

รหัสโครงการ SUT7-710-53-12-14



รายงานการวิจัย

**ผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต
ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์
(Effect of Nanoclay on Physical Properties of
Polypropylene/Sisal Composites)**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต
ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์
(Effect of Nanoclay on Physical Properties of
Polypropylene/Sisal Composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาด ศุภกาญจน์

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง ผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณปี 2553 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นางสาววิชุดา จันทร์ประภานนท์ นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด (SCG Chemicals Co., Ltd) ที่ให้ความอนุเคราะห์ พอลิโพรพิลีน (P700J) บริษัท เซาเทิร์น เคลย์ โพรดัคส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา (Southern Clay Products Inc., USA) ที่ให้ความอนุเคราะห์ออร์กาโนเคลย์ (Cloisite[®] 15A Cloisite[®] 20A และ Cloisite[®] 30B) และบริษัท เคมิคอล อินโนเวชั่น จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd.) ที่ให้ความอนุเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond P[®] MZ 109D)



บทคัดย่อ

รายงานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดของออร์กาโนเคลย์ต่อลักษณะโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ สมบัติทางกล สมบัติทางกระแสวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านการกัดไฟของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ คอมโพสิทถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายในและขึ้นทศอบถูกเตรียมโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบฉีด ปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์ คือ 30 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิโพรพิลีน ออร์กาโนเคลย์ทางการค้าสามชนิด ได้แก่ คลอยไซท์ 15 เอ คลอยไซท์ 20 เอ และคลอยไซท์ 30 บี ถูกเติมในคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ในปริมาณ 3 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกใช้เพิ่มการยึดติดพื้นผิวระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ และช่วยการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในพอลิโพรพิลีน ปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ 5 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิโพรพิลีน

การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ในพอลิโพรพิลีน เพิ่มสมบัติการทนต่อแรงดึงและการทนต่อแรงดัดโค้งอย่างมีนัยสำคัญ แต่ลดค่าการทนต่อแรงกระแทกและค่าดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีน ความเสถียรทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนถูกปรับปรุง เมื่อมีเส้นใยป่านศรนารายณ์ แต่การต้านการกัดไฟลดลง การใส่ออร์กาโนเคลย์ลงในคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งลดลง แต่ค่าการทนต่อแรงกระแทกและค่ามอดูลัสไม่เปลี่ยนแปลง การต้านการกัดไฟของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใส่คลอยไซท์ 15 เอ และคลอยไซท์ 20 เอ แต่ปรับปรุงเมื่อใส่คลอยไซท์ 30 บี คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์และออร์กาโนเคลย์ชนิดคลอยไซท์ 30 บี แสดงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านการกัดไฟที่สูงที่สุด รูปแบบจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงลักษณะโครงสร้างแบบมีการแตกชั้นของออร์กาโนเคลย์สำหรับคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์และออร์กาโนเคลย์ชนิดคลอยไซท์ 30 บี ในขณะที่แสดงลักษณะโครงสร้างแบบการขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์สำหรับคอมโพสิทที่มีออร์กาโนเคลย์ชนิดคลอยไซท์ 15 เอ และออร์กาโนเคลย์ชนิดคลอยไซท์ 20 เอ

Abstract

This research aimed to study the effect of organoclay (OMMT) types on organoclay structure, mechanical properties, rheological properties, thermal properties, and flame retardant properties of polypropylene (PP)/sisal fiber (SF) composites. The composites were prepared using an internal mixer and test specimens were molded by an injection molding machine. Sisal fiber content was 30 phr. Three commercial OMMTs; Cloisite[®] 15A (C15A), Cloisite[®] 20A (C20A), and Cloisite[®] 30B (C30B) were added into PP/SF composites at 3 phr. In addition, maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) was used to enhance the interfacial adhesion between PP and SF and also to improve the dispersion of OMMT in PP. MAPP content was 5 phr.

The addition of sisal fiber in PP significantly increased tensile and flexural properties but decreased impact strength and melt flow index (MFI). Thermal stability of PP was improved with the presence of sisal fiber but its flame retardancy was worse. Incorporating OMMTs into PP/SF composites deteriorated tensile and flexural strength but retained modulus and impact strength. Flame retardancy of PP/SF composites insignificantly changed with the addition of C15A and C20A but improved with adding C30B. PP/SF/C30B composite showed the highest mechanical, thermal, and flame retarding properties. XRD patterns showed an exfoliated structure of the OMMT for PP/SF/C30B composite whereas they presented an intercalated structure of the OMMT for the composites containing C15A and C20A.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ภูมิหลัง	
2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ	6
2.2 นาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์	9
2.2.1 เคลย์	10
2.2.2 ออร์กาโนเคลย์.....	11
2.2.3 วิธีการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์	15
2.2.4 ชนิดของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์.....	15
2.3 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยธรรมชาติ และ ออร์กาโนเคลย์.....	16
2.3.1 สมบัติทางกล.....	17
2.3.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	19
2.3.3 สมบัติทางกระแสวิทยา	20
2.3.4 สมบัติทางความร้อน.....	20
2.3.5 สมบัติการต้านการติดไฟ.....	22
บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง	
3.1 วัสดุ	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การทดลอง.....	25
3.2.1 การเตรียมคอมโพสิต	25
3.2.2 การทดสอบสมบัติของคอมโพสิต.....	26
3.2.2.1 ลักษณะ โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์.....	26
3.2.2.2 สมบัติทางกล	26
3.2.2.3 สมบัติทางกระแสวิทยา.....	27
3.2.2.3 สมบัติทางความร้อน	27
3.2.2.3 สมบัติการต้านการติดไฟ	27
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติทางความร้อนของออร์กาโนเคลย์.....	29
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์.....	29
4.1.2 สมบัติทางความร้อน.....	30
4.2 ผลของชนิดของออร์กาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิต ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์.....	33
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์.....	33
4.2.2 สมบัติทางกล.....	35
4.2.3 สมบัติทางกระแสวิทยา	40
4.2.4 สมบัติทางความร้อน.....	40
4.2.5 สมบัติการต้านการติดไฟ.....	43
บทที่ 5 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	45
บรรณานุกรม	46
ประวัติผู้วิจัย	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ	6
2.2 สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติ	7
2.3 ราคาของวัสดุขนาดนาโนเมตร	10
3.1 สมบัติทางกายภาพของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด.....	24
3.2 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน	26
4.1 ค่ามอดูล 2 θ และระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด	30
4.2 สมบัติทางความร้อนของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด	32
4.3 ค่ามอดูล 2 θ และระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ของคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน.....	34
4.4 สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต	39
4.5 ค่าดัชนีการหักเหของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต	40
4.6 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต.....	42
4.7 อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต	44

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	8
2.2	11
2.3	12
2.4	13
2.5	16
3.1	25
3.2	28
4.1	30
4.2	31
4.3	32
4.4	34
4.5	36
4.6	36
4.7	37
4.8	38
4.9	42
4.10	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา วัสดุคอมโพสิตระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติได้รับความนิยมและมีความสำคัญมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและด้านงานวิจัย เนื่องจากการตระหนักในด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเศรษฐศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมแร่ธาตุทั่วไป (mineral fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ทาว (talc) เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยธรรมชาติมีข้อดีในด้านต่างๆ เช่น สามารถปลูกทดแทนได้ ราคาถูก หาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ สามารถย่อยสลายได้ในระบบชีวภาพ มีความแข็งแรงเฉพาะ (specific strength) ที่สูง และไม่อันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพคนงาน

เส้นใยธรรมชาติจัดเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปัจจุบันพบว่าการใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติในประเทศไทยนอกเหนือจากการส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีน้อยมาก จึงได้มีความพยายามในการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างของเส้นใยธรรมชาติที่ถูกนำมาศึกษาวิจัย ได้แก่ เส้นใยจากปอควีบา (kenaf) ปอกระเจา (jute) ปอแก้ว (rosells) ปอลินิน (flax) กัญชง (hemp) ป่านศรนารายณ์ (sisal) ฝ้าย (cotton) ไม้ไผ่ (bamboo) หญ้าแฝก (vetiver grass) ต้นกล้วย (banana bast) ปาล์ม (palm) กาบมะพร้าว (coir) เป็นต้น

เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นด้านความเหนียว และมีพื้นที่เพาะปลูกส่วนหนึ่งอยู่ที่อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันพื้นที่ปลูกป่านศรนารายณ์ลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกษตรกรประสบกับปัญหาผลผลิตราคาตกต่ำ การขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยว รวมทั้งการเปลี่ยนไปปลูกพืชชนิดอื่นๆ ที่เกษตรกรเห็นว่าง่ายและมีรายได้มากกว่า [เอกสารแผนพัฒนาการผลิตป่านศรนารายณ์] การนำเส้นใยธรรมชาติชนิดนี้มาใช้เป็นสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต น่าจะเป็นการเพิ่มขึ้นของรายได้ในภาคเกษตรกรรม ทั้งในรูปของการเพิ่มตลาดและการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) เป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีข้อดีต่างๆ เช่น ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ และมีสมบัติทางกลดี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การผลิตวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติมีปัญหาในเรื่องของความเข้ากันไม่ได้ของวัสดุทั้งสองชนิด เนื่องจากพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่วนเส้นใยธรรมชาตินั้นจัดเป็นวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้การยึดติดพื้นผิวระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติต่ำ

