและสารเคมีหลักที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	24
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	25
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	29
4.1 ผลของสมบัติทางกล	29
4.2 ผลของสมบัติความทนต่อน้ำ	31
4.3 ผลของสมบัติทางสัณฐานวิทยา	32
4.4 ผลของสมบัติทางความร้อน	35
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	36
เอกสารอ้างอิง	37

สารบัญ (ต่อ)

ประวัติย่อผู้วิจัย

หน้า

39



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะสายโซ่โมเลกุล และสูตรโครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส และอะไมโลแพคติน
2.2	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อได้รับความร้อน
2.3	กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส
2.4	สูตรทางเคมีและโครงสร้างทางเคมีของมอนท์มอริลโลไนท์ที่ถูกผลิตโดย Nanocor
2.5	โครงสร้างผลึกของนาโนเคลย์มอนท์มอริลโลไนท์
2.6	ลักษณะการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์
2.7	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส
2.8	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส
2.9	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน
2.10	โครงสร้างทางเคมีของเพคติน
2.11	กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis, TGA)
2.12	โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
3.1	สตาร์ชจากแป้งข้าวโพด จากบริษัท เฟรนด์ชิพ คอร์น สตาร์ช จำกัด
3.2	กลีเซอรอล เกรดวิเคราะห้ ของบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด
3.3	นาโนเคลย์ ชื่อทางการค้า Nanomer เกรด I.31PS ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด
3.4	เส้นใยป่านศรนารายณ์
3.5	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 250,000 และดีกรีการแทนที่ 0.7
3.6	แผนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาสูตรวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและวัสดุที่ยั่งยืนเพื่องานบรรจุภัณฑ์อาหาร
3.7	ขั้นตอนการกวนผสมสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด กลีเซอรอลและสารเพิ่มเนื้อด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก
3.8	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อ
3.9	เครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus
3.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ Field Emission Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-7610F

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH	28
4.1 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพด	29
4.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพด	30
4.3 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพด	31
4.4 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพด ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 43 % เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	32
4.5 ลักษณะชิ้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน	33
4.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดต่าง ๆ กัน	34
4.7 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดในชิ้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อ	35

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อแตกต่างกันระหว่างอะไมโลสและอะไมโลแพคติน	6
2.2	ปริมาณผลึก อะไมโลส และอะไมโลแพคตินของสตาร์ชที่มาจากพืชชนิดต่าง ๆ	7
2.3	กำลังการพองตัวและการละลายน้ำของแป้งแต่ละชนิด	7
2.4	อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน ความสามารถในการเกิดเจลและรีโทรเกรเดชัน	9
2.5	กลุ่มของเคลย์ที่มีในธรรมชาติ	11
2.6	แสดงผลของสมบัติความต้านทานแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์	18



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยถือเป็นประเทศที่เป็นแหล่งผลิตอาหารที่สำคัญของโลก นอกเหนือจากการพัฒนาคุณภาพและรสชาติของอาหารแล้ว บรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารถือว่าเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องได้รับการพัฒนาควบคู่กันไปด้วย ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ยังคงผลิตมาจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก จึงส่งผลทำให้เกิดปัญหาปริมาณขยะพลาสติกที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และต้องเสี่ยงประมาณจำนวนมากในการกำจัดขยะดังกล่าว นอกจากนี้ขยะพลาสติกซึ่งส่วนใหญ่แล้วเป็นขยะที่มาจากบรรจุภัณฑ์อาหารแบบใช้ครั้งเดียวยังได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้สัตว์ทะเลเสียชีวิต ขัดขวางทางระบายน้ำในชุมชนเมืองก่อให้เกิดน้ำท่วมขังเมื่อมีฝนตกหนัก ดังนั้นในโครงการวิจัยจึงมีเป้าหมายที่ต้องการพัฒนาสูตรของบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตมาจากเทอร์โมพลาสติกสตาρχ (Thermoplastic starch) เพราะแป้งสตาρχเป็นวัตถุดิบที่ได้มาจากพืช สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable) มีราคาที่ไม่แพง และไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ รวมถึงสิ่งมีชีวิต โดยในโครงการวิจัยได้เลือกใช้สตาρχจากแป้งข้าวโพดมาทำการศึกษาวิจัย เนื่องจากสตาρχจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณอะไมโลส (Amylose) สูง จึงทำให้มีสมบัติการดูดซับน้ำต่ำ มีราคาไม่แพง เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีในประเทศ สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ ไม่มีกลิ่นและไม่มีสี สามารถสัมผัสกับอาหารได้ [1] และต้องการปรับปรุงสมบัติด้านการรับแรงและความว่องไวต่อน้ำหรือความชื้นที่ค่อนข้างสูงของเทอร์โมพลาสติกสตาρχซึ่งถือว่าเป็นข้อด้อยในการนำเทอร์โมพลาสติกสตาρχมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การปรับปรุงข้อด้อยด้านสมบัติทางกลและความว่องไวต่อน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาρχสามารถทำได้โดยการนำสตาρχมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น การเลือกใช้สตาρχจากพืชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง และการเติมสารเพิ่มเนื้อ สำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกล และการดูดซับน้ำของสตาρχโดยการเติมสารเพิ่มเนื้อ เช่น การเติมนาโนเคลย์ (Nanoclay) เยื่อกระดาษ กลูเตนจากข้าวสาลี (Wheat gluten) และดินขาวผสมลงในสตาρχของข้าวโพด และสตาρχของมันสำปะหลังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงการรับแรง และลดการดูดซับน้ำ [2-5] ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาสูตรของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวโพดด้วยการเติมสารเพิ่มเนื้อจากวัสดุฐานชีวภาพ (Biobased material) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล และลดการดูดซับน้ำ โดยมีการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารเพิ่มเนื้อ และทำการประเมินเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมด้วยการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติความทนต่อน้ำ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

เพื่อนำไปสู่การหาสูตรวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและวัสดุฐานชีวภาพสูตรที่ดีที่สุดในการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแบบใช้ครั้งเดียว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อสมบัติทางกลและความทนต่อน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล
- 1.2.2 เพื่อส่งเสริมให้เกิดการนำวัสดุธรรมชาติที่มีในประเทศมาใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ได้จากการเกษตร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย สตาบิลจากแป้งข้าวโพด กลีเซอรอล (Glycerol) นาโนเคลย์ เส้นใยป่านครนารายณ์ (Sisal fiber) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)
- 1.3.2 วิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ การขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณและชนิดของสารเพิ่มเนื้อ
- 1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้
 - สมบัติการรับแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM
 - ค่าการดูดซับน้ำ
 - สมบัติทางความร้อน
 - สันฐานวิทยา

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน

- 1.4.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและสารเพิ่มเนื้อด้วยวิธีการหล่อ โดยมีการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อ และมีการเติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)
- 1.4.2 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติ เพื่อประเมินผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อสมบัติทางกล สมบัติความทนต่อน้ำ สมบัติทางความร้อน และทางกายภาพ โดยการทดสอบความทนต่อแรงดึง การวัดค่าดูดซับน้ำ สมบัติทางความร้อน และการตรวจสอบทางสันฐานวิทยาตามลำดับ
- 1.4.3 ทำการวิเคราะห์และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – เสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- 1.5.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – ส่งเสริมให้เกิดการใช้พลาสติกชีวภาพมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.5.3 ด้านวิชาการ – เผยแพร่องค์ความรู้เชิงวิชาการในรูปแบบบทความวิจัย ภายหลังเสร็จสิ้นโครงการวิจัย



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) [6]

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช หรือ สตาร์ชที่ผ่านการทำลายโครงสร้าง (De-structurised starch, DS) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งได้มาจากแป้งสตาร์ชจากธรรมชาติมาทำให้เกิดการบวมตัวด้วยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ เช่น น้ำ และกลีเซอรอล เมื่อนำสตาร์ชที่มีสารพลาสติกไซเซอร์มาผ่านการให้ความร้อนและแรงทางกลมีผลทำให้สตาร์ชละลายโครงสร้าง (De-structured starch) เม็ดแป้ง (Starch granule) ที่มีโครงสร้างกึ่งผลึกกลายเป็นวัสดุพอลิเมอร์อสัณฐานที่เป็นเนื้อเดียวกัน การทำให้เม็ดแป้งหลอมเหลวจนกระทั่งไม่มีความเป็นผลึกหลงเหลืออยู่สามารถทำได้โดยการเติมน้ำลงไปในแป้งปริมาณต่ำ (10 - 30%) พร้อมกับการให้ความร้อนและแรงทางกลร่วมกับการเติมสารพลาสติกไซเซอร์มีผลทำให้เม็ดแป้งละลายโครงสร้าง และเกิดการหลอมตัวแบบเทอร์โมพลาสติก จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติก เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ กระบวนการอัดรีด และเป่าขึ้นรูป กระบวนการอัดด้วยความดัน และกระบวนการอัดรีด สำหรับข้อด้อยหลักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช คือ การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัวของสตาร์ช เนื่องจากเมื่อแป้งเกิดการเย็นตัวแล้วทำให้โมเลกุลของแป้งกลับมาเชื่อมโยงกันเองใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นผลึก และขับน้ำออกจากโมเลกุล และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีสมบัติทางกลที่ไม่ค่อยดี มีสมบัติเปราะเนื่องจากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูง ดังนั้นสารพลาสติกไซเซอร์จึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โมเลกุลของสารพลาสติกไซเซอร์สามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งและทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้งและทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของแป้งเพิ่มมากขึ้น

2.1.1 แป้งสตาร์ช

แป้งถูกพบสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น หัว ราก ลำต้น และผล ส่วนแป้งฟลาวร์ คือ แป้งที่มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ผสมอยู่ เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ แต่เมื่อนำแป้งฟลาวร์ (Flour) มาผ่านการสกัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจนได้แป้งที่มีความบริสุทธิ์ เรียกว่า แป้งสตาร์ชซึ่งมีความบริสุทธิ์ถึง 98 - 99.5 % โดยปกติแป้งสตาร์ชจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่ได้จากพืชมากมายหลากหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวเจ้า มันสำปะหลัง ข้าวเหนียว และมันฝรั่ง เป็นต้น แป้งในธรรมชาติมีคุณลักษณะ ขนาด และรูปร่างของเม็ดแป้งที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง

ประเภทของแป้งอ้างอิงตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสน้อย ได้แก่ แป้งที่ผลิตจากพืชหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งที่ผลิตจากราก เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันเทศ แป้งเท้ายายม่อม และแป้งที่ผลิตจากลำต้น เช่น แป้งสาकु

2. แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสมาก ได้แก่ แป้งที่ผลิตจากธัญพืชทั่วไป เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวฟ่าง และแป้งข้าวเจ้า
3. แป้งที่ไม่มีอะไมโลสหรือมีอะไมโลเพกทินเกือบ 100% ได้แก่ แป้งข้าวโพดเหนียว แป้งข้าวฟ่างเหนียว และแป้งข้าวเหนียว

แป้งสตาρχมีองค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วย อะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ($C_6H_{10}O_5$) สตาρχจัดเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมโยงกันระหว่างหน่วยของน้ำตาลกลูโคสด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycoside bond) ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงกันบริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของน้ำตาลกลูโคสหน่วยหนึ่งกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของน้ำตาลกลูโคสหน่วยถัดไป พอลิแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในสตาρχ คือ อะไมโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพกทินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่ง สตาρχเมื่อถูกนำมาผสมกับน้ำ และให้ความร้อนและแรงเฉือนจะทำให้สตาρχเกิดการหลอมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า เทอร์โมพลาสติคสตาρχมีลักษณะคล้ายเทอร์โมพลาสติคและสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีของเทอร์โมพลาสติค