ส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตไม่ดี โดยทั่วไปจึงมีการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ สารช่วยให้เข้ากันที่นิยมใช้สำหรับพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ คือ พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride grafted polypropylene, MAPP) [Lee and Kim, 2009]

ข้อด้อยอีกประการหนึ่งของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ คือ มีสมบัติการติดไฟที่สูง ส่งผลให้การนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มีข้อจำกัด ดังนั้น การปรับปรุงการต้านการติดไฟของคอมโพสิตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง วิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพ คือ การเติมสารหน่วงไฟ (flame retardant) ได้แก่ สารประกอบฮาโลเจน (halogenated compounds) สารประกอบฟอสเฟต (phosphate compounds) สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) และระบบสารหน่วงเปลวไฟชนิดที่มีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (intumescent flame retardants) [Laoutid et al., 2009] อย่างไรก็ตาม สารหน่วงไฟเหล่านี้มีข้อเสีย เช่น การใช้สารประกอบอนินทรีย์จำพวกโลหะออกไซด์ ทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตลดลง เนื่องจากต้องเติมสารหน่วงไฟประเภทนี้ในปริมาณมากเพื่อให้การหน่วงไฟมีประสิทธิภาพ [Abu Bakar et al., 2010; Sain et al., 2004] ส่วนการใช้สารประกอบฮาโลเจน ก่อให้เกิดก๊าซพิษและเขม่าดำ เมื่อมีการเผาไหม้ นอกจากนี้ สารหน่วงเปลวไฟชนิดที่มีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนมีราคาที่สูง

ในช่วงที่ผ่านมา คอมโพสิตระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมขนาดนาโนเมตร (nanoscale fillers) ได้รับความสนใจและถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้ในการเพิ่มสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นอย่างมาก [Biswal et al., 2009; Ghasemi and Kord, 2009; Han et al., 2008; Hetzer and De Kee, 2008; Kord, 2011] ในปัจจุบัน สารตัวเติมขนาดนาโนเมตรที่นิยมใช้คือ นาโนเคลย์ (nanoclay) ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็ก มีพื้นที่ผิวที่ใหญ่ และมีสมบัติที่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในโมเลกุลต่างๆ ได้ดี โดยทั่วไปการเติมเคลย์ในปริมาณที่ต่ำ (ประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับการใช้สารตัวเติมทั่วไปที่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [Hetzer and De Kee, 2008] ต่อการปรับปรุงสมบัติในด้านต่างๆ เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน ความเสถียรของขนาด (dimensional stability) สมบัติการต้านการติดไฟ (flame retardancy) สมบัติการส่งผ่าน (barrier properties) [Biswal et al., 2009; Kord, 2011; Sinha Ray and Okamoto, 2003] ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเติมเคลย์ในคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ตามที่กล่าวมา คือ ต้องมีการกระจายตัวที่ดีของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เนื่องจากเคลย์ที่ได้จากธรรมชาตินั้นเป็นวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำจึงไม่เข้ากับพอลิโอเลฟิน ส่งผลให้การกระจายตัวเคลย์ในพอลิโอเลฟินต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการดัดแปรโครงสร้างของเคลย์ให้พื้นผิวมีความเป็นขั้วลดน้อยลง วิธีที่นิยมใช้ คือ การทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุ (cation exchange) โดยใช้สารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (organic cation) เรียกเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างว่า ออร์กา

โนเคลย์ (organoclay, OMMT) ในปัจจุบันพบว่ามีการค้าจำนวนมาก ซึ่งความแตกต่างของออร์กาโนเคลย์ทางการค้าแต่ละชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของเคลย์ ส่งผลต่อสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต [Santos et al., 2008] นอกจากนี้ มีการใช้สารช่วยให้เข้ากัน เช่น MAPP ในการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์อีกด้วย [Lee and Kim, 2009; Yeh and Gupta, 2010]

ในโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยต้องการศึกษาผลของชนิดของออร์กาโนเคลย์ต่อลักษณะโครงสร้างของออร์แกโนเคลย์ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสมบัติการต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ เพื่อเปรียบเทียบคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ และที่ไม่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ รวมทั้งหาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตตามแนวทางการวิจัยนี้เป็นวิธีหนึ่งสำหรับการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมเฉพาะทางต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อให้ศึกษาผลของชนิดออร์กาโนเคลย์ต่อสมบัติสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสมบัติต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดสั้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสมบัติต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดสั้น
2. ศึกษาลักษณะโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสมบัติต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดสั้นที่มีการใส่ออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน ที่ปริมาณคงที่
3. ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกระแสไฟฟ้า และสมบัติต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดสั้นที่มีและไม่มีการใส่ออร์กาโนเคลย์

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร ปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ใช้ คือ 30 ส่วนใน 100 ส่วนพอลิเมอร์ (phr) ออร์กาโนเคลย์สามชนิดที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Cloisite® 15A

Cloisite[®] 20A และ Cloisite[®] 30B ปริมาณที่ใช้คือ 3 phr นอกจากนี้ มีการใช้สารช่วยให้เข้ากัน คือ พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPP) ในปริมาณ 5 phr คอมโพลีเมอร์ถูกเตรียมโดยเครื่องบดภายใน (internal mixer) และขึ้นงานทดสอบถูกนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด (injection molding machine)

2. การทดสอบสมบัติของออร์กาโนเคลย์และคอมโพลีเมอร์

- ลักษณะโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ (organoclay structure) โดยใช้เครื่อง x-ray diffractometer

- สมบัติทางกล

- สมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile properties) โดยใช้เครื่อง universal testing machine

- สมบัติการทนต่อแรงคดโค้ง (flexural properties) โดยใช้เครื่อง universal testing machine

- สมบัติการทนต่อแรงกระแทก (impact properties) โดยใช้เครื่อง impact tester

- สมบัติทางกระแสวิทยา

- ดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) โดยใช้เครื่อง melt flow indexer

- สมบัติทางความร้อน

- อุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature) โดยใช้เครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA)

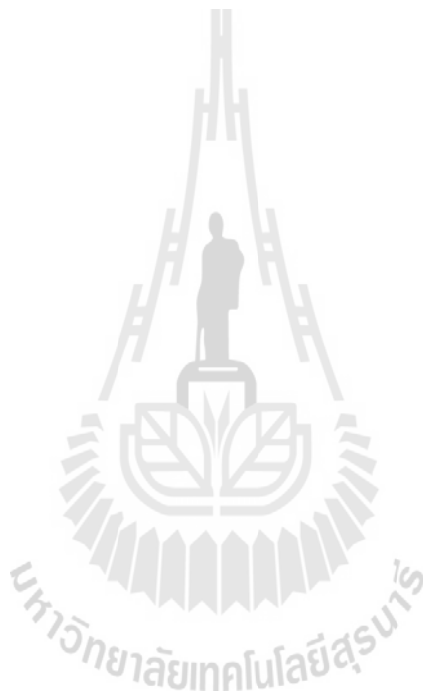
- สมบัติการต้านการติดไฟ

- อัตราการเผาไหม้ (burning rate) โดยใช้เครื่อง horizontal vertical flame chamber instrument

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้พอลิเมอร์คอมโพลีเมอร์ชนิดใหม่ที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การใช้งานจริง
2. เป็นองค์ความรู้สำหรับการวิจัยขั้นถัดไปในด้านการพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพลีเมอร์โดยใช้ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
3. เป็นการเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานและมูลค่าให้กับป่านศรนารายณ์ ความร้อน สมบัติทางกระแสวิทยา สมบัติต้านการติดไฟ และฐานฐานวิทยาของคอมโพลีเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดสั้นที่มีและไม่มีการใส่ออร์กาโนเคลย์

4. เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองภายในประเทศจากการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้วัตถุดิบจากทรัพยากรในประเทศ
5. เป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
6. ได้เอกสารวิชาการที่ตีพิมพ์ระดับประเทศ/หรือระดับนานาชาติ
7. เป็นการส่งเสริมและพัฒนาแก่นักวิจัยรุ่นใหม่



บทที่ 2

ภูมิหลัง

2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การนำเอาเส้นใยธรรมชาติมาเป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในวงการอุตสาหกรรมและการทำวิจัย จุดเด่นของเส้นใยธรรมชาติที่เหนือกว่าเส้นใยประดิษฐ์จำพวก เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน คือ เส้นใยธรรมชาติมีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถผลิตขึ้นได้ใหม่ ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ สิ่งแวดล้อมและเครื่องจักร รวมทั้งมีสมบัติทางกลที่ดี [Mohanty et al., 2005] ส่วนประกอบที่สำคัญของเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) และลิกนิน (lignin) ปริมาณของส่วนประกอบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับอายุ ชนิด แหล่งที่มา ตลอดจนสภาพที่ใช้ในการสกัดเพื่อผลิตเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของเส้นใยนั้นๆ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง และความเหนียว เป็นต้น โดยทั่วไป สมบัติทางกลของเส้นใยเป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกเส้นใยเพื่อนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต [Beckerman, 2007; Li, 2009] ตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติและสมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติตามลำดับ

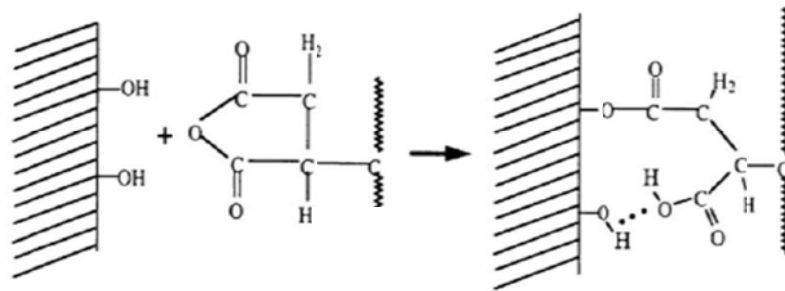
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ [Bismarch et al., 2005]