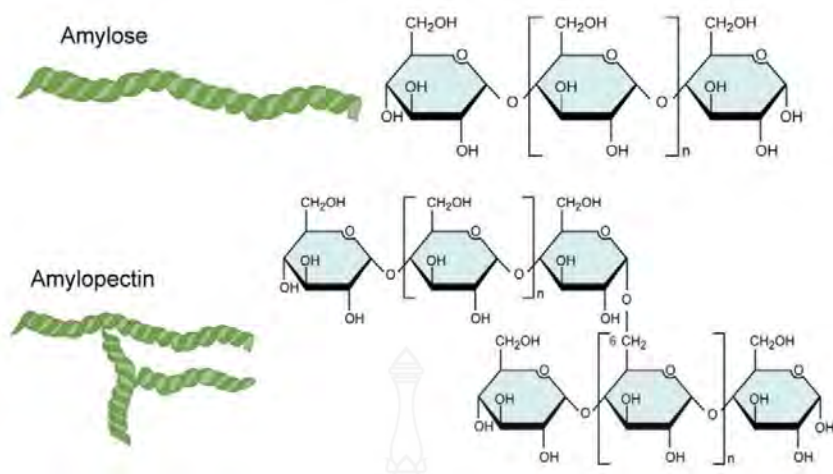
สตาρχ คือ เม็ดพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่ประกอบด้วย พอลิแซคคาไรด์หลัก 2 ชนิด ดังนี้

1. อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้น ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคส ประมาณ 1,000 - 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของน้ำตาลกลูโคสหน่วยหนึ่งเชื่อมโยงกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของน้ำตาลกลูโคสหน่วยถัดไป สตาρχที่มีปริมาณอะไมโลสสูงมีผลทำให้มีความคงรูปสูง และมีความทนต่อความชื้นได้ดี ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเทอร์โมพลาสติคสตาρχที่ทำมาจากสตาρχของข้าวโพด และมันสำปะหลังซึ่งสตาρχทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณอะไมโลส 23.9 % และ 15.5 % ตามลำดับ พบว่า ฟิล์มเทอร์โมพลาสติคสตาρχจากแป้งข้าวโพดมีความยืดหยุ่นน้อย และมีความต้านทานต่อความชื้นมากกว่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติคสตาρχจากมันสำปะหลัง นอกจากนี้อะไมโลสยังมีความว่องไวต่อการทำให้เทอร์โมพลาสติคสตาρχเกิดความยืดหยุ่นด้วยสารพลาสติไซเซอร์ได้น้อยกว่าอะไมโลเพกทิน ดังนั้นสารพลาสติไซเซอร์จึงมีส่วนช่วยปรับปรุงความสามารถในการยืดหยุ่นและความสามารถในการยึดตัวของฟิล์มเทอร์โมพลาสติคสตาρχได้ดีขึ้นเมื่อฟิล์มเทอร์โมพลาสติคสตาρχมีปริมาณสัดส่วนของอะไมโลเพกทินมากขึ้น

2. อะไมโลเพกทิน

อะไมโลเพกทินเป็นพอลิแซคคาไรด์ของน้ำตาลกลูโคสเช่นเดียวกับกับอะไมโลส แต่มีโครงสร้างสายโซ่แบบมีโซ่กิ่ง มีพันธะไกลโคไซด์ 2 รูปแบบ คือ ส่วนที่เป็นสายโซ่หลักเป็นการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage เช่นเดียวกับกับอะไมโลส และส่วนที่เป็นโซ่กิ่งเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ α -1,6 glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะสายโซ่โมเลกุล และสูตรโครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส และอะไมโลแพคติน [6]

สำหรับข้อแตกต่างระหว่างอะไมโลสและอะไมโลแพคติน เป็นดังแสดงในตารางที่ 2.1 ส่วนตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลแพคตินของสสารของพืชชนิดต่าง ๆ โดยสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลแพคตินมีผลต่อสมบัติทางกล ความทนต่อน้ำ และการตอบสนองต่อสารพลาสติกไซเซอร์ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดังกล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงยังมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ และความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำกว่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลแพคตินสูง

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างกันระหว่างอะไมโลสและอะไมโลแพคติน [6]

อะไมโลส	อะไมโลแพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. ประกอบด้วยโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4 และมีการโซ่กิ่งที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200 – 6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20 – 25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากกว่าและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

ตารางที่ 2.2 ปริมาณผลึก อะไมโลส และอะไมโลแพคตินของสตาร์ชที่มาจากพืชชนิดต่าง ๆ [6]

สตาร์ช	ปริมาณผลึก (%)	อะไมโลส (%)	อะไมโลแพคติน(%)
ข้าวเจ้า	38	20 - 30	70 - 80
มันฝรั่ง	23 - 53	23 - 31	69 - 77
มันสำปะหลัง	31 - 59	16 - 25	75 - 84
ข้าวสาลี	36 - 39	30	70
ข้าวโพด	43 - 48	28	72
ข้าวฟ่าง	22 - 28	24 - 27	73 - 76

2.1.2 สมบัติของแป้งสตาร์ช

1. การดูดซับน้ำ และการละลายน้ำของแป้งสตาร์ช

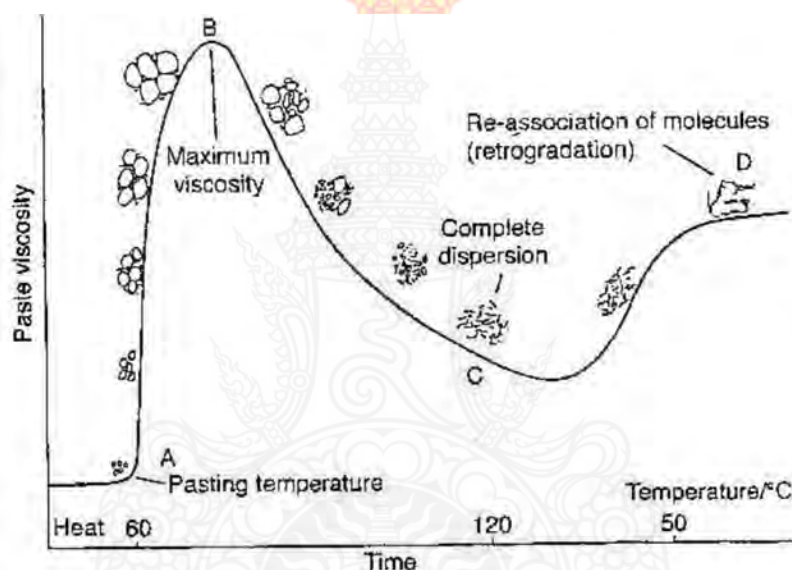
แป้งดิบจะละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์จึงสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ โมเลกุลน้ำจึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งได้ เม็ดแป้งจึงพองตัว และละลายน้ำได้ แป้งจากธัญพืช ได้แก่ แป้งข้าวโพดและแป้งสาลี เป็นกลุ่มแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง โครงสร้างร่างแหภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมาก ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้น้อย ส่วนแป้งจากรากหรือกลางลำต้น เช่น แป้งมันสำปะหลัง อุณหภูมิเจลาติไนซ์ต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช ทำให้มีการพองตัวและการละลายที่ดีกว่า และแป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง การพองตัวของเม็ดแป้งดีที่สุด เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ และมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหมู่ฟอสเฟตที่ทำให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ สมบัติในการพองตัวและการละลายน้ำของแป้งแต่ละชนิด เป็นดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังการพองตัวและการละลายน้ำของแป้งแต่ละชนิด [6]

ชนิดแป้ง	กำลังการพองตัว (เท่า)	การละลายน้ำ (%)
แป้งมันฝรั่ง	> 1,000	82
แป้งมันสำปะหลัง	71	48
แป้งเท้ายายม่อม	54	28
แป้งมันเทศ	46	18
แป้งข้าวโพด	24	25
แป้งข้าวสาลี	21	41
แป้งข้าวเจ้า	19	18

2. ความหนืดของแป้ง

ความหนืดของแป้งมีพฤติกรรมเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเริ่มต้นจากการที่น้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน น้ำแป้งจะเริ่มมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) ต่อจากนั้นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณน้ำรอบเม็ดแป้งลดลง ส่งผลทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น จนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) คือจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ ขณะที่อุณหภูมิและเวลาในการกวนเพิ่มขึ้น และได้รับแรงกวนอย่างสม่ำเสมอมีผลทำให้เม็ดแป้งเริ่มแตกออก ส่งผลทำให้ความหนืดลดลง และต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงมีผลทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อได้รับความร้อน [6]

3. เจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนทำให้เกิดการพองตัวเนื่องจากดูดซึมน้ำ ส่งผลทำให้น้ำที่ล้อมรอบเม็ดแป้งมีลดลง ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สารละลายน้ำแป้งที่ได้มีความข้นหนืดมากขึ้นจนเป็นแป้งเปียก (starch paste) เรียกกระบวนการนี้ว่า เจลาติไนเซชัน และอุณหภูมิเริ่มต้นที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัว คือ อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature) เม็ดแป้งขนาดเล็กเกิดเจลาติไนเซชันได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าเม็ดแป้งขนาดใหญ่ อุณหภูมิเจลาติไนเซชันระบุเป็นช่วงอุณหภูมิดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน ความสามารถในการเกิดเจลและรีโทรเกรเดชัน [6]

ชนิดแป้ง	ช่วงอุณหภูมิเจลาตินในเซชัน (°C)	ความสามารถในการเกิดเจลและรีโทรเกรเดชัน
แป้งข้าวโพด	80 - 62	สูง
แป้งข้าวโพดเหนียว	72 - 63	ต่ำมาก
แป้งมันฝรั่ง	65 - 58	ปานกลางถึงต่ำ
แป้งมันสำปะหลัง	65 - 52	ปานกลาง
แป้งสาลี	85 - 52	สูง
แป้งข้าวเจ้า	78 - 61	สูง

4. รีโทรเกรเดชัน

กระบวนการรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการที่สายอะไมโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการจัดเรียงตัวแบบคู่ขนานกันของสายอะไมโลสหนึ่งกับโมเลกุลของอีกสายอะไมโลสหนึ่งด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 กระบวนการรีโทรเกรเดชันมีผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งลดลง เมื่อสารละลายแป้งเกิดการจัดเรียงตัวอย่างช้า ๆ มีผลทำให้ได้แป้งเปียกที่ข้นและมีตะกอนขนาดใหญ่ แต่ถ้าแป้งเปียกถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วมีผลทำให้เกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นของสายอะไมโลส ส่วนสายของอะไมโลแพคตินไม่เกิดรีโทรเกรเดชัน เนื่องจากไม่สามารถจัดเรียงตัวคู่ขนานกันได้



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส [6]

2.1.3 กระบวนการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับสตาร์ชด้วยสารพลาสติไซเซอร์

สารพลาสติไซเซอร์เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงในพลาस्टิกเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น โดยการปรับลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สำหรับกรณีสตาร์ช โมเลกุลของสารพลาสติไซเซอร์จะแพร่เข้าไปในเม็ดแป้ง และที่อุณหภูมิสูง (90 – 180 องศาเซลเซียส) และภายใต้การได้รับแรงเฉือน พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้งจะถูกทำลาย แรงกระทำระหว่างสตาร์ชและสตาร์ชจะถูกทำลาย เพราะมันจะเกิดแรงกระทำระหว่างสตาร์ชและสารพลาสติไซเซอร์เข้ามาแทนที่ ส่งผลทำให้สตาร์ชสามารถหลอมเหลวและไหลได้ จึงทำให้สามารถนำสตาร์ชที่มีการเติมสารพลาสติไซเซอร์มาขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเดียวกับเทอร์โมพลาस्टิก คือ กระบวนการอัดรีด กระบวนการฉีดขึ้นรูป และกระบวนการเป่าเป็นฟิล์ม นอกจากสารพลาสติไซเซอร์จะช่วยในเรื่องกระบวนการขึ้นรูปให้กับสตาร์ชแล้ว สารพลาสติไซเซอร์ยังมีส่วนช่วยลดความเปราะให้กับสตาร์ชโดยการลดแรงกระทำระหว่างสายโซ่ของสตาร์ช ลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม และทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวของสตาร์ชต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (230 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการสลายตัวของสตาร์ชยิ่งลดลงเมื่อปริมาณของสารพลาสติไซเซอร์เพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัย พบว่า สารพลาสติไซเซอร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับสตาร์ชจะเป็นของเหลวที่มีสมบัติชอบน้ำ เช่น น้ำ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล (sorbital) ไกลคอล (Glycol) มอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin) และยูเรีย (Urea) น้ำและกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติไซเซอร์ที่นิยมนำมาใช้งานกับสตาร์ชสำหรับช่วยในการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาस्टิกสตาร์ชมากที่สุด