Fiber	Cellulose (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)	Waxes (wt%)
Flax	71	18.6–20.6	2.2	2.3	1.7
Hemp	70–74	17.9–22.4	3.7–5.7	0.9	0.8
Jute	61–71.5	13.6–20.4	12–13	0.2	0.5
Ramie	68.6–76.2	13.1–16.7	0.6–0.7	1.9	0.3
Coir	32–43	0.15–0.25	40–45	3–4	–
Sisal	66–78	10–14	10–14	10	2
Cotton	89–90	5.7	–	0–1	0.6

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติ [Kozłowski and Władyska-Przybylak, 2008]

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation to break (%)
Flax	1.40	800–1500	60–80	1.2–1.6
Hemp	1.48	550–900	70	1.6
Jute	1.46	400–800	10–30	1.8
Ramie	1.50	500	44	2
Coir	1.25	220	6	15–25
Sisal	1.33	600–700	38	2–3
Cotton	1.51	400	12	3–10

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ในการทำคอมโพสิตกับเส้นใยธรรมชาติชนิดสั้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีราคาถูก และอุณหภูมิจนรูปที่ต่ำ ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่วนเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีสมบัติชอบน้ำ ทำให้แรงยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัสดุทั้งสองไม่ดี ส่งผลให้คอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลที่ไม่ดี วิธีที่นิยมใช้กันมากในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิโพรพิลีน คือ การเติมสารช่วยให้เข้ากันได้ (compatibilizer) เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิโพรพิลีน (maleic anhydride grafted polypropylene, MAPP) โดยเกิดพันธะเคมีและพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยธรรมชาติและ MAPP ส่วนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนของ MAPP จะเข้ากับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์โดยเกิดอันตรกิริยาแบบกายภาพ (entanglement) ทำให้การยึดติดที่พื้นผิวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้น [Pandey et al., 2010] รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของ MAPP และเส้นใยธรรมชาติที่อินเทอร์เฟซ มีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าการเติม MAPP ส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [Arzondo et al., 2005; Feng et al., 2001; Gu and Kokta, 2009; Pickering et al., 2007; Rana et al., 1998]



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างของ MAPP และเส้นใยธรรมชาติที่อินเทอร์เฟส [Beckerman, 2007]

นอกจากสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติที่กล่าวมาข้างต้น สมบัติการต้านการติดไฟ เป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาตินั้นติดไฟได้ดี เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างและส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิด มิงานวิจัยพบว่า การเติมเส้นใยธรรมชาติลงในพอลิโพรพิลีน ทำให้วัสดุคอมโพสิตนั้นติดไฟได้ง่ายขึ้น Sain et al. [Sain et al., 2004] พบว่าการเติมขี้เลื่อย (sawdust) หรือ แกลบข้าว (rice husk) ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเพิ่มขึ้น Suppakarn และ Jarukumjorn (2009) พบว่าอัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์สูงกว่าของพอลิโพรพิลีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตนั้นมีสมบัติการติดไฟที่สูง

การปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติโดยการเติมสารหน่วงไฟ (flame retardants) ได้แก่ สารประกอบฮาโลเจน (halogenated compounds) สารประกอบฟอสเฟต (phosphate compounds) สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) และระบบสารหน่วงไฟชนิดที่มีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (intumescent flame retardants) [Zhang and Horrocks, 2003] แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สารประกอบฮาโลเจนก่อให้เกิดก๊าซพิษและเขม่าในขณะเผาไหม้ [Guo et al., 2007] นอกจากนี้ ในการที่ต้องการได้ประสิทธิภาพในการต้านการติดไฟของคอมโพสิตที่ดัดนั้น ต้องมีการใช้ปริมาณสารหน่วงไฟในปริมาณที่ค่อนข้างมาก โดยทั่วไปจะใช้ในปริมาณมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตลดลง [Jang and Lee, 2001; Sain et al., 2004]

สารหน่วงไฟที่นิยมใช้มากกับพอลิเมอร์ คือ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate, APP) [Chen and Wang, 2010] Abu bakar และคณะ (2010) พบว่า APP เป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้กับวัสดุที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น เซลลูโลส และพอลิ

เมอร์บางตัวที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ APP เป็นทั้งสารหน่วงไฟรวมทั้งเป็นสารด้านการเกิดควัน โดย APP จะทำให้เกิดถ้ำ (char) บนพื้นผิวของวัสดุ เพื่อป้องกันการเกิดการเสียหายของวัสดุ

Jeencham, Suppakarn และ Jarukumjorn (2009) พบว่า การเติม APP จะช่วยลดอัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ การเพิ่มปริมาณของ APP จาก 10 phr ถึง 40 phr ช่วยลดอัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์นั้นมีสมบัติการต้านทานการติดไฟที่ดีขึ้นเมื่อมีการเติม APP อย่างไรก็ตาม พบว่า การเติม APP ทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติการทนต่อแรงคดงอ และสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตลดลง

Abu bakar และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาสมบัติการติดไฟและสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ที่มีการเติม APP พบว่า การเติม APP ที่ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานการติดไฟให้กับคอมโพสิต โดยศึกษาจากผลของค่าปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟ (limiting oxygen index, LOI) ของคอมโพสิตที่มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ APP เป็นสารหน่วงไฟในคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ไปลดสมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติการทนต่อแรงคดโค้ง และสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิต

จากข้อเสียของการใช้สารหน่วงไฟทั้งในด้านของผลเสียที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมและการลดลงของสมบัติทางกลของคอมโพสิต ทำให้มีความสนใจในสารเสริมแรงระดับนาโนเมตรมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการติดไฟของคอมโพสิต

2.2 นาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา นาโนคอมโพสิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติอย่างมีนัยสำคัญ พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต ประกอบด้วยพอลิเมอร์และสารเสริมแรงที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร เช่น นาโนเคลย์ (nanoclays) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) เส้นใยนาโน (nanofibers) และนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (nanotitanium dioxide) [Koo, 2005] การเติมสารเสริมแรงที่มีขนาดระดับนาโนเมตรในการทำคอมโพสิต ทำให้สมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตนั้นดีขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้สารเสริมแรงที่มีขนาดระดับไมครอน สารเสริมแรงในระดับนาโนเมตรที่ใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ และเคลย์เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบวัสดุสองตัวนี้ พบว่า เคลย์มีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิตมากกว่า เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าและมีการผลิตในทางการค้า ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบราคาของวัสดุนาโนที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงเพื่อทำนาโนคอมโพสิต นอกจากนี้ ยังพบว่าลักษณะโครงสร้างของเคลย์ ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูง ซึ่งเหมาะสมอย่างมากที่จะนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ และ

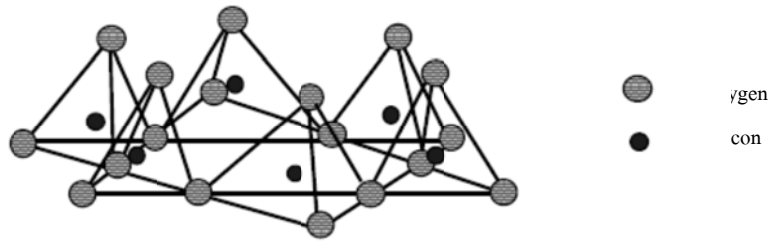
ที่สำคัญคือ การเติมเคลย์ในปริมาณที่น้อยมากลงในพอลิเมอร์ ซึ่งโดยปกติใช้ปริมาณน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านการส่งผ่าน และสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.3 ราคาของวัสดุนาโนเมตร [Koo, 2005]

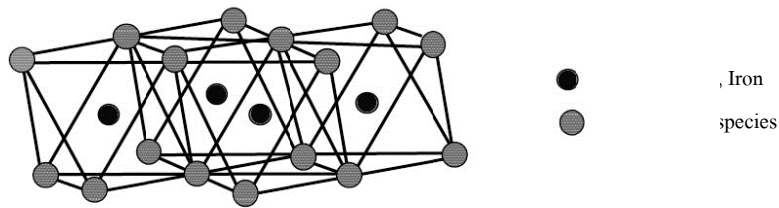
Type of nanoparticles	Cost
Montmorillonite organoclays (OMMT)	\$3.50/lb
Nanosilica	\$8.50/lb
Carbon nanofibers	\$85/lb
Polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS)	\$500/lb
Multi-wall carbon nanotubes (MWNTs)	\$3,000/lb
Single-wall carbon nanotubes (SWNTs)	\$227,000/lb
Nanoaluminium oxide	\$11.80/lb
Nanotitanium dioxide	\$11.80/lb