2.2 สารเพิ่มเนื้อ (Filler)

สารเพิ่มเนื้อถูกเติมลงในสูตรพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติทางกลหรือสมบัติด้านการรับแรง สารเพิ่มเนื้อสามารถอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ การเติมสารเพิ่มเนื้อช่วยลดปริมาณการใช้เรซินซึ่งมีราคาแพงกว่า โดยการเข้ามาแทนที่เนื้อเรซิน สารเพิ่มเนื้อที่ใช้ในพอลิเมอร์มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลก์ เป็นต้น ในขณะที่คาร์บอนแบล็คและซิลิกาส่วนใหญ่จะใช้เป็นสารตัวเติมในอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือยาง ในโครงการวิจัยของกวดตัวอย่างสารเพิ่มเนื้อเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย คือ นาโนเคลย์ เส้นใยป่านครนารายณ์ และคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส

2.2.1 นาโนเคลย์ [7]

1. ประเภทและโครงสร้างของเคลย์

เคลย์ สามารถแบ่งประเภทออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

1. กลุ่มคาโอลิไนท์ (Kaolinite) มี 3 ส่วนประกอบ ประกอบด้วย คาโอลิไนท์ ดิกไคท์ (Dickite) และแนครไท์ (Nacrite) โดยแต่ละตัวมีสูตรเคมี คือ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ การมีสูตรเคมีที่เหมือนกันของกลุ่มคาโอลิไนท์แสดงให้เห็นว่ากลุ่มนี้มีโครงสร้างแบบพหุสัณฐานหรือมีสูตรเหมือนกัน แต่มี

โครงสร้างแตกต่างกัน แต่ตัวของแผ่นชีทซิลิเกต (Si_2O_5) ทำพันธะกับชั้นของอะลูมิเนียม ออกไซด์/อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_4$) เคลย์เหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในเซรามิก สี ยาง กระดาษ และพลาสติก

2. กลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ไต์ (Montmorillonite/Smectite) ประกอบด้วย มอนท์มอริลโลไนท์ ทัลค์ (Talc) ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) ซาโปไนท์ (Saponite) และนอนโตรไนท์ (Nontronite) สูตรเคมีของเคลย์กลุ่มนี้ 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 กลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ถูกใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในสีและยาง เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในการขึ้นรูปทรายด้วยแม่พิมพ์และในการขุดเจาะโคลน และเป็นพอร์ซิเลนที่ทนต่อไฟฟ้า ทนต่อความร้อน และทนต่อการกัด หนึ่งในส่วนประกอบของกลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์/สเม็คไทต์ คือ ทัลค์มีอยู่ในแป้งฝุ่นทาหน้าแบบดั้งเดิม
3. กลุ่มอิลไลต์ (Illite) เป็นเคลย์ชนิดทั่วไปเท่านั้น สูตรทางเคมีโดยทั่วไป คือ $(\text{K}, \text{H})\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{XH}_2\text{O}$ โครงสร้างของเคลย์กลุ่มนี้คล้ายกับกลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์ คือ ชั้นของซิลิเกตที่ทำแซนวิชกับชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์/อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กลุ่มอิลไลต์ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อในการขุดเจาะโคลน
4. กลุ่มคลอไรต์ (Chlorite) เป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ ประกอบด้วย อะเมไซต์ (Amesite) คาโมไซต์ (Chamosite) คูกกี (Cookeite) และแดฟไนท์ (Daphnite) กลุ่มคลอไรต์มีสูตรและโครงสร้างที่แตกต่างกัน และไม่มีสูตรเคมีทั่วไป

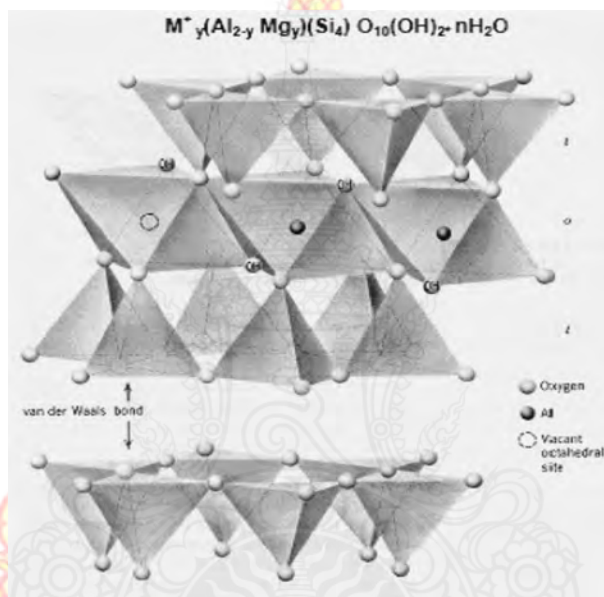
ตารางที่ 2.5 กลุ่มของเคลย์ที่มีในธรรมชาติ [7]

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	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{H})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Zn})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{XH}_2\text{O}$	X indicates varying level of water in mineral type
3	illite	illite	$(\text{K}, \text{H})\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{XH}_2\text{O}$	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

โครงสร้างของอนุภาคเคลย์มีลักษณะเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยแผ่นชีทโครงสร้างแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ออกตะฮีดรอน (Octahedral) และเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) แผ่นชีทเตตระฮีดรอน ประกอบด้วย โครงสร้างเตตระฮีดรอนของซิลิกอน-ออกซิเจนเชื่อมโยงกับโครงสร้างเตตระฮีดรอนที่อยู่ข้างเคียงโดยการไข่มุม 3 มุมร่วมกันส่งผลให้เกิดโครงร่างตายข่าย 6 ด้าน มุมที่ 4 ของแต่ละโครงสร้าง

เตตระไฮดรอนที่เหลืออยู่และอยู่ใกล้กันสร้างเป็นแผ่นชีทออกตะไฮดรอน แผ่นชีทออกตะไฮดรอนโดยปกติประกอบด้วย อะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมประสานกันกับออกซิเจนจากแผ่นชีทเตตระไฮดรอนและประสานกันกับไฮดรอกซิล แผ่นชีท 2 แผ่นร่วมกันสร้างเซลล์ 1 ชั้น และหลายชั้นอาจเข้าร่วมกันในผลึกเซลล์ 1 ผลึกด้วยไอออนบวกระหว่างชั้น แรงวัลเดวาลส์ แรงไฟฟ้าสถิตย์ หรือด้วยพันธะไฮโดรเจน

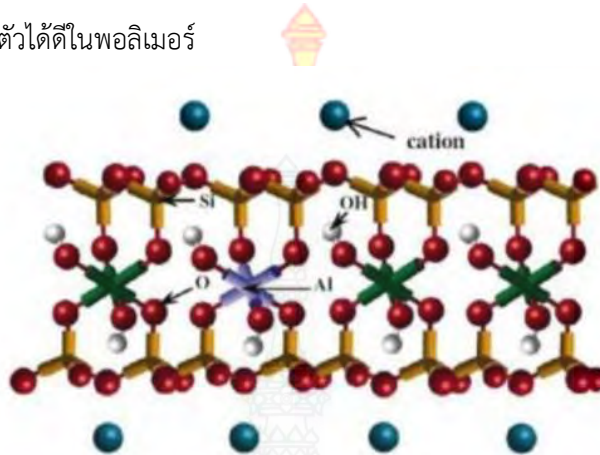
รูปที่ 2.4 แสดงสูตรทางเคมีและโครงสร้างทางเคมีของเซลล์ที่ถูกผลิตโดย Nanocor หน่วยโครงสร้างเบื้องต้น ได้แก่ เตตระไฮดรอนของซิลิกา และออกตะไฮดรอนของอะลูมิเนียม ไอออนบวก Si^{+4} มีการประสานกันกับออกซิเจนเป็นเตตระไฮดรอน ในขณะที่ไอออนบวก Al^{+3} เกิดการประสานกันเป็นออกตะไฮดรอน



รูปที่ 2.4 สูตรทางเคมีและโครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนท์ที่ถูกผลิตโดย Nanocor [7]

นาโนเคลย์เป็นอนุภาคนาโนที่ได้รับความสนใจในการนำมาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยพิจารณาจากในปี ค.ศ. 2005 นาโนเคลย์เป็นสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรตั้งแต่ ~ 1 ถึง 100 นาโนเมตร สัดส่วนการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมนาโนเคลย์ในทางการค้าคิดเป็นอัตราส่วน 1 ใน 4 ของปริมาณการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เติมนอนุภาคนาโนทั้งหมด นาโนเคลย์ที่นำมาเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนเตรียมได้จากมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) ซึ่งจัดเป็นเคลย์ที่มีลักษณะชั้นของซิลิเกตต่อกันเป็นชั้น ๆ MMT มีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange capacity) สูง มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูง มีพื้นที่ผิวสูง และสมบัติการดูดซับที่ดี เคลย์มีอยู่มากในธรรมชาติและราคาถูก โครงสร้างผลึกของเคลย์ ประกอบด้วย ชั้นของอะลูมิเนียมออกตะไฮดรอล (Aluminium octahedral) มีความหนาในระดับนาโนเมตร ซึ่งถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระไฮดรอล (Silicate

tetrahedral sheet) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ระหว่างชั้นมีช่องว่างซึ่งไอออนประจุบวก ได้แก่ โซเดียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน จะเป็นตัวทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดกันแน่น ดังนั้นในการนำเคลย์มาผสมกับพอลิเมอร์จำเป็นต้องมีการนำเคลย์มาดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดสารอินทรีย์ เพื่อให้พื้นผิวเคลย์มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น และนั่นช่วยทำให้เคลย์สามารถเกิดการแตกตัวและกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์



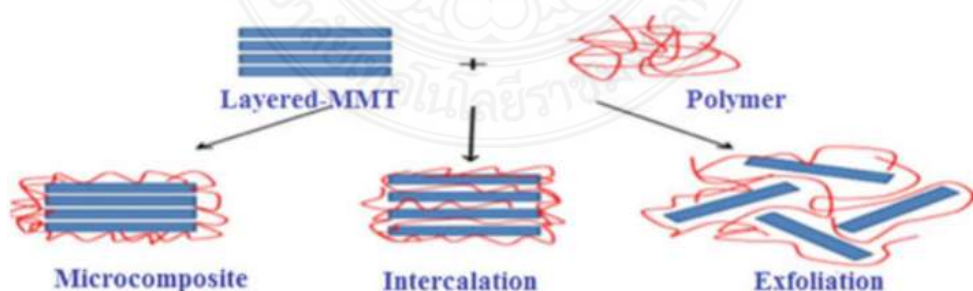
รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของนาโนเคลย์มอนต์มอริลโลไนต์ [7]

เคลย์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดสารอินทรีย์ จึงถูกเรียกว่า ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay, OMMT) โดยทั่วไป OMMT ได้มาจากการแลกเปลี่ยนไอออนของเคลย์กับสารลดแรงตึงผิวชนิดสารอินทรีย์ ซึ่งโดยมากเป็นแอมโมเนียมไอออนประจุบวก (Ammonium ion) ที่มีสายโซ่อัลคิล เช่น primary, secondary, tertiary และ quaternary alkylammonium หรือ alkylphosphonium cations ซึ่งจะเข้าไปแทนที่ไอออนประจุบวกของโลหะที่มีอยู่ในชั้นซิลิเกต มีผลทำให้ระยะห่างของชั้นเคลย์มีระยะห่างระหว่างกันมากขึ้น ลดความมีขั้วของชั้นผิวลง จึงมีผลทำให้นาโนเคลย์เกิดการแตกตัว และกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวชนิดสารอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรเคลย์มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์ สารลดแรงตึงผิวที่มีความยาวของสายโซ่ยาวมีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์มีเพิ่มมากขึ้น และความแข็งแรงของพันธะระหว่างชั้นเคลย์ลดลง จึงมีผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แทรกตัวเข้าไปในชั้นเคลย์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะทำให้การเติมนาโนเคลย์มีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายของพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอน หรืออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio, L/D ratio) ของอนุภาคนาโนเคลย์เป็นคุณลักษณะเฉพาะที่มีความสำคัญที่ต้องถูกนำไปพิจารณาในนาโนเคลย์ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงที่สุดที่เป็นไปได้ คือ 200 - 500 ดังนั้นปริมาณนาโนเคลย์เพียงเล็กน้อยมีผลทำให้มีพื้นที่ผิวของอนุภาคที่สูง นั่นคือ ผลึกกึ่งพลาสมาโนเคลย์มีพื้นที่ผิวเกิน 750 ตารางเมตร/กรัม และเมื่อนาโนเคลย์ถูกปรับปรุงผิวเพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างอนุภาคนาโนเคลย์และโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคที่สูงมีผลทำให้พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้อนุภาคนาโนเคลย์ถูกจำกัดไม่ให้

สามารถเคลื่อนได้ ดังนั้นเมื่อมีการเติมนาโนเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวให้สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นยิ่งมีผลทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่ถูกจำกัดไม่ให้อาจเคลื่อนที่ได้มีมากขึ้น

2. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์

สำหรับวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ สามารถเตรียมได้ 3 วิธี คือ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชัน (In situ polymerization) วิธีการใช้สารละลาย (Solution method) และกระบวนการหลอมเหลว (Melt intercalation) เมื่อพิจารณากระบวนการเตรียมทั้ง 3 วิธี พบว่า กระบวนการหลอมเหลวเป็นวิธีการที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับอุตสาหกรรม เพราะไม่มีการใช้สารละลายซึ่งช่วยลดต้นทุนและลดปริมาณของเสีย และยังสามารถนำเครื่องจักรที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปได้อีกด้วย สำหรับลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เป็นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ซึ่งมีผลทำให้เกิดการกระจายตัวในรูปแบบที่แตกต่างกัน การเกิดการแทรกสอดของสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่างชั้นของเคลย์ เรียกว่า intercalation ส่วนการกระจายตัวของชั้นเคลย์และมีการแยกออกจากกันของชั้นเคลย์ เรียกว่า exfoliation จากรูปที่ 2.6 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 สมบัติต่าง ๆ ข้างต้นของพอลิเมอร์สามารถถูกปรับปรุงโดยการเติมนาโนเคลย์เพียงเล็กน้อย (1 - 5 %)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [7]

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 นอกจากการเติมนาโนเคลย์จะช่วยปรับปรุงการขยายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์แล้ว ยังมีส่วนช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงให้มีความเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับกรณีวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและนาโนเคลย์ การเติมนาโนเคลย์เข้าไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางกล เสถียรภาพทางความร้อน และความทนต่อน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากนาโนเคลย์ที่กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์จะมีพื้นที่ผิวจำนวนมากที่เกิดแรงกระทำระหว่างกันกับพอลิเมอร์ จึงมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางกล และทางกายภาพของพอลิเมอร์ โดยการตรวจสอบการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในสตาโรลสามารถตรวจสอบได้โดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

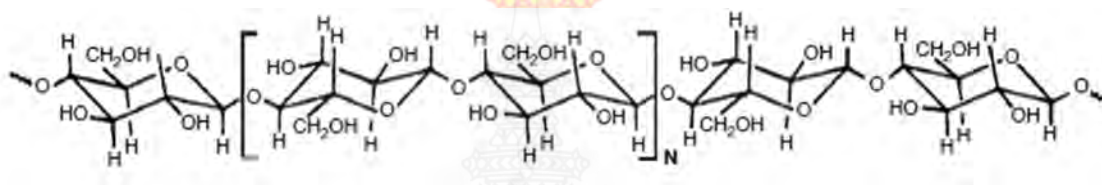
2.2.2 เส้นใยป่านศรนารายณ์ [8-12]

เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นเส้นใยที่สกัดได้มาจากใบของพืชป่านศรนารายณ์ (Agave sisalana) มีความแข็งแรงสูง และมีความแข็งมาก เส้นใยป่านศรนารายณ์มีองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านศรนารายณ์ [8-12]

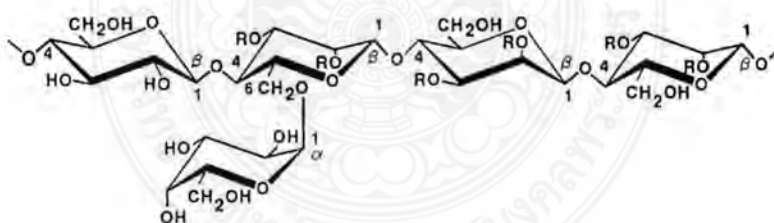
เส้นใยป่านศรนารายณ์ ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 66 - 78% เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) 10 - 14% ลิกนิน (Lignin) 10 - 11% เพคติน (Pectin) 10% ความชื้น 10 - 22%, และแว็กซ์ (Wax) 2%

- เซลลูโลส: จัดเป็นพอลิโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยของ β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4- β -glucosidic bonds ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเชิงเส้นตรง และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นทั้งภายในและภายนอกสายโซ่ มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูง และทนต่อตัวทำละลายได้ดี



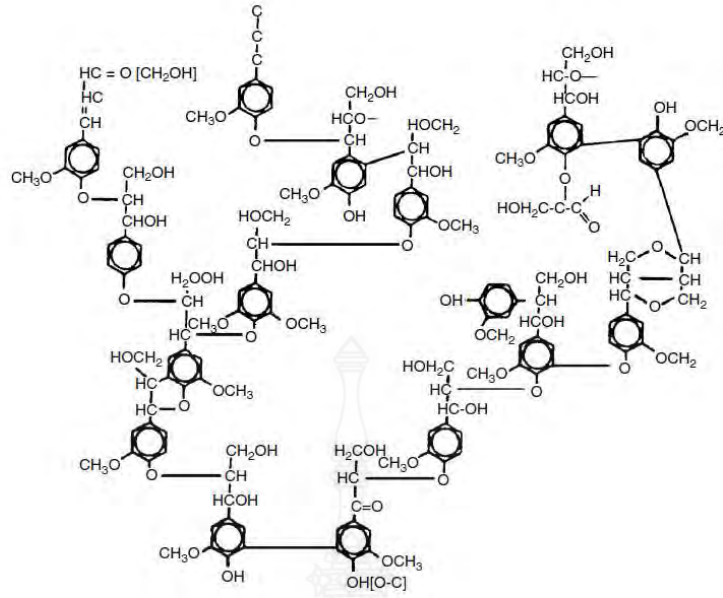
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [9]

- เฮมิเซลลูโลส: จัดอยู่ในกลุ่มของเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่ง เฮมิเซลลูโลสเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดมาเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose, D-galactose, D-xylose, L-arabose เป็นต้น รูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส



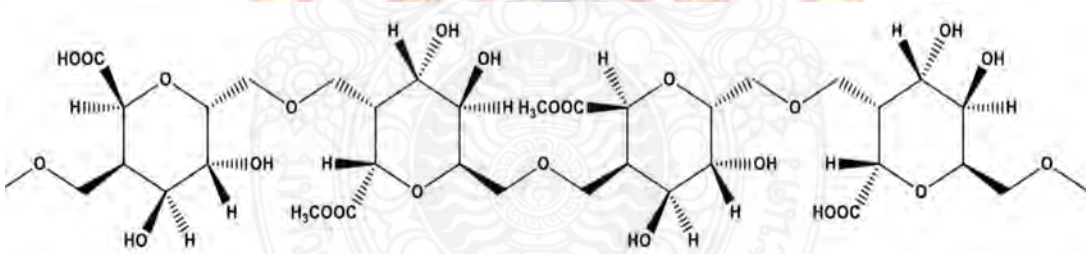
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [10]

- ลิกนิน: จัดเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อน แบบอสัณฐาน ซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมาก และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก (aromatic) โมโนเมอร์ของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) สมบัติเชิงกลของลิกนินมีค่าต่ำกว่าของเซลลูโลส ลิกนินมีผลทำให้เส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรงสูง โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [11]

- เพคติน: เป็นเฮทเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่พบได้ในธรรมชาติ โดยเฉพาะในผักและผลไม้ เป็นองค์ประกอบหนึ่งในโครงสร้างของระบบเซลล์ของพืช สายโซ่ของเพคตินมีลักษณะเป็นสายโซ่เชิงเส้นตรงของ D-galacturonic acid เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4- α -glycosidic linkages ดังแสดงในรูปที่ 2.10



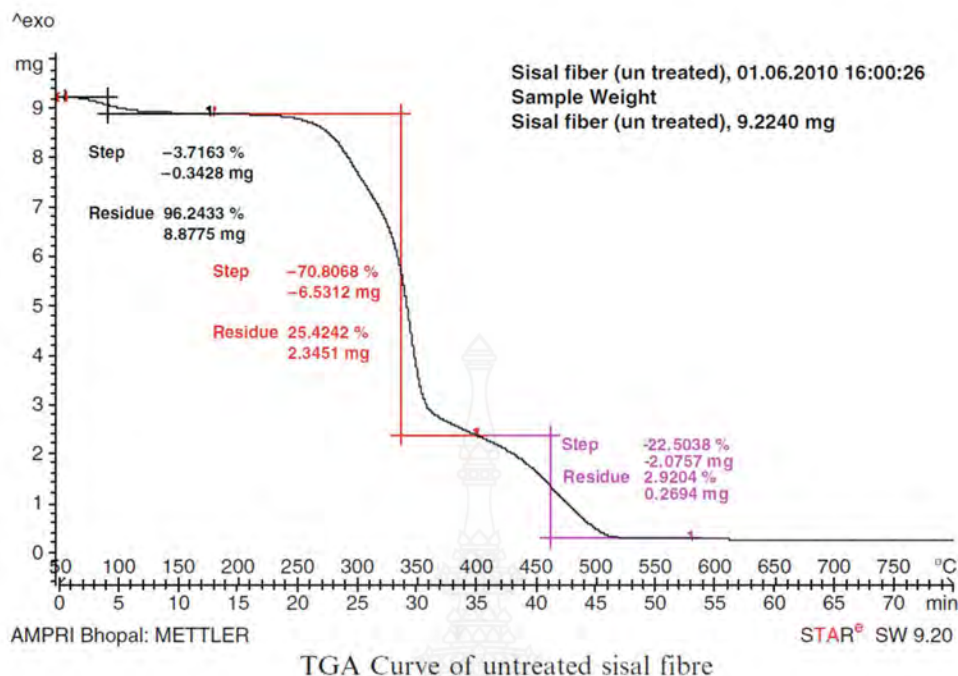
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเพคติน [12]

2. สมบัติของเส้นใยป่านครนารายณ์ [8]

- *สมบัติทางกล*: เส้นใยป่านครนารายณ์เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง จึงมีการนำมาใช้งานในการทำเป็นเชือก เสื้อผ้า พรหม งานหัตถกรรม และแหวน เป็นต้น ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติทางกลของเส้นใยป่านครนารายณ์ที่รวบรวมมาจากการทดสอบของนักวิจัยหลายท่าน โดยพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) อยู่ที่ประมาณ 100 - 700 MPa ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง อยู่ที่ประมาณ 9 - 40 GPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด อยู่ที่ประมาณ 2 - 14 % อย่างไรก็ตาม สมบัติด้านการรับแรงดึงของเส้นใยป่านครนารายณ์อาจมีค่าไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งความยาวของเส้นใย และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดุลัส และค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มค่าลดลง
- *สมบัติทางความร้อน*: เส้นใยป่านครนารายณ์เมื่อได้รับความร้อน ตั้งแต่อุณหภูมิ 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส สามารถเกิดการสลายตัวได้ แบ่งเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในช่วงที่ 1 คือ ช่วงอุณหภูมิ 50 - 200 องศาเซลเซียส เกิดการระเหยของน้ำและการสลายตัวของลิกนินในเส้นใยป่านครนารายณ์ ช่วงที่ 2 คือ เมื่ออุณหภูมิถึง 350 องศาเซลเซียส เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเริ่มเกิดการสลายตัว โดยการเกิดการขาดออกของพันธะ glycosidic linkages ในสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลส และการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของเฮมิเซลลูโลส และช่วงที่ 3 เมื่ออุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ส่วนที่เหลือในเส้นใยป่านครนารายณ์เกิดการสลายตัวต่อไป