2.2.1 เคลย์

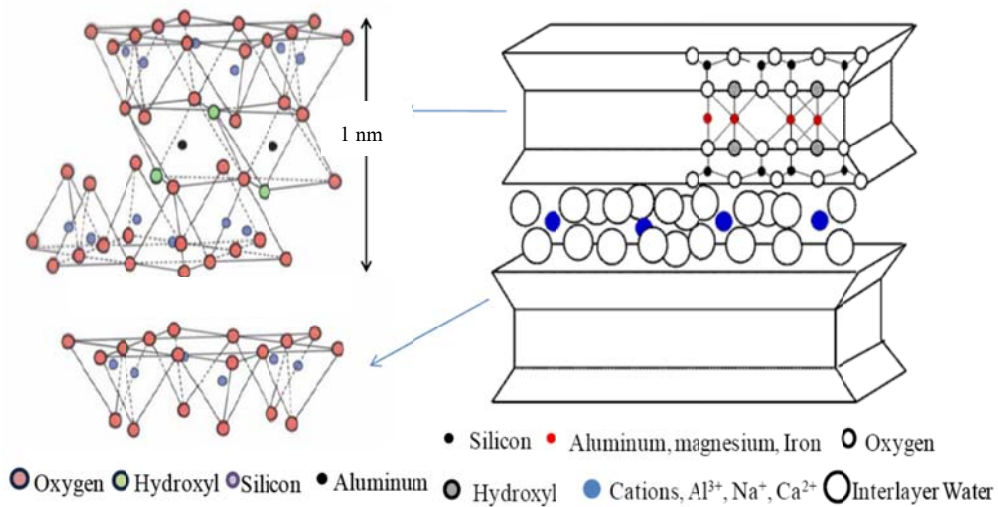
เคลย์ที่นิยมใช้มากในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite, MMT) จัดเป็นเคลย์ที่มีลักษณะเป็นชั้นซิลิเกตต่อกันเป็นชั้นๆ จัดอยู่ในกลุ่ม 2:1 layered หรือ phyllosilicates มอนต์มอริลโลไนต์มีความแข็งแรงและความแข็งสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange Capacity, CEC) สูง มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูง มีพื้นที่ผิวสูง และสมบัติการดูดซับที่ดี นอกจากนี้ มีอยู่มากในธรรมชาติและราคาถูก [Barick and Tripathy, 2010; Sardashti, 2009] โครงสร้างผลึกประกอบไปด้วย ชั้นอะลูมิเนียมออกเตดราฮีดรอล (aluminium octahedral) มีความหนาในระดับนาโนเมตร ที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระฮีดรอล (silicate tetrahedral sheet) ซึ่งเรียกว่า 2:1 type ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ระหว่างชั้นมีช่องว่างซึ่งไอออนประจุบวก (cation) ได้แก่ โซเดียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน ทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น



Tetrahedral silicate sheet structure of clay



Octahedral silicate sheet structure of clay



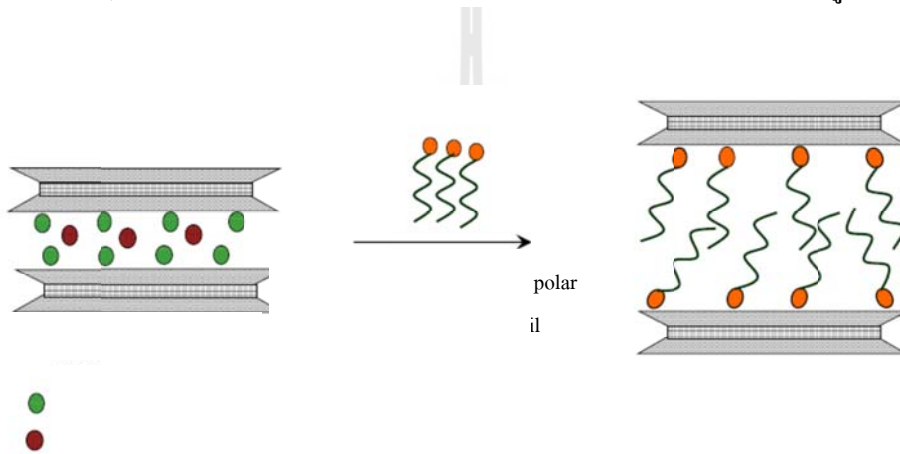
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT), 2:1 layered silicates [Sardashti, 2009]

2.2.2 ออร์กาโนเคลย์

เคลย์จากธรรมชาติมีพื้นผิวที่มีสมบัติชอบน้ำ ดังนั้นเคลย์จึงมีอันตรกิริยาที่ดีกับพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymers) มากกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymers) ความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิโอสเตฟินกับเคลย์ ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของเคลย์ ส่งผลให้สมบัติของคอมโพสิตไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการดัด

แปรเคลย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ (organic surfactants) เพื่อให้พื้นผิวของเคลย์มีความไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้เกิดการแตกตัวที่ดีของเคลย์

เคลย์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ จะถูกเรียกว่า ออร์กาโนเคลย์ (organoclay, OMMT) โดยทั่วไปออร์กาโนเคลย์ได้มาจากการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ ซึ่งโดยมากเป็นแอมโมเนียมไอออนประจุบวก (ammonium cations) ซึ่งมีสายโซ่อัลคิลที่ประกอบด้วย primary, secondary, tertiary, and quaternary alkylammonium or alkylphosphonium cations ซึ่งไปแทนที่ไอออนประจุบวกของโลหะ (metal cation) ที่อยู่ระหว่างชั้นในชั้นซิลิเกต ทำให้ระยะห่างของชั้นของเคลย์มีระยะห่างเพิ่มมากขึ้น [Charu, 2008; He et al., 2010; Santos et al., 2008] การตัดแปรพื้นผิวของเคลย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวแสดงในรูปที่ 2.3

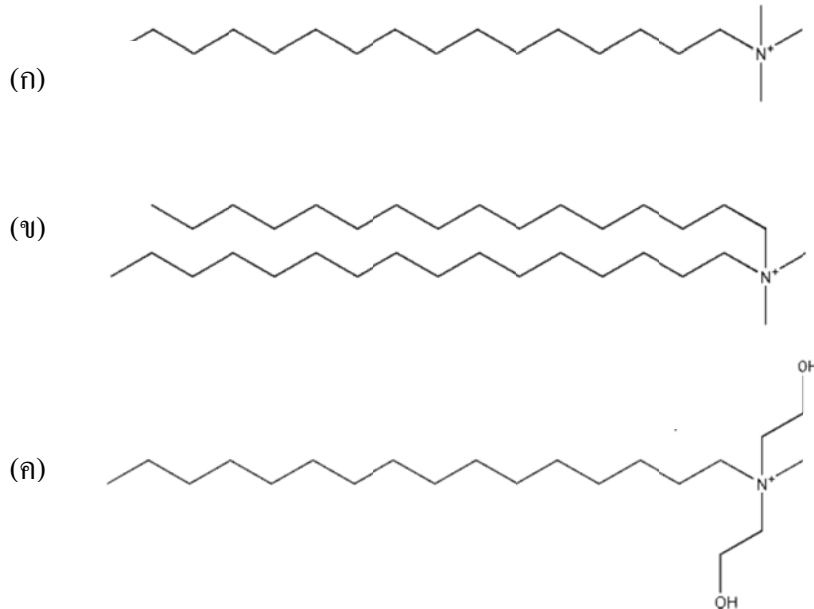


รูปที่ 2.3 การตัดแปรพื้นผิวของเคลย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ [Sardashti, 2009]

ปัจจุบัน พบว่ามีการผลิตออร์กาโนเคลย์ในทางการค้าโดยบริษัทต่างๆ เช่น บริษัท Southern Clay Products และบริษัท Nanocor ซึ่งเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ในประเทศสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ ยังมีบริษัท Rheox Source Clay Mineral และบริษัท Kunimine เป็นผู้ผลิตในประเทศญี่ปุ่น บริษัท Sud-Chemie ในประเทศเยอรมัน บริษัท Laviosa Chimica Mineraria ในประเทศอิตาลี และหลายๆ บริษัทในประเทศจีน

สารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ชนิดแอมโมเนียมไอออนที่นิยมนำมาใช้ในออร์กาโนเคลย์ทางการค้าแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแอมโมเนียมไอออน (N^+) สามารถประกอบด้วยสายโซ่อะลิฟาติก (aliphatic) หนึ่งสายโซ่ดังรูปที่ 2.4(ก) และ 2.4(ค) หรืออาจประกอบด้วยสายโซ่อะลิฟาติก 2 สายโซ่ดังรูปที่ 2.4(ข) ตำแหน่งอื่นๆ สามารถถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เมทิล (methyl group) หรือหมู่ไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl group) ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) และ 2.4(ค) ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้หมู่แอมโมเนียมใหญ่และมีความชอบน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ สายโซ่สามารถประกอบด้วย ส่วนที่นำมา

จากไขมันจากธรรมชาติ เช่น ทาโล (tallow) หรือไฮโดรจิเนท ทาโล (hydrogenated tallow) ซึ่งในสายโซ่ประกอบด้วย สายโซ่ที่มีคาร์บอน 18 อะตอม (C-18) 16 อะตอม (C-16) และ 14 อะตอม (C-14) ในอัตราส่วน 65:30:5 หรือสายโซ่นั้นอาจจะนำมาจากผลิตผลของน้ำมันมะพร้าว ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่ที่มีคาร์บอน 12 อะตอม (C-12) และ 16 อะตอม (C-16) [Xie et al. 2001]



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่นิยมใช้ในออร์กาโนเคลย์ทางการค [Charu, 2008]

ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรเคลย์ให้เป็นออร์กาโนเคลย์นั้น ส่งผลสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพของนาโนคอมโพสิทระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์ โดยทั่วไป ความยาวสายโซ่มีความสำคัญ เพราะยิ่งสายโซ่มีจำนวนของคาร์บอนอะตอมมาก จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เพิ่มมากขึ้น และความแข็งแรงของพันธะระหว่างชั้นของเคลย์ลดลง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้นของเคลย์ได้ [Giannelis et al., 1999] Reichert และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาผลของความยาวสายโซ่ของแอมโมเนียมไอออนที่นำมาดัดแปรเคลย์ต่อสมบัตินิวทริกและสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมโพสิท ซึ่งพบว่า ค่ามอดูลัสของนาโนคอมโพสิทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความยาวสายโซ่มีคาร์บอน 12 อะตอม และได้ค่ามอดูลัสสูงสุดที่ความยาวสายโซ่มีคาร์บอน 16 อะตอม Fomes และคณะ (2002) พบว่าความยาวสายโซ่ที่มีคาร์บอนประมาณ 18 อะตอม ให้สมบัติทางกลของไนลอนนาโนคอมโพสิทที่ดีที่สุด แต่ความยาวสายโซ่มีคาร์บอน 12 อะตอมและ 22 อะตอม ไม่ส่งผลอย่างนัยสำคัญต่อค่ามอดูลัส นอกจากความยาวของ

สายโซ่ แล้ว จำนวนสายโซ่ (1 หรือ 2) การมีพันธะคู่ในสายโซ่ และหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ บนแอมโมเนียมไอออนมีความสำคัญเช่นกัน ออร์กาโนเคลย์ที่ได้จากสารลดแรงตึงที่มีหมู่อัลคิลยาวหนึ่งหมู่มีการแตกตัว (exfoliation) และค่ามอดูลัสที่ดีกว่าสารลดแรงตึงที่มีหมู่อัลคิลยาวสองหมู่ Fornes และคณะ (2002) ศึกษาผลของระดับความอิ่มตัวของสายโซ่ที่ได้มาจาก tallow (saturated tallow) ของแอมโมเนียมไอออนต่อสมบัติทางกลของนาโนคอมโพสิต สายโซ่ที่เป็น tallow มีความไม่อิ่มตัว เช่น พันธะคู่ นอกจากนี้ สามารถทำการไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) เพื่อลดจำนวนพันธะคู่ พบว่าการทำไฮโดรจิเนชันของ tallow ไม่มีผลต่อสมบัติทางกลของนาโนคอมโพสิต

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า ในปัจจุบันนี้มีออร์กาโนเคลย์ทางการค้าหลายชนิด ซึ่งความแตกต่างของออร์กาโนเคลย์เหล่านั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปร รวมทั้งปริมาณที่ใช้ การศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดของออร์กาโนเคลย์ทางการค้าต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตยังมีไม่มากนัก

Santos และคณะ (2008) ศึกษาผลของชนิดของออร์กาโนเคลย์ต่อค่ามอดูลัสดัดโค้ง (flexural modulus) ของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและออร์กาโนเคลย์ MAPP ถูกเติมในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Cloisite[®] 15A และ Cloisite[®] 20A เป็นออร์กาโนเคลย์ทางการค้าที่ถูกนำมาศึกษาและเปรียบเทียบซึ่งถูกใช้ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดนี้ถูกดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ชนิดเดียวกัน คือ กลีโกลเทอรานาเรียมแอมโมเนียมที่มีสายโซ่ยาว 2 สายโซ่ที่ได้มาจาก tallow โดยจะมีส่วนประกอบของสายโซ่ที่มีคาร์บอนอะตอม 18 อะตอม 16 อะตอม และ 14 อะตอม ในอัตราส่วน 65:30:5 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปร Cloisite[®] 15A มากกว่า Cloisite[®] 20A เมื่อทำการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่า Cloisite[®] 15A มีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์มากกว่า Cloisite[®] 20A คือ 3.39 นาโนเมตร และ 2.68 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ออร์กาโนเคลย์ที่ถูกดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้ระยะห่างของชั้นของเคลย์มากขึ้นด้วย เมื่อมีการเปรียบเทียบนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิด พบว่านาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและ Cloisite[®] 20A มีค่ามอดูลัสดัดโค้งสูงกว่านาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและ Cloisite[®] 15A เป็นเพราะปริมาณของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปร Cloisite[®] 20A นั้นมีปริมาณที่น้อยกว่า Cloisite[®] 15A ทำให้ Cloisite[®] 20A มีสมบัติที่ชอบสารอินทรีย์ (organophilic) น้อยกว่า Cloisite[®] 15A หรือยังคงมีความเป็นขั้วที่สูงกว่า Cloisite[®] 15A ดังนั้นนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและ Cloisite[®] 20A มีความสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้วของ MAPP ได้มากกว่านาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและ Cloisite[®] 20A เมื่อ MAPP ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่อยู่บนผิวของเคลย์ ชั้นของเคลย์แต่ละแผ่นเกิดการกระจายตัวและแยกออก

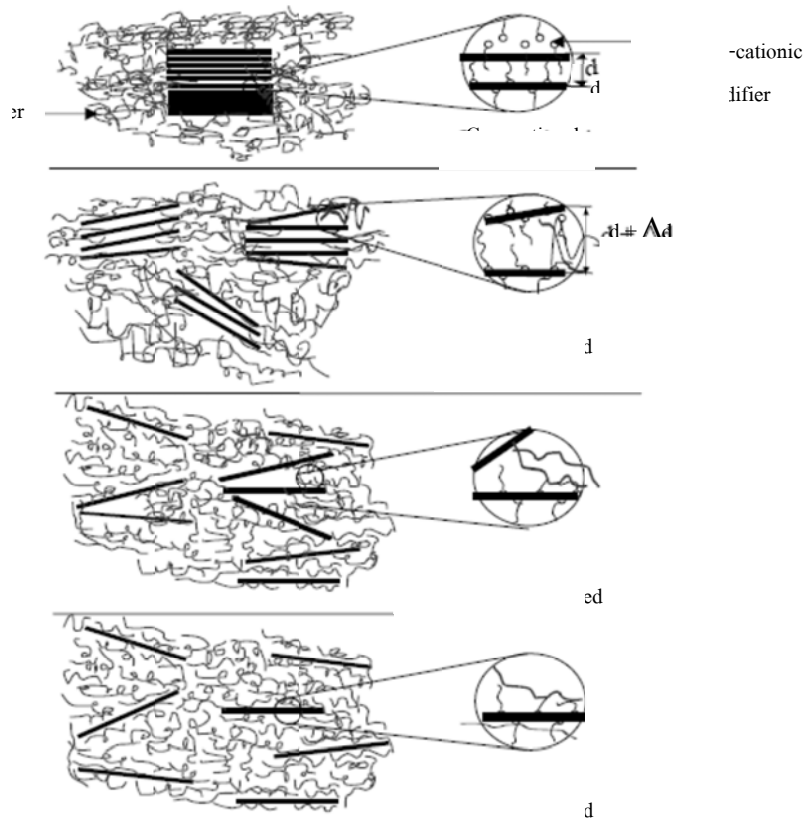
จากกัน ซึ่งทำให้เคลย์เกาะกลุ่มกันลดลง จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) แสดงให้เห็นว่า เกิดการแทรกสอดของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์ (intercalated) และพบการแยกออกจากกันของชั้นของเคลย์เป็นบางส่วน (partially exfoliated) ในนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิไพรีนและ Cloisite[®] 20A ส่วนภาพถ่าย TEM ของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิไพรีนและ Cloisite[®] 15A แสดงการเกาะกลุ่มของเคลย์และการแทรกสอดของสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่างชั้นของเคลย์

2.2.3 วิธีการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์

โดยทั่วไป นาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์ สามารถเตรียมได้ 3 วิธี คือ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชัน (in situ polymerization) วิธีการใช้สารละลาย (solution method) และกระบวนการหลอม (melt intercalation) เมื่อเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการเตรียมนาโนคอมโพสิตทั้ง 3 วิธีในช่วงที่ผ่านมา พบว่า กระบวนการหลอมเป็นวิธีที่ใช้กันมากในการเตรียมนาโนคอมโพสิต โดยเฉพาะในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากวิธีนี้ไม่มีการใช้สารละลายซึ่งช่วยลดต้นทุนและช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม [Koo, 2005; Pannirselvam, 2008; Sinha Ray and Okamoto, 2003] นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้กับเครื่องจักรที่ใช้กับการเตรียมนาโนคอมโพสิตรวมทั้งสามารถใช้และประยุกต์เข้ากับเครื่องจักรที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เครื่องอัดรีดและเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดได้อีกด้วย [Hetzer and De Kee, 2008; Sinha Ray and Okamoto, 2003]

2.2.4 ชนิดของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์

ลักษณะการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ สามารถนำมาจำแนกชนิดของนาโนคอมโพสิตได้ดังแสดงในรูป 2.5 ลักษณะการกระจายตัวของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์ คือ การกระจายตัวของชั้นของเคลย์และการแยกออกจากกัน (exfoliation) ตามด้วยการเกิดการแทรกสอดของสายโซ่พอลิเมอร์ในระหว่างชั้นของเคลย์ (intercalation) [Koo, 2005] สำหรับนาโนคอมโพสิตแบบขยายชั้น (intercalated nanocomposite) สายโซ่ของพอลิเมอร์จะแทรกระหว่างชั้นของเคลย์ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เพิ่มขึ้น แต่ยังคงโครงสร้างแบบเป็นชั้นของเคลย์และไม่เกิดการแยกออกจากกัน ส่วนนาโนคอมโพสิตแบบแตกชั้น (exfoliated nanocomposite) จะเกิดการกระจายตัวของชั้นของเคลย์ได้ดีกว่านาโนคอมโพสิตแบบแทรกสอด เนื่องจากชั้นของเคลย์จะถูกทำลาย และสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี นอกจากนี้สามารถพบลักษณะของนาโนคอมโพสิตที่เป็นแบบขยายชั้นและแตกชั้นร่วมกัน