ตารางที่ 2.6 แสดงผลของสมบัติความต้านทานแรงดึงของเส้นใยป่านครนารายณ์ [8]

S. No.	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	References
1.	550 ± 100	24 ± 0.4	2.4 ± 0.4	Oksman et al. [9]
2.	400–700	7–20	2–14	Oksman et al. [9]
3.	400–700	9.0–38.0	2.0–14	Li et al. [76]
4.	400–700	9.0–20	5–14	Joseph et al. [77]
5.	530–630	17–22	3–7	Jacob et al. [40]
6.	400–700	9–20	5–14	Paul et al. [56, 57]
7.	434	17.5	–	Ganan et al. [78]
8.	580	–	4.3	Joseph et al. [3, 4]
9.	100–700	25–50	3–6	Li et al. [76]
10.	511–635	9.4–22.0	2.0–2.5	Shibata et al. [95]
11.	500 ± 70	13.2 ± 3.1	4.8 ± 1.1	Gonzalez et al. [150]
12.	450–700	7–13	4–9	Nair et al. [79]
13.	511–700	3.0–98	2.0–2.5	Bogoeva et al. [94]
14.	340 ± 7	12.8	6–7	Idicula and Boudenne [80]
15.	501.3 ± 119.5	50.57 ± 3.27	0.78 ± 0.41	Present study by authors

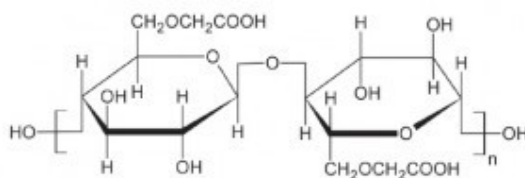


รูปที่ 2.11 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยป่านครนารายณ์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis, TGA) [8]

2.2.3 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [13-14]

1. โครงสร้างทางเคมีและการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือซีเอ็มซี หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่สามารถละลายน้ำได้ มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.12 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเกิดจากการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับคลอโรอะซิเตท (Chloroacetate) ในสารละลายอึกคาไล ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคสสามารถถูกแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl group) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม สามารถละลายน้ำได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือเพิ่มความคงตัวในอุตสาหกรรมอาหาร และนำไปเป็นสารเคลือบผิวแคปซูลยา นอกจากนี้ยังนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมสี กาว สิ่งทอ และกระดาษ เป็นต้น



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [14]

2. สมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

- ดัชนีการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซีเมทิลเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ดัชนีการแทนที่ยังมีผลต่อความสามารถในการทำอิมัลชัน สมบัติการทำให้ข้น ความคงตัว ความต้านทานต่อการกรด
- สมบัติความเป็นฟิล์มมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าดัชนีของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ (Degree of polymerization, D.P.) เพิ่มสูงขึ้น
- ความสามารถในการละลาย ถ้าดัชนีการแทนที่ต่ำกว่า 0.1 จะไม่สามารถละลายน้ำและตัวทำละลายได้ แต่ถ้าค่าดัชนีการแทนที่สูงกว่า 0.2 จะไม่สามารถละลายในน้ำได้ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Kaisangsri และคณะ (2014) [5] ทำการศึกษาสมบัติของโพลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชที่ผลิตจากสตาร์ชแป้งมันสำปะหลังโดยมีการเติมเซอีน (Zein) กลูเตน โปรตีนถั่วเหลือง เส้นใยกระต่าย หรือน้ำมันปาล์ม ที่ปริมาณ 0 - 15 % โดยน้ำหนักของแป้ง จากงานวิจัยชี้ว่า การเติมเส้นใยกระต่าย เซอีน และกลูเตน ปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ความต้านทานแรงดัด และแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และกรณีการเติมเส้นใยกระต่าย ปรับปรุงความต้านทานการรับแรงได้มากที่สุด รองลงมา คือ กลูเตน นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมกลูเตน ช่วยปรับปรุงความทนต่อน้ำได้ดีที่สุด โดยมีทั้งค่าการดูดซับน้ำ และความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุด

Mohan และคณะ (2017) [15] ได้ทำการศึกษาผลของเติมนาโนเคลย์ในฟิล์มที่ทำมาจากสตาร์ชจากข้าวโพด จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเติมนาโนเคลย์มีผลทำให้ฟิล์มชีวภาพมีสมบัติความทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น การดูดซับน้ำลดลง 22 % การแพร่ผ่านของออกซิเจนลดลง 30 % และการบวมตัวของฟิล์มที่เกิดจากการแช่ในน้ำลดลง 31% นอกจากนี้การเติมนาโนเคลย์ยังมีผลทำให้ฟิล์มชีวภาพเกิดการสลายตัวด้วยวิธีทางชีวภาพเกิดได้ช้าลง

Sun, S. และคณะ (2018) [16] ได้ทำการศึกษาผลของชนิดสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบแป้งไฮดรอกซีพราอิลโดสตาร์ชฟอสเฟต (Hydroxypropyl distarch phosphate, HPDSP) และพอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอท (Polyhydroxyalkanoate, PHA) ในอัตราส่วน 4:1 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ (OMMT) 10 % ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม มีการเติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ 24 % ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม ถูกเตรียมด้วยกระบวนการเป่าอัดรีด สารเชื่อมขวางที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 4 ชนิด คือ กรดซิตริก (Citric acid) กรดอะดิพิค (Adipic acid) บอแรกซ์ (Borax) และกรดบอริก (Boric acid) โดยเติมสารเชื่อมขวาง 1 % ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสม จากผลการวิจัย พบว่า พื้นผิวชิ้นงาน และความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อทำการเติมสารเชื่อมขวางกรดซิตริก กรดอะดิพิค และบอแรกซ์ ในขณะที่กรณีกรดบอริก ชิ้นงานมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ การเติมสารเชื่อมขวางมีผลในการขัดขวางการเกิดโครงสร้างแบบอินเตอร์คาเลต (Intercalated structure) ของพอลิเมอร์ที่จะแพร่เข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างชั้นเคลย์ ฟิล์มที่ใช้กรดอะดิพิคเป็นสารเชื่อมขวางมีสมบัติการส่องผ่านของแสง

สูงที่สุด และมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนต่ำที่สุด ส่วนฟิล์มที่ใช้กรดบอริกเป็นสารเชื่อมขวางมีผลทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ส่วนกรณีกรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวางมีผลทำให้ค่าการยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด

Domene-López, D. และคณะ (2019) [17] ทำการศึกษาอิทธิพลของแป้งต่างชนิด ประกอบด้วย แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี และแป้งข้าวโพด ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ และมีการเติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ 33 % จากงานวิจัยพบว่า ปริมาณอะไมโลสที่สูงขึ้นมีผลทำให้แป้งมีค่ามอดุลัสและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง เนื่องจากอะไมโลสที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่า แป้งสาลีและแป้งข้าวโพดซึ่งมีปริมาณอะไมโลสสูงที่สุดมีค่ามอดุลัสและความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ในขณะที่แป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำสุดมีความสามารถในการยืดตัวได้มากที่สุด การดูดซับน้ำของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่า แป้งมันฝรั่งมีการดูดซับน้ำมากที่สุด และแป้งข้าวโพดมีการดูดซับน้ำน้อยที่สุด



บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีหลักที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 สตาร์ชจากแป้งข้าวโพด จากบริษัท เฟรนด์ชิพ คอร์น สตาร์ช จำกัด มีปริมาณความชื้น 13 % และค่ากรด-เบส เท่ากับ 4 - 7 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ดังรูปที่ 3.1
- 3.1.2 กลีเซอรอล เกรดวิเคราะห์ ของบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด ดังรูปที่ 3.2 กลีเซอรอล ถูกใช้ในการทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์
- 3.1.3 นาโนเคลย์ ชื่อทางการค้า Nanomer เกรด I.31PS ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด มีลักษณะเป็นผง ดังรูปที่ 3.3
- 3.1.4 เส้นใยป่านศรนารายณ์ ดังรูปที่ 3.4 ถูกนำมาตัดให้มีขนาดความยาวประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร
- 3.1.5 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รหัสผลิตภัณฑ์ 419311 ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 250,000 และดีกรีการแทนที่ 0.7 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.1 สตาร์ชจากแป้งข้าวโพด จากบริษัท เฟรนด์ชิพ คอร์น สตาร์ช จำกัด



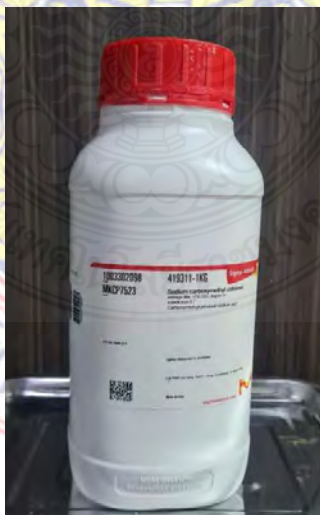
รูปที่ 3.2 กลีเซอรอล เกรดวิเคราะห์ ของบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด



รูปที่ 3.3 นาโนเคลย์ ชื่อทางการค้า Nanomer เกรด I.31PS ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด



รูปที่ 3.4 เส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 3.5 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ของบริษัท Sigma Aldrich จำกัด มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 250,000 และดีกรีการแทนที่ 0.7

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

สำหรับแผนการดำเนินการวิจัยการพัฒนาสูตรวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและวัสดุที่ยั่งยืนเพื่องานบรรจุภัณฑ์อาหาร มีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3.6 โดยเริ่มต้นจากการจัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี ทำการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อ โดยเลือกใช้สารเพิ่มเนื้อ ประกอบด้วย นาโนเคลย์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเส้นใยป่านศรนารายณ์มาทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ 0 - 15 % โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำสารเพิ่มเนื้อมาผสมกับสตาบิลจากแป้งข้าวโพดที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 ส่วนต่อแป้งสตาบิล 100 ส่วน และนำของผสมมาทำการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาบิลจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป และทำการประเมินผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อด้วยการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติความทนต่อน้ำ และสัณฐานวิทยา



รูปที่ 3.6 แผนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาสูตรวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและวัสดุที่ยั่งยืนเพื่องานบรรจุภัณฑ์อาหาร

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการการพัฒนาสูตรวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและวัสดุที่ยั่งยืนเพื่องานบรรจุภัณฑ์อาหาร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป มีรายละเอียดดังนี้

1. ทำการอบสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด นาโนเคลย์ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอบเส้นใยป่านศรนารายณ์เพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ทำการชั่งส่วนผสมของสารเคมีต่าง ๆ ด้วยเครื่องชั่ง แบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเพิ่มเนื้อ 0 - 15 % โดยน้ำหนัก และมีการเติมกลีเซอรอล 30 ส่วนต่อแป้งสตาร์ช 100 ส่วน (phr)
3. นำสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดมาผสมกับน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก พร้อมกับเติมกลีเซอรอล ปริมาณ 30 phr และทำการเติมสารเพิ่มเนื้อ ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 3.7
4. ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายเย็นตัวที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเทลงแม่พิมพ์ ขนาด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.8 และนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ฟิล์มแห้ง



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการกวนผสมสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด กลีเซอรอลและสารเพิ่มเนื้อด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อ

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.2.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบความต้านทานแรงดึงทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D882 ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus ของบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.9 โดยนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อมาทำการตัดให้มีขนาดชิ้นงานทดสอบ คือ 13.0 มิลลิเมตร x 100.0 มิลลิเมตร x 0.3 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบนำชิ้นงานทดสอบวางในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 43 % อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน โดยการนำชิ้นงานทดสอบใส่ในเดซิเคเตอร์ที่มีสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) แบบอิมมิดี สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่หัวจับชิ้นงาน 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break)

3.3.2.2 การวัดค่าการดูดซับน้ำ

นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อมาทำการตัดให้มีขนาดชิ้นงานทดสอบ 20.0 มิลลิเมตร x 20.0 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาวางในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0 % โดยวางในเดซิเคเตอร์ที่มีแคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรส์ (Anhydrous $CaSO_4$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานฟิล์มแห้ง และนำชิ้นงานฟิล์มแห้งมาวางในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 43 % จำนวนชิ้นงานฟิล์มแต่ละสูตรที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสภาวะ คือ 3 ชิ้นงานทดสอบ การเตรียมสภาวะทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ 43 % ดำเนินการอ้างอิงตาม ASTM E 104 (1985) ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่เวลา 24 ชั่วโมง คำนวณหาการดูดซับน้ำของชิ้นงานทดสอบ ตามสมการที่ 3.1

$$\text{water absorption (\%)} = \frac{w_t - w_o}{w_o} \times 100 \quad (3.1)$$

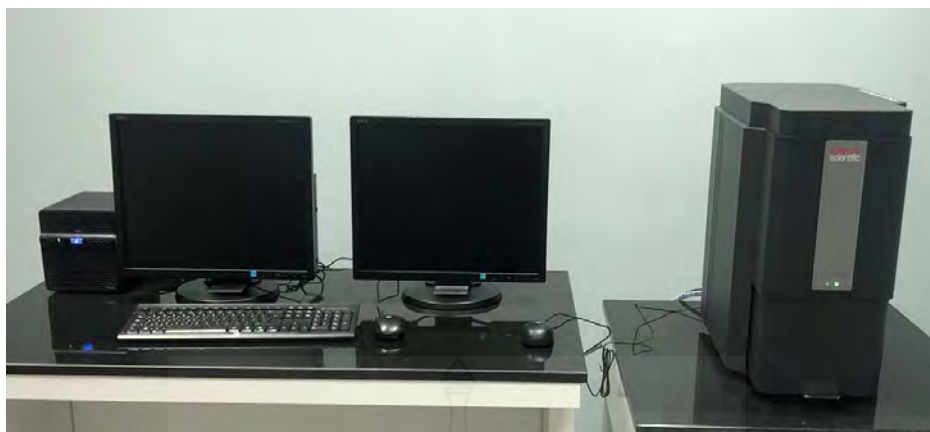
โดยที่ w_t คือ น้ำหนักชิ้นงานเมื่ออยู่ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดเป็นเวลา t
 w_o คือ น้ำหนักชิ้นงานแห้งเริ่มต้น



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus

3.3.2.3 การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อ โดยนำฟิล์มมาทำการเคลือบด้วยทองคำด้วยวิธีการสปัตเตอริง (sputtering) หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-7610F ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.10 ที่ความต่างศักย์ 15 kv



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ Field Emission Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-7610F

3.3.2.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระหว่างสตาร์ซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อมาทำการตรวจสอบหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ทำการประเมินด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3.11 ทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ -140 ถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

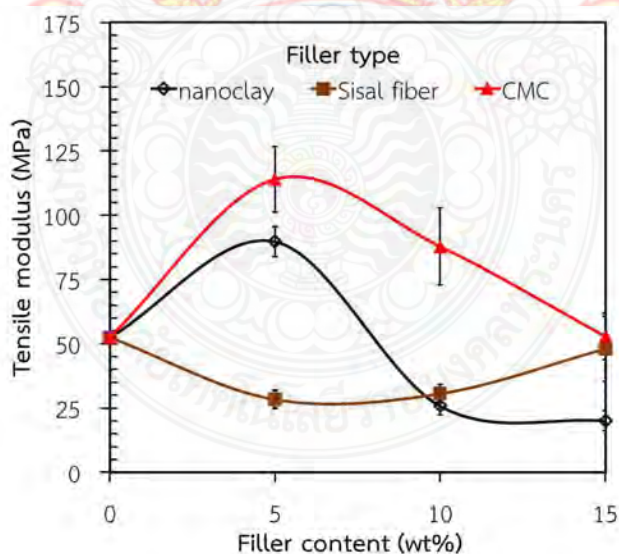


รูปที่ 3.11 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH [18]

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

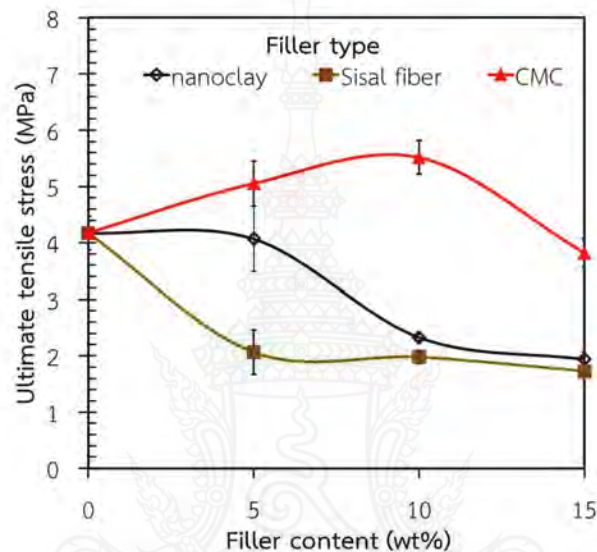
4.1 ผลของสมบัติทางกล

ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อสมบัติทางกลของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและสารเพิ่มเนื้อ ถูกประเมินด้วยการทดสอบแรงดึงซึ่งเป็นสมบัติการรับแรงที่มีความสำคัญต่อการนำฟิล์มไปใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.1 – 4.3 จากรูปที่ 4.1 พบว่า กรณีการเติมนาโนเคลย์ 5 % โดยน้ำหนัก และกรณีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ช่วยปรับค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ในขณะที่การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง การเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงจากการเติมนาโนเคลย์และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสอาจเป็นผลมาจากนาโนเคลย์และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความคงรูปมากกว่าสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด แต่เมื่อปริมาณสารเพิ่มเนื้อปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงเริ่มลดลงอาจเนื่องมาจากปริมาณสารเพิ่มเนื้อปริมาณที่มากขึ้นมีผลทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของสารเพิ่มเนื้อมากขึ้น ส่วนการลดลงของค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงจากการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์อาจเนื่องมาจากเส้นใยป่านศรนารายณ์มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน จึงเกิดการกระจายตัวได้ยาก ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงมีค่าที่ลดลงเมื่อเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์



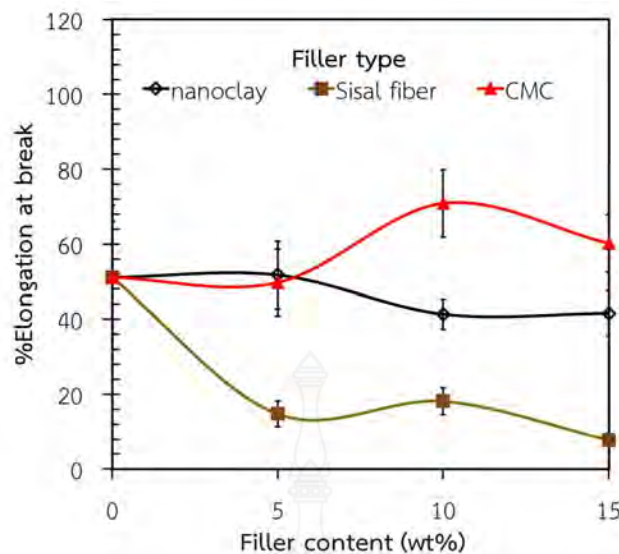
รูปที่ 4.1 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด

สำหรับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพด และสารเพิ่มเนื้อ เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากรูปพบว่า การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ช่วยปรับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ แต่เมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากกว่า 10 % โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง อาจมีสาเหตุเช่นเดียวกับกรณีค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง ส่วนกรณีนาโนเคลย์ พบว่า การเติมนาโนเคลย์ ปริมาณมากกว่า 5 % โดยน้ำหนัก และการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง อาจเนื่องจากการนาโนเคลย์และเส้นใยป่านศรนารายณ์เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี



รูปที่ 4.2 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพด

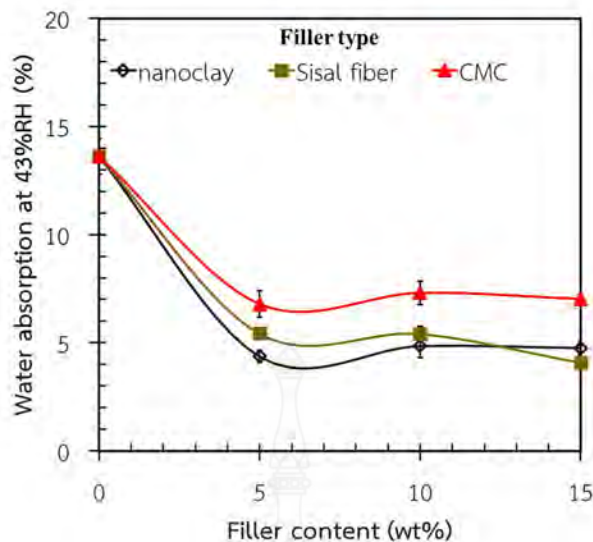
สำหรับผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพด เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยพบว่า การปรับปรุงความสามารถในการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดเกิดขึ้นจากการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติเพิ่มความหนืด และความคงตัวจึงช่วยให้ฟิล์มมีความเหนียวที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.3 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด

4.2 ผลของสมบัติความทนต่อน้ำ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อสมบัติความทนต่อน้ำด้วยการวัดค่าการดูดซับน้ำ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 43 % ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากกราฟพบว่า สารเพิ่มเนื้อทั้ง 3 ชนิดสามารถช่วยลดค่าการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซอย่างชัดเจน จากค่าการดูดซับน้ำ 13.5 % ลดลงไปเป็นค่าการดูดซับน้ำอยู่ที่ช่วงประมาณ 4 – 7 % เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อการปรับปรุงความทนต่อน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ พบว่า นาโนเคลย์สามารถปรับปรุงความทนต่อน้ำได้ดีที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยป่านครนารายณ์ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะนาโนเคลย์มีสมบัติเป็นตัวกั้นความชื้นและก๊าซที่ดี ส่วนการเติมเส้นใยป่านครนารายณ์มีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซดูดซับน้ำลดลงมากกว่ากรณีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อาจเนื่องมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายน้ำได้ ในขณะที่เส้นใยป่านครนารายณ์ไม่สามารถละลายน้ำ ดังนั้นโมเลกุลน้ำจึงสามารถแพร่ หรือแทรกไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้ดีกว่ากรณีเส้นใยป่านครนารายณ์



รูปที่ 4.4 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพด ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 43 % เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.3 ผลของสมบัติทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.5 เป็นภาพแสดงลักษณะชิ้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน จากรูปที่ 4.5 (ก) พบว่า กรณีการเติมนาโนเคลย์มีผลทำให้ฟิล์มมีความขุ่นมากขึ้นเมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มสูงขึ้น และสามารถสังเกตเห็นอนุภาคของนาโนเคลย์กรณีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) สามารถสังเกตเห็นเส้นใยป่านศรนารายณ์ในฟิล์มได้อย่างชัดเจนและสังเกตเห็นว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติการรับแรงถูกปรับปรุงได้ลดลงจากการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ส่วนกรณีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) ไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างกรณีฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดที่มีการเติมและไม่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

สำหรับรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดและปริมาณต่าง ๆ กันที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ กำลังขยายที่ 300 เท่า รูปที่ 4.6 (ก) กรณีพื้นผิวของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ รูปที่ 4.6 (ข) และ 4.6 (ค) เป็นลักษณะของพื้นผิวฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดและนาโนเคลย์ที่มีการเติมนาโนเคลย์ 5 และ 15 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่า เมื่อปริมาณนาโนเคลย์เพิ่มมากขึ้นสามารถสังเกตเห็นอนุภาคของนาโนเคลย์เกาะกลุ่มกันอย่างชัดเจน ผลที่ได้มีสอดคล้องกับคำอธิบายในผลการทดสอบแรงดึง ส่วนกรณีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ปริมาณ 5 และ 15 % โดยน้ำหนัก เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) และ 4.6 (จ) ตามลำดับ พบว่า การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ปริมาณมากมีผลทำให้ฟิล์มมีพื้นผิวที่ไม่เรียบมากขึ้น แต่ไม่สามารถตรวจสอบการกระจายตัวของเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วย