รูปที่ 2.5 ชนิดของนาโนคอมโพสิตและลักษณะการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [Lee, 2008]

2.3 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยธรรมชาติ และออร์กาโนเคลย์

คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ และนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ในช่วงเวลาไม่นานมานี้ พบว่า มีงานวิจัยที่เตรียมคอมโพสิตที่มีทั้งพอลิเมอร์ เส้นใยธรรมชาติ และออร์กาโนเคลย์ การเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่น้อยลงในคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ สามารถปรับปรุงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านการส่งผ่าน และสมบัติการต้านการติดไฟ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การเติมออร์กาโนเคลย์ปรับปรุงสมบัติต่างๆในพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ ต้องมีแรงยึดติดที่แข็งแรงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และเคลย์ และต้องมีการกระจายตัวของเคลย์ที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [Pannirselvam, 2008; Sinha Ray and Okamoto, 2003] ดังนั้น จึงต้องมีการเติมสารช่วยให้เข้ากันได้ (compatibilizer) เพื่อช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้และเพิ่มแรงยึดติด โดยเฉพาะในกรณีพอลิโอเลฟิน ซึ่งมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ และเส้นใยธรรมชาติซึ่งมีสมบัติความชอบน้ำ ในขณะเดียวกัน การเติมสารช่วยให้เข้ากันได้ยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และเคลย์ และยังช่วย

ให้เคลย์สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้นอีกด้วย [Han et al., 2008; Hetzer and Dee Kee, 2008, Lee and Kim, 2008, and Lei et al., 2007]

2.3.1 สมบัติทางกล

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีการศึกษาผลของการปริมาณของเคลย์และสารช่วยยให้เข้ากัน ได้ต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติเป็นจำนวนมาก Lee และ Kim (2009) พบว่า เมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 1 phr ทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึงและแรงดัดโค้งรวมทั้งค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากคอมโพสิตที่มีออร์กาโนเคลย์มีพลังงานการดูดซับมากกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีออร์กาโนเคลย์

Lei และคณะ (2007) พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดัดโค้งของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) กับผงไม้เพิ่มขึ้นเมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณเพียง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่ามอดูลัสของแรงดึงและแรงดัดโค้งของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของออร์กาโนเคลย์ ส่วนค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าลดลง 7.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณของออร์กาโนเคลย์จาก 1 เป็น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิต

Biswal และคณะ (2009) ทำการศึกษาผลของปริมาณออร์กาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยจากใบสับปะรด (pineapple leaf fiber) พบว่าการเติมปริมาณออร์กาโนเคลย์ 1-3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ และ 20.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าลดลงประมาณ 7.5 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่ 5-7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มสมบัติทางกลของคอมโพสิต

Kord และคณะ (2010) ศึกษาสมบัติทางกลของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน ผงไม้ และออร์กาโนเคลย์ซึ่งใช้ในปริมาณ 0 3 และ 6 phc (per hundred compound) ปริมาณ MAPP ที่ใช้ คือ 2 phc พบว่า ค่ามอดูลัสของแรงดึงและแรงดัดโค้งของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ลงไป 3 phc และเมื่อเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์เป็น 6 phc พบว่า ค่ามอดูลัสของแรงดึงและแรงดัดโค้งของคอมโพสิตลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกาะกลุ่มของเคลย์ ค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน

Reddy และคณะ (2010) เตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยจากฟางข้าว (wheat straw) และออร์กาโนเคลย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยจากฟางข้าว ปริมาณของออร์กาโนเคลย์ และปริมาณของ MAPP ที่มีต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิต

พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยจากฟางข้าวในคอมโพสิตถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้น ออร์กาโนเคลย์เพิ่มค่ามอดูลัสต่อแรงดัดโค้งของคอมโพสิต นอกจากนี้การเพิ่ม MAPP ในปริมาณ 2-4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้งของคอมโพสิตอีกด้วย

ในทางตรงกันข้าม Han และคณะ (2008) พบว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 2-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับเส้นใยจากไผ่ลดลง เนื่องจากการเคลื่อน (migration) ของเคลย์ไปยังอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม การเติม MAPE ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เส้นใยจากไผ่ และออร์กาโนเคลย์

นอกจากปริมาณของออร์กาโนเคลย์ และปริมาณของสารช่วยให้กันจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตแล้ว Yeh และ Gupta (2010) พบว่า กระบวนการในการผสมมีผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตเช่นกัน ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน ผงไม้ และออร์กาโนเคลย์เป็นสองกระบวนการ ปริมาณของ MAPP ถูกเติมในปริมาณที่มากเกินไป กระบวนการที่หนึ่ง วัสดุทั้งหมดจะถูกเติมในเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบหลอมเหลวชนิดเกลียวคู่ (twin screw extruder) ในครั้งเดียวกัน ส่วนอีกกระบวนการหนึ่งจะแยกการผสมเป็นสองขั้นตอน คือ ในขั้นตอนที่หนึ่ง พอลิโพรพิลีน ผงไม้ และ MAPP จะถูกผสมในเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบหลอมเหลวชนิดเกลียวคู่ก่อน จากนั้นนำเม็ดคอมโพสิตดังกล่าวมาผสมกับออร์กาโนเคลย์อีกครั้งในเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบหลอมเหลวชนิดเกลียวคู่ โดยใช้สภาวะเดียวกัน จากผลการศึกษา พบว่าคอมโพสิตที่มีการเตรียมโดยผ่านการผสมสองขั้นตอนมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าคอมโพสิตที่ผ่านการผสมในครั้งเดียว เนื่องจากคอมโพสิตที่มีการผสมสองครั้งนั้น ในขั้นตอนแรก พอลิโพรพิลีน ผงไม้ และ MAPP สามารถเกิดแรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงไม้ทำให้เกิดความแข็งแรงมากกว่า อย่างไรก็ตาม ค่ามอดูลัสของคอมโพสิตระหว่างคอมโพสิตของสองกระบวนการนี้ไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก MAPP ที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตมีปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นออร์กาโนเคลย์จึงเกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ในระดับเดียวกัน

2.3.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

โดยทั่วไป ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตถูกทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) และจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) [Koo, 2005; Sinha Ray and Okamoto, 2003] Lei และคณะ (2007) ศึกษาผลของการเติมสารช่วยเข้า

กันได้ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ผงไม้ และ ออร์กาโนเคลย์ รูปแบบจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นของคอมโพสิตที่มีปริมาณของออร์กาโนเคลย์ที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยปรากฏตำแหน่งของพีคที่มุมที่เล็กกว่า นั่นคือ ระยะห่างระหว่างของชั้นเคลย์เพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการเกิดการแทรกสอดของสายโซ่พอลิเมอร์ในระหว่างชั้นของเคลย์ และมีลักษณะโครงสร้างแบบมีการขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์ (intercalated structure) เมื่อมีการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (maleic anhydride grafted polyethylene, MAPE) ลงไปในคอมโพสิต จะไม่ปรากฏลักษณะของพีค แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตที่มีการเติมสารช่วยให้เข้ากันนี้ มีลักษณะโครงสร้างแบบการแทรกชั้นของออร์กาโนเคลย์ นอกจากนี้ Han และคณะ (2008) พบว่าสารช่วยให้เข้ากันจำเป็นในการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เส้นใยจากไม้ และออร์กาโนเคลย์ เพื่อให้ออร์กาโนเคลย์สามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์และทำให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์แยกออกจากกัน (exfoliation) และปริมาณของ MAPE ที่ใช้เพิ่มขึ้นตามปริมาณของออร์กาโนเคลย์ที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิต

Ghasemi และ Kord (2009) ศึกษาผลของปริมาณของออร์กาโนเคลย์และสารช่วยให้เข้ากันต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน ผงไม้ และออร์กาโนเคลย์ จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่า เมื่อใช้ MAPP ที่ปริมาณ 2 phc นาโนคอมโพสิตที่มีออร์กาโนเคลย์ 3 phc จะปรากฏพีคขึ้นที่ตำแหน่ง $2\theta = 4.48^\circ$ ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 1.97 nm และพีคของนาโนคอมโพสิตที่มีออร์กาโนเคลย์ 6 phc ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง $2\theta = 4.54^\circ$ ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 1.94 nm แสดงลักษณะโครงสร้างแบบมีการขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์ (intercalated structure) เมื่อเพิ่มปริมาณของ MAPP เป็น 4 phc พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ในคอมโพสิตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงผลสอดคล้องกับรูปแบบที่ได้จากเทคนิค XRD นาโนคอมโพสิตที่มี MAPP ในปริมาณที่มากกว่า จะแสดงการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดีกว่า

Reddy และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยจากฟางข้าว และออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า พีคของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับออร์กาโนเคลย์ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งที่เปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อคำนวณโดยใช้สมการของแบร์ริก (Bragg's equation) แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เพิ่มขึ้น นั่นคือ เกิดโครงสร้างแบบมีการขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์ (intercalated structure) เมื่อใส่ออร์กาโนเคลย์เข้าไปในคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยจากฟางข้าว พีคมีการเลื่อนไปที่มุมที่ต่ำกว่าของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับออร์กาโนเคลย์ ซึ่งแสดง

ให้เห็นว่าคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยจากฟางข้าว และออร์กาโนเคลย์ มีอัตราขยายชั้น (degree of intercalation) มากกว่าคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับออร์กาโนเคลย์