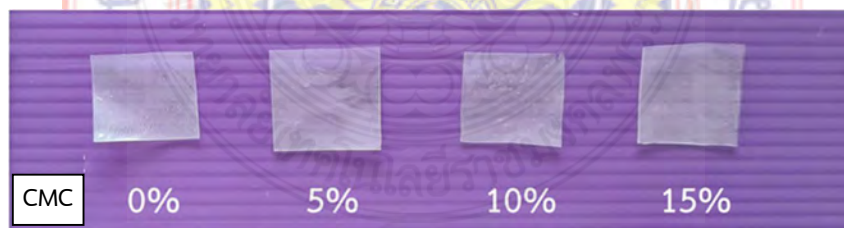
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ เนื่องจากเส้นใยป่านศรนารายณ์มีความยาวเส้นใยมากเกินไปที่จะตรวจสอบ ณ กำลังขยายต่ำสุดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับกรณีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ลักษณะของพื้นผิวฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 และ 15 % โดยน้ำหนัก เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ฉ) และ 4.6 (ช) ตามลำดับ พบว่า ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานฟิล์มกรณีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะไม่แตกต่างจากฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ บ่งบอกว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกสตาซดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารเพิ่มเนื้อชนิดอื่น ๆ



(ก)



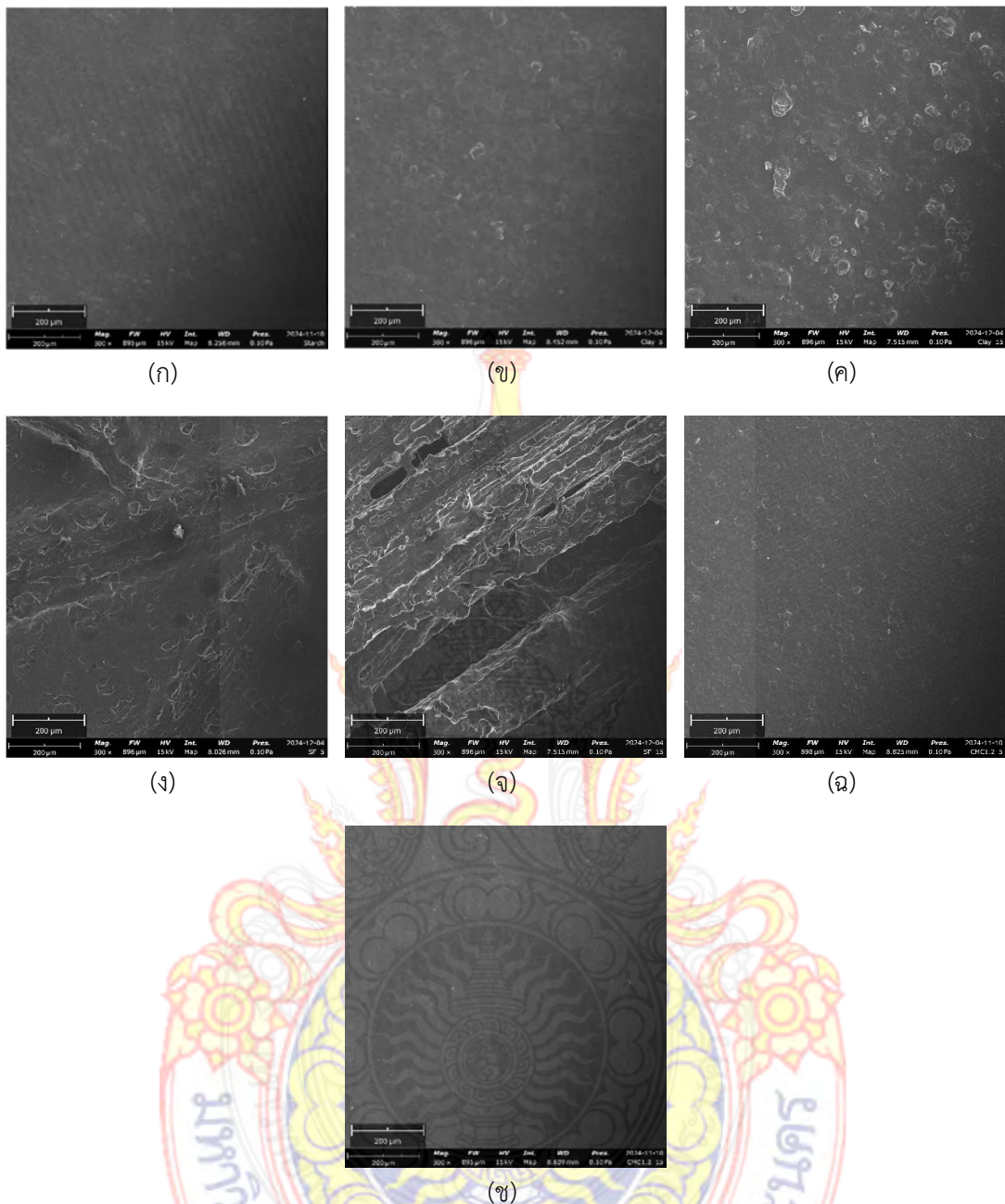
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ลักษณะชิ้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน

- (ก) กรณีการเติมนาโนเคลย์
- (ข) กรณีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์
- (ค) กรณีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

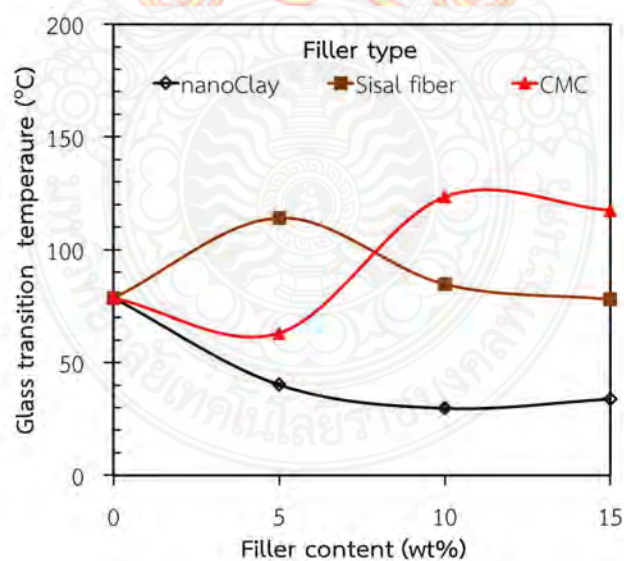


รูปที่ 4.6 ภาพโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดต่าง ๆ กัน

- (ก) กรณีไม่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ
- (ข) กรณีการเติมนาโนเคลย์ ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก
- (ค) กรณีการเติมนาโนเคลย์ ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก
- (ง) กรณีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก
- (จ) กรณีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก
- (ฉ) กรณีการเติมคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก
- (ช) กรณีการเติมคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก

4.4 ผลของสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่า ไม่สามารถตรวจพบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดในชั้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อชนิดและปริมาณต่างๆ กันได้จากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 แต่สามารถพบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดได้จากการให้ความร้อนเป็นครั้งที่ 2 ซึ่งผลดังกล่าวนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shogren และคณะ [19] รูปที่ 4.7 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากการเติมสารเพิ่มเนื้อชนิดและปริมาณต่างๆ กัน พบว่า กรณีการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การเติมนาโนเคลย์และเส้นใยป่านครนารายณ์มีแนวโน้มทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซมีแนวโน้มลดลง จากผลดังกล่าวเป็นผลมาจากการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีแรงกระทำกับโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดจึงมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดเกิดการขยับตัวได้ยากขึ้น ในขณะที่การเติมนาโนเคลย์และเส้นใยป่านครนารายณ์เมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้นมีการกระจายตัวที่ไม่ดี บ่งบอกความเข้ากันได้ที่ไม่ดีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซและสารเพิ่มเนื้อทั้งสองชนิด ผลของการเติมสารเพิ่มเนื้อทั้งสามชนิดที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซมีความสอดคล้องกับคำอธิบายผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.7 ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อที่มีต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดในชั้นงานฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อ

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของการเติมสารเพิ่มเนื้อจากวัสดุฐานชีวภาพชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน ที่มีผลต่อการพัฒนาสูตรของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดและสารเพิ่มเนื้อ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแบบใช้ครั้งเดียว โดยเลือกใช้เส้นใย ป่านศรนารายณ์ นาโนเคลย์ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาทำการศึกษา และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ สารเพิ่มเนื้อแต่ละชนิด ตั้งแต่ 0 ถึง 15 % โดยน้ำหนัก และได้ทำการประเมินผลด้วยการทดสอบสมบัติ ทางกล สมบัติความทนต่อน้ำ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน จากผลการทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สำหรับสมบัติทางกล พบว่า การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงดึงของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาบิลได้ดีที่สุด โดยมีผล ทำให้ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเนื้อ
- สำหรับสมบัติด้านความทนต่อน้ำ พบว่า การเติมนาโนเคลย์ เส้นใยป่านศรนารายณ์ และคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ 43 % ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีแนวโน้มลดลง โดยสารเพิ่มเนื้อที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความทนต่อน้ำมากที่สุด คือ นาโนเคลย์
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลมากที่สุด ในขณะที่นาโนเคลย์ และเส้นใยป่านศรนารายณ์มีแนวโน้ม กระจายได้ไม่ดีเมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น
- สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพด ในขณะที่การเติม นาโนเคลย์และเส้นใยป่านศรนารายณ์มีแนวโน้มทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีแนวโน้มลดลง

เอกสารอ้างอิง

1. Biduski, B., Silva, W.M.F., Colussi, R., Halal, S.L.M., Lim, L., Dias, A.R.G. and Zavareze, E.R., 2018, "Starch hydrogels: The Influence of the Amylose Content and Gelatinization Method", **International Journal of Biological Macromolecules**, Vol. 113, pp. 443-449.
2. Zhang, Y., Rempel, C. and McLaren, D., 2014, Chapter 16 Thermoplastic Starch. In J.H. Han (Eds.), **Innovations in Food Packaging**, pp. 391-412, Academic Press.
3. De Carvalho, A.J.F., Curvelo, A.A.S. and Agnelli, J.A.M., 2001, A First Insight on Composites of Thermoplastic Starch and Kaolin", **Carbohydrate Polymers**, Vol. 45, pp.189-194.
4. De Carvalho, A.J.F., Curvelo, A.A.S. and Agnelli, J.A.M., 2002, Wood Pulp Reinforced Thermoplastic Starch Composites", **International Journal of Polymeric Materials**, Vol. 51, pp. 647-660.
5. Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O and Laohakunjit, N., 2014, Characterization of Cassava Starch Based Foam Blended with Plant Proteins, Kraft Fiber, and Palm Oil", **Carbohydrate Polymers**, Vol. 110, pp. 70-77.
6. กัลทิมา เชาวน์ชาญชัยกุล, วรณช ดิละมัน และวิไลวรรณ ลีนะกุล, 2566, "การประยุกต์ใช้วัสดุฐานชีวภาพเพื่อเศรษฐกิจสีเขียวที่ยั่งยืน", **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ งบประมาณสนับสนุนมูลฐาน ประจำปีงบประมาณ 2566**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
7. กัลทิมา เชาวน์ชาญชัยกุล, ฉันททิพ สกุลเขมฤทัย และวรณช ดิละมัน, 2565, "การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพเพื่อรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์จากข้าว", **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ งบประมาณสนับสนุนมูลฐาน ประจำปีงบประมาณ 2565**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
8. Saxena, M., Pappu, A., Haque, R. and Sharma, A., 2011, Sisal Fiber Based Polymer Composites and Their Applications. In Kalia, S., Kaith, B., Kaur, I. (Eds.) **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites**, Springer, Berlin, Heidelberg.
9. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.
10. Sjöström, E., 1993, **Wood Chemistry Fundamentals and Application**, 2nd ed., Academic Press, INC., New York, pp. 55-89.