2.3.2 สมบัติทางกระแสวิทยา

ในการศึกษาถึงความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ จำเป็นต้องเข้าใจถึงสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์ในขณะที่อยู่ในสภาวะที่กำลังหลอม ซึ่งมีงานวิจัยรายงานว่าการเติมเคลย์ ซึ่งมีอนุภาคระดับนาโนลงไปในพอลิเมอร์ มีผลต่อสมบัติทางกระแสวิทยาของพอลิเมอร์เมทริกซ์ [Lei et al., 2006; Sinha Ray and Okamoto, 2003; Wang et al., 2007] การเข้าใจถึงสมบัติทางกระแสวิทยาของนาโนคอมโพสิท ไม่เพียงแต่เป็นความรู้เพื่อใช้ในการขึ้นรูป แต่ยังช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิทหรือนาโนคอมโพสิทเหล่านี้ด้วย

Zhong และคณะ (2007) ศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์ต่อความหนืดของคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนกับผงไม้ด้วยเครื่องคาปิลารี วิโอมิเตอร์ (capillary rheometer) พบว่าค่าความหนืดเฉือนของคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนกับผงไม้ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่ส่งผลกระทบต่อการขึ้นรูปของคอมโพสิท

Sardashi (2009) ศึกษาค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนเส้นใยฟางข้าว และออร์กาโนเคลย์ ซึ่งมีปริมาณของเส้นใยจากฟางข้าว ปริมาณของออร์กาโนเคลย์ และปริมาณของสารช่วยให้เข้ากันได้ต่างๆ กัน พบว่า การเพิ่มปริมาณของเส้นใย ทำให้ค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิทลดลง การเติมสารช่วยให้เข้ากันได้ (MAPP) เพิ่มค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิทเนื่องมาจากค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำของหมู่แอนไฮไดรด์ที่กราฟท์พอลิเมอร์ ส่วนการเติมออร์กาโนเคลย์ทำให้ค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิทลดลง

2.3.4 สมบัติทางความร้อน

โดยทั่วไป ความเสถียรต่อความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ถูกศึกษาโดยใช้เครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA) น้ำหนักที่สูญเสีย (weight loss) เนื่องจากสารระเหยหลังจากการเสียดสภาพที่อุณหภูมิสูงถูกติดตามเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ความเสถียรทางความร้อนของนาโนคอมโพสิทถูกปรับปรุง เนื่องจากเคลย์ทำหน้าที่คล้ายกับเป็นฉนวนและตัวต้านการถ่ายโอนมวลสารระเหยและ เคลย์ยังช่วยในการทำให้เกิดเถ้า (char) ระหว่างการสลายตัวทางความร้อน ในช่วงต้นของการสลายตัวทางความร้อน โดยทั่วไป เคลย์จะเคลื่อนการสลายตัวไปที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากนั้นชั้นของซิลิเกตที่ซ้อนกันสามารถเก็บความร้อนที่ถูกสะสมซึ่งสามารถถูกใช้เป็นแหล่งความร้อนในการเร่งกระบวนการสลายตัวร่วมกับการไหลของความร้อนที่มาจากแหล่งความร้อนภายนอก (Pannirselvam, 2008; Sinha Ray and Okamoto, 2003)

Lei และคณะ (2007) ศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์ต่อสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับผงไม้ ในกรณีของคอมโพสิทที่ไม่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ ปรากฏพิคในการสลายทางความร้อน 2 พิค พิคที่หนึ่งเกิดจากการสลายทางความร้อนของไม้ ซึ่งปรากฏขึ้นที่อุณหภูมิ 351-352 องศาเซลเซียส พิคที่สองเกิดจากการสลายทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งเกิดที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส การเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายทางความร้อนและพิคที่หนึ่งของคอมโพสิทลดลง เนื่องมาจากการปล่อยสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำของสารลดแรงดึงผิวที่นำมาตัดแปรผิวของเคลย์ นอกจากนี้ พบว่า ปริมาณเถ้าของคอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในเคลย์ไปปกคลุมพื้นผิวของวัสดุพอลิเมอร์ทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอได้ช้า ส่งผลให้ความเสถียรต่อความร้อนของคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับผงไม้เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมออร์กาโนเคลย์

Lee และคณะ (2008) ศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีน ผงไม้ และออร์กาโนเคลย์ การเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 1 ถึง 5 phr เพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสีย (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, $T_{50\%}$) เนื่องจากชั้นซิติลเกิดไปขัดขวางการแพร่ของสารระเหยที่เกิดขึ้นในขณะการสลายตัว การเติมสารช่วยให้เข้ากัน ในคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนกับออร์กาโนเคลย์ก็ช่วยเพิ่ม $T_{50\%}$ เนื่องจากสารช่วยให้เข้ากันช่วยให้การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น นอกจากนี้ การเติมผงไม้ในปริมาณ 10 phr และ 20 phr เพิ่ม $T_{50\%}$ ของคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนกับออร์กาโนเคลย์ แต่ $T_{50\%}$ ของคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนกับออร์กาโนเคลย์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้เป็น 30 phr

Lee และ Kim (2009) พบว่า การเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณ 1 phr เพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสีย (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, $T_{5\%}$) ของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ เนื่องจากออร์กาโนเคลย์ช่วยลดการซึมผ่านของออกซิเจนและแสดงพฤติกรรมเป็นฉนวนป้องกันความร้อน

Biswal และคณะ (2009) รายงานผลของออร์กาโนเคลย์ต่อสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยจากใบสับปะรด การเติมเส้นใยจากใบสับปะรดช่วยให้พอลิโพรพิลีนมีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยไปเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัวทางความร้อน ในกรณีของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยสับปะรด ปรากฏพิคในการสลายตัวทางความร้อน 2 พิค พิคที่หนึ่งปรากฏที่อุณหภูมิระหว่าง 249 ถึง 342.3 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการสลายตัวของน้ำในเซลลูโลสและพันธะไกลโคซิดิก และการแตกของพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน (C-O) และพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน (C-C) ส่วน

ฟิลที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 361 องศาเซลเซียส และ 432 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยจากใบสับปะรดเหลือปริมาณของเส้นใยประมาณ 2.1 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเส้นใยจากใบสับปะรดมีลักษณะเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถสร้างเส้นใยในระหว่างการสลายตัวทางความร้อน และเส้นใยสามารถช่วยลดอัตราการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์ด้วยการเป็นชั้นที่ปกป้องไม่ให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในบริเวณที่มีการเผาไหม้ ส่งผลต่อการลดลงของการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุ [Abu bakar et al., 2010] ส่วนการเติมออร์กาโนเคลย์ลงไปคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยจากใบสับปะรดช่วยเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและสุดท้าย คอมโพสิทที่มีปริมาณของเส้นใยเหลืออยู่ถึง 7.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติมออร์กาโนเคลย์ช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยจากใบสับปะรด

2.3.5 สมบัติการต้านการติดไฟ

สมบัติการต้านการติดไฟจัดเป็นสมบัติที่สำคัญของนาโนคอมโพสิท ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิทที่มีการเติมสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ พบว่า การเติมเคลย์ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งการใช้เคลย์ในปริมาณที่น้อยในคอมโพสิทช่วยให้คอมโพสิทที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก และง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูป ในขณะที่เดียวกัน เคลย์เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ จึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารหน่วงไฟชนิดอื่นๆ

ปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของนาโนคอมโพสิท คือ ต้องมีการกระจายตัวที่ดีของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้มีลักษณะโครงสร้างแบบเคลย์เกิดการขยายชั้น (intercalated structure) หรือเกิดลักษณะโครงสร้างแบบเคลย์เกิดการแตกจากกัน (exfoliated structure) โดยทั่วไป กลไกที่สำคัญในการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์/เคลย์ นาโนคอมโพสิท คือ การเกิดเส้นใยของซิลิเกตหรือเคลย์บนพื้นผิวของนาโนคอมโพสิทระหว่างที่มีการเผาไหม้ ชั้นของเส้นใยที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นชั้นขวาง (barrier) ในการป้องกันวัสดุจากความร้อนและออกซิเจนและลดการปลดปล่อยสารระเหยที่ติดไฟซึ่งเกิดในระหว่างการเสถียรภาพของพอลิเมอร์ ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟ [Kiliaris and Papaspyrides, 2010; Laoutid et al., 2009; Pannirselvam, 2008; Sinha Ray and Okamoto, 2003]

Lee และคณะ (2010) เตรียมนาโนคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทอไลน์ความหนาแน่นสูง เส้นใยจากไม้ และออร์กาโนเคลย์ ซึ่งมีปริมาณออร์กาโนเคลย์และระดับการกระจายตัวของเคลย์ต่างกัน วิธีในการเตรียมนาโนคอมโพสิทแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การผสมโดยตรง (direct melt blending) และการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ (masterbatch) พบว่า นาโนคอมโพสิทที่ผ่านการเตรียมมาสเตอร์แบตช์มีการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดีกว่าการผสมโดยตรงและแสดงลักษณะโครงสร้างของเคลย์เป็นแบบแตกชั้น (exfoliated structure) ส่วนนาโนคอมโพสิทที่ผ่านการ

เตรียมแบบการผสมโดยตรง มีลักษณะโครงสร้างของเคลือบแบบขยายชั้น (intercalated structure) เมื่อศึกษาอัตราการเผาไหม้ (burning rate) ของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีที่ต่างกัน พบว่า นาโนคอมโพสิตที่ผ่านการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเคลือบแบบแตกจากกันมีอัตราการเผาไหม้ต่ำกว่าของนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการเตรียมแบบผสมโดยตรงซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของเคลือบแบบขยายชั้น เนื่องจาก มีอัตราการแตกตัวของเคลือบสูงกว่า ทำให้เคลือบสามารถคลุมพื้นผิวของวัสดุและเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่า