11. Blezzki, A.K. and Gassan, J., 1999, “Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres”, **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 221-274.
12. Alvarez-Pérez, O.B., Montañez, J., Aguilar, C.N. and Rojas, R., 2015, “Pectin-candelilla Wax: An Alternative Mixture for Edible Films”, **The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, Vol.5, pp. 167-171.
13. Caballero, B., Finglas, P.M. and Toldrá, 2016, **Encyclopedia of Food and Health**, Academic Press.
14. McDonald, J.E., Rooks, D.J. and McCarthy, A.J., 2012, “Chapter Nineteen - Methods for the Isolation of Cellulose-Degrading Microorganisms”, **Methods in Enzymology**, Vol. 510, pp. 349-374.
15. Mohan, T.P., Devchand, K. and Kanny, K., 2016, “Barrier and Biodegradable Properties of Corn Starch-derived Biopolymer Film Filled with Nanoclay Fillers”, **Journal of Plastic Film and Sheeting**, Vol. 33, pp. 1-28.
16. Sun, S., Liu, P. and Ji, N., Hou, H. and Dong, H., 2018, “Effects of Various Cross-Linking Agents on the Physicochemical Properties of Starch/PHA Composite Films Produced by Extrusion Blowing”, **Food Hydrocolloids**, Vol. 77, pp. 964-975.
17. Domene-López, D., García-Quesada, J.C., Martín-Gullón, I. and Montalbán, M.G., 2019, “Influence of Starch Composition and Molecular Weight on Physicochemical Properties of Biodegradable Films”, **Polymers**, Vol 11, 1084.
18. 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.
19. Shogren, R.L., 1992, “Effect of Moisture Content on the Melting and Subsequent Physical Aging of Cornstarch”, **Carbohydrate Polymers**, Vol. 19, pp. 83-90.

ประวัติย่อผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง

เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 0 2836 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., Nawarat, P., and Thongsang, S., 2025, "Toughening Polylactic Acid with Epoxidized Natural Rubber via Altering the Dicumyl Peroxide Mixing Sequence", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 33, pp. 230-242.
2. Sakulkhaemaruethai, C., Pankaew, P., and Chaochanchaikul, K., 2023, "Effectiveness of Oil Palm Fiber and Surface Treatments on the Mechanical, Thermal, Morphological, and Water Absorption Properties of Wheat Gluten Composites", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 63, pp. 3433-3442.
3. Chaochanchaikul, K. and Sakulkhaemaruethai, C., 2023, "Effect of Nanoclay and Nano-Calcium Carbonate Content on the Properties of Polybutylene Succinate/Nanoparticle Composites", **Journal of Plastic Film and Sheeting**, Vol. 39, pp. 190-210.
4. 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**, Vol. 30, pp. 1095-1105.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
11. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, "Photo-degradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering", **Express Polymer Letters**, Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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. กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล และ อัสมา กระจำแง้ง, “การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน”, วารสารวิชาการปทุมวัน, ปีที่ 11, ฉบับที่ 31, 2564.



ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.ปิยะพงษ์ ปานแก้ว
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Piyapong Pankaew

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 0 2836 3000
E-mail : piyapong.p@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปร.ด. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วท.บ. (ฟิสิกส์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

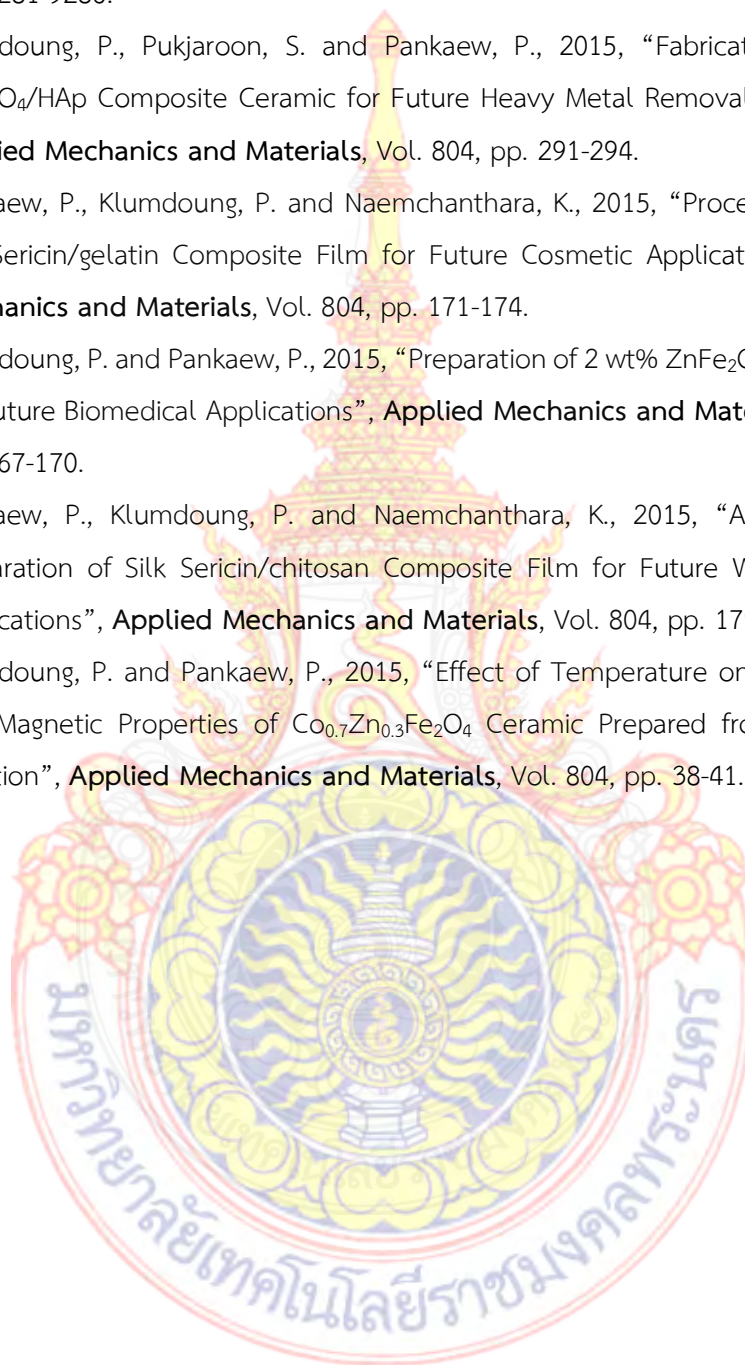
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Bioceramic
Biopolymers
Nanomaterials
Material Fabrication

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. White, P., Pankaew, P., Bavykin, D., Moshrefi-Torbati, M., and Beeby, S., 2024, “The Investigation of the Energy Harvesting Performance Using Electrospun PTFE/PVDF Based on a Triboelectric Assembly”, **Smart Materials and Structures**, Vol. 33, 075010.
2. Suchaiya, V., Chokboribal, J., Khamweera, P., and Pankaew, P., 2024, “Active Carboxymethyl Cellulose/Polyvinyl Alcohol Biodegradable Packaging Film for Shelf-Life Enhancement: Effects of Makrut Lime Essential Oil on Cavendish Bananas Ripening and Fungal Spoilage”, **Polymer Engineering and Science**, Vol. 64, pp. 1699–1714.
3. Chokboribal, J., Amornkitbamrung, L., Somchit, W., Suchaiya, V., Khamweera, P., and Pankaew, P., 2023, “Effects of ZnO/trimethylsilyl Cellulose Nano-composite Coating on Anti-UV and Anti-fungal Properties of Papers”, **Scientific Reports**, Vol. 13, 20714.
4. Sakulkhaemaruethai, C., Pankaew, P., and Chaochanchaikul, K., 2023, “Effectiveness of Oil Palm Fiber and Surface Treatments on the Mechanical, Thermal, Morphological, and Water Absorption Properties of Wheat Gluten Composites”, **Polymer Engineering and Science**, Vol. 63, pp. 3433-3442.
5. Pankaew, P. and White, P., 2020, “Crystallization of Calcium Deficient Hydroxyapatite Nanocrystals on Woven Silk Fibroin Fabric via Precipitation Process”, **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 20, pp. 81-86.
6. Klumdong, P., Hassadeeb, A. and Pankaew, P., 2019, “Effect of Nickel Ferrite Addition on Characteristics of Nanostructured Nickel Ferrite/Hydroxyapatite Ceramic”, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 17, pp. 1752–1760.
7. White, P., Chooprajong, S. and Pankaew, P., 2019, “Study of Sericin-Thunbergia Laurifolia Electrospun Fibre for Wound Healing Applications”, **Key Engineering Materials**, Vol. 798, pp. 53-58.
8. Klumdong, P. and Pankaew, P., 2017, “The Development of Electrospinning Apparatus to Fabricate Nanofiber for Future Material Applications”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 244-247.

9. Pankaew, P. and Klumdoung, P., 2015, “Structural and Magnetic Characterizations of Nano Sized Grain Zinc Ferrite/hydroxyapatite Ceramic Prepared by Solid State Reaction Route”, **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 15, pp. 9281-9286.
10. Klumdoung, P., Pukjaroon, S. and Pankaew, P., 2015, “Fabrication of 2 wt% NiFe_2O_4 /HAp Composite Ceramic for Future Heavy Metal Removal Applications”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 291-294.
11. Pankaew, P., Klumdoung, P. and Naemchanthara, K., 2015, “Processing of Elastic Silk Sericin/gelatin Composite Film for Future Cosmetic Applications”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 171-174.
12. Klumdoung, P. and Pankaew, P., 2015, “Preparation of 2 wt% ZnFe_2O_4 /HAp Ceramic for Future Biomedical Applications”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 167-170.
13. Pankaew, P., Klumdoung, P. and Naemchanthara, K., 2015, “A Study of the Preparation of Silk Sericin/chitosan Composite Film for Future Wound Dressing Applications”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 179-182.
14. Klumdoung, P. and Pankaew, P., 2015, “Effect of Temperature on the Structural and Magnetic Properties of $\text{Co}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Ceramic Prepared from Solid State Reaction”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 38-41.



ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.วรณูх ดีละมัน
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Woranuch Deelaman

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 0 2836 3016 หรือ 08 1067 7254
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. Pongpiachan, S., Hirisajja, J., Aekakkararungroj, A., Gupta, P., Rungsiyanon, S., Choochuay, C., Deelaman, W., and Poshyachinda, S., 2024, "Impacts of Meteorological Parameters on COVID-19 Transmission Trends in the Central Part of Thailand", **Aerosol Science and Engineering**, Vol. 8, pp. 370–383.

2. Choochuay, C., Deelaman, W. and Pongpiachan, S., 2023, "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Thai and Myanmar Rice: Concentrations, Distribution and Health Concerns", **Nature Environment and Pollution Technology**, Vol. 22, pp. 1097–1110.
3. Deelaman, W., Choochuay, C. and Pongpiachan, S., 2023, "Source Appointment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Paddy Grain from Thailand and Laos", **Environmental Science and Pollution Research**, Vol. 30, pp. 32737–32750.
4. Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Choochuay, C., Deelaman, W., Ladtem, N., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Hashmi, M.Z., Cao, J. and Leckngam, A., 2022, "Concentrations and Source Identification of Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediment Cores from South And Northeast Thailand", **Heliyon**, Vol. 8, e10953.
5. Choochuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Ladtem, N., Suttinun, O., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Hashmi, M.Z. and Palakun, J., 2022, "Effects of Agricultural Waste Burning on PM2.5-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-Soluble Ionic Species in the Ambient Air of Chiang-Mai, Thailand", **Polycyclic Aromatic Compounds**, Vol. 42, pp. 749–770.
6. 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**, Vol. 43, pp. 2851–2870.
7. Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Choochuay, C., ladtem, 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.
8. Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Choochuay, C., ladtem, 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.
9. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., ladtem, 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 pm2.5- 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.
10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.

18. 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.