Kord (2011) ศึกษาผลของปริมาณของออร์กาโนเคลือบต่อสมบัติการติดไฟของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ผงแคลบ และออร์กาโนเคลือบ พบว่า ปริมาณของเถ้าของนาโนคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของออร์กาโนเคลือบ เนื่องมาจากการสร้างชั้น carbonaceous silicate บนพื้นผิวซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน อัตราการเผาไหม้ และอัตราการปลดปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิง (heat release rate, HRR) ของนาโนคอมโพสิตลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของออร์กาโนเคลือบ นอกจากนี้ การเติมออร์กาโนเคลือบลงในคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับผงแคลบยังช่วยลดการเกิดควันอีกด้วย



บทที่ 3

วัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุ

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) เกรด P700J ได้รับมาจากบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด เส้นใยป่านสรนารายณ์ (sisal fiber, SF) ซึ่งมาจากกลุ่มแม่บ้านหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ต.บ้านเก่า อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ใช้มีความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร ออร์กาโนเคลย์สามชนิด (OMMT) ได้แก่ Cloisite[®] 15A Cloisite[®] 20A และ Cloisite[®] 30B ได้รับมาจากบริษัท เซาเทิร์น เคลย์ โพรดักส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา สมบัติทางกายภาพของออร์กาโนเคลย์และโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรผิวของเคลย์แสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ตามลำดับ พอลิโพรพิลีนกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride grafted polypropylene; MAPP) ซึ่งมีปริมาณของหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้รับมาจากบริษัท เคมิคอล อินโนเวชั่น จำกัด

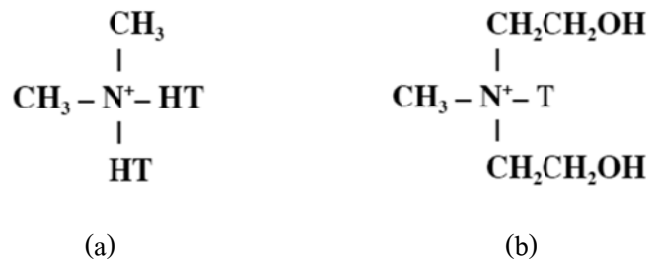
ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด [<http://www.scprod.com>]

OMMTs	Organic modifier	Modifier concentration (meq/100 g clay)	%Weight loss on ignition	Gallery distance (Å)
Cloisite [®] 15A	2M2HT ^a	125	43	31.5
Cloisite [®] 20A	2M2HT ^a	95	38	24.2
Cloisite [®] 30B	MT2EtOH ^b	90	30	18.5

Typical dry particle sizes of OMMTs: $D_{10} = 2 \mu\text{m}$, $D_{50} = 6 \mu\text{m}$, and $D_{90} = 13 \mu\text{m}$

^a 2M2HT: dimethyl, dihydrogenated tallow, quaternary ammonium

^b MT2EtOH: methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการตัดแปรผิวของออร์กาโนเคลย์ (a)

Cloisite[®] 15A และ Cloisite[®] 20A where HT is hydrogenated tallow (approximately 65% C-18, 30% C-16, 5% C-14) และ (b) Cloisite[®] 30B where T is tallow (approximately 65% C-18, 30% C-16, 5% C-14) [<http://www.scprod.com>]

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมคอมโพสิต

ก่อนทำการผสม เส้นใยป่านศรนารายณ์และออร์กาโนเคลย์ถูกอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส คอมโพสิตถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer, Haake Rheomix, 3000p) โดยใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 170 องศาเซลเซียส ปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์ ออร์กาโนเคลย์ และสารช่วยให้เข้ากันได้ที่ใช้คือ 30 phr 3 phr และ 5 phr ตามลำดับ โดยขั้นแรกใส่พอลิโพรพิลีนและสารช่วยให้เข้ากันได้ลงไป 3 นาที จากนั้นเติมออร์กาโนเคลย์และเส้นใยป่านศรนารายณ์ลงไป รวมเวลาที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตทั้งสิ้น 15 นาที หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้ไปบดและนำไปฉีดเป็นชิ้นทดสอบโดยเครื่องฉีด (injection molding machine, Chuan Lih Fa, CLF 80T) ชื่อและส่วนประกอบของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชื่อและส่วนประกอบของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน

Designation	PP (phr)	SF (phr)	OMMTs (phr)			MAPP (phr)
			® Cloisite 15A	® Cloisite 20A	® Cloisite 30B	
PP	100	-	-	-	-	-
PP/SF/5MAPP	100	30	-	-	-	5
PP/SF/C15A/MAPP	100	30	3	-	-	5
PP/SF/C20A/5MAPP	100	30	-	3	-	5
PP/SF/C30B/MAPP	100	30	-	-	3	5

3.2.2 การทดสอบสมบัติของคอมโพสิต

3.2.2.1 ลักษณะโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์

การศึกษาลักษณะโครงสร้างและระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์และออร์กาโนเคลย์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction analysis, XRD) ทำโดยใช้เครื่อง Bruker, D5005 ที่มีแหล่งกำเนิดแสง X-ray เป็น Cu K α โดยใช้ความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ใช้กำลังไฟฟ้า 40 กิโลวัตต์ และกระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ และใช้มุม 2 θ ตั้งแต่ 2 องศา ถึง 10 องศา โดยใช้อัตราเร็ว 1 องศาต่อนาที ในการเตรียมตัวอย่างของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะถูกเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มบางโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding machine, Labtech, L1320) ส่วนกรณีของออร์กาโนเคลย์ จะถูกเตรียมในรูปของผง (powder) หลังจากนั้นทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ (d-spacing) จากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) แสดงในสมการที่ 3.1

$$\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

โดยที่ λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เท่ากับ 0.15406 นาโนเมตร d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกมีหน่วยเป็นนาโนเมตร และ θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

3.2.2.2 สมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile properties) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่อง universal testing

machine (Instron, 5565) โดยใช้เซลล์วัดแรง (load cell) 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที และมีความยาวของเกท (gauge length) 80 มิลลิเมตร

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัดโค้ง (flexural properties) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, 5565) โดยใช้วิธีการทดสอบแบบกด 3 จุด (three point bending mode) ใช้เซลล์วัดแรง (load cell) 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 15 มิลลิเมตรต่อนาที และมีความยาวช่วง 56 มิลลิเมตร

การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (unnotched Izod impact strength) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยใช้เครื่อง impact testing machine (Atlas, BPI)

3.2.2.3 สมบัติทางกระแสวิทยา

ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238 ด้วยเครื่อง melt flow indexer (Kayeness, 4004) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม

3.2.2.4 สมบัติทางความร้อน

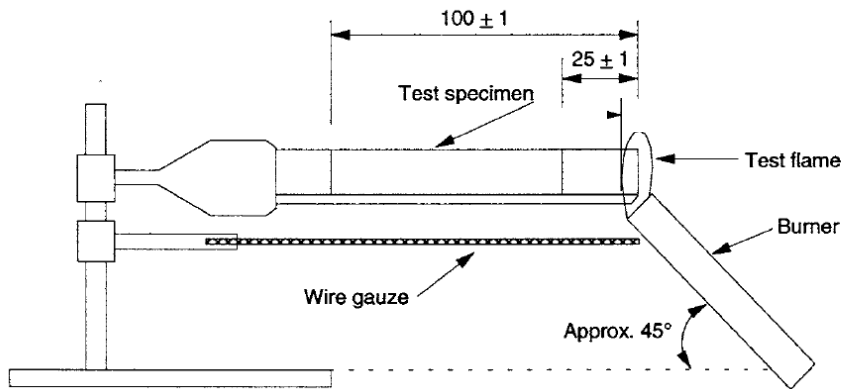
การทดสอบหาค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (decomposition temperature) ของออร์กาโนเคลย์ พอลิโพรพิลีน และพอลิเมอร์คอมโพสิตทำโดยนำไปทำสอบด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TA Instruments, SDT2960) โดยทำการชั่งน้ำหนักสาร 10-15 มิลลิกรัม นำมาให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศของอากาศ (air atmosphere)

3.2.2.5 สมบัติการต้านการติดไฟ

การทดสอบการต้านการติดไฟของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์คอมโพสิตทำได้โดยการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน (horizontal burning test) ตามมาตรฐาน ASTM D 635 ใช้เครื่อง horizontal vertical flame chamber instrument (Atlas, HVUL) ขนาดของชิ้นทดสอบที่ใช้คือ 127 มิลลิเมตร×12.7 มิลลิเมตร×3.0 มิลลิเมตร ลักษณะการติดตั้งชิ้นทดสอบแสดงในรูปที่ 3.2 อัตราการเผาไหม้ถูกคำนวณตามสมการที่ 3.2

$$V = 60L/t \quad (3.2)$$

โดยที่ V คือ อัตราการเผาไหม้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที L คือ ระยะทางในการเผาไหม้ซึ่งหมายถึงที่ระยะทาง 25 ถึง 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของชิ้นทดสอบ เท่ากับ 75 มิลลิเมตร และ t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จากระยะทาง 25 ถึง 100 มิลลิเมตรมีหน่วยเป็นนาที



รูปที่ 3.2 การติดตั้งชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน [ASTM Standard D 635, 2006]



บทที่ 4

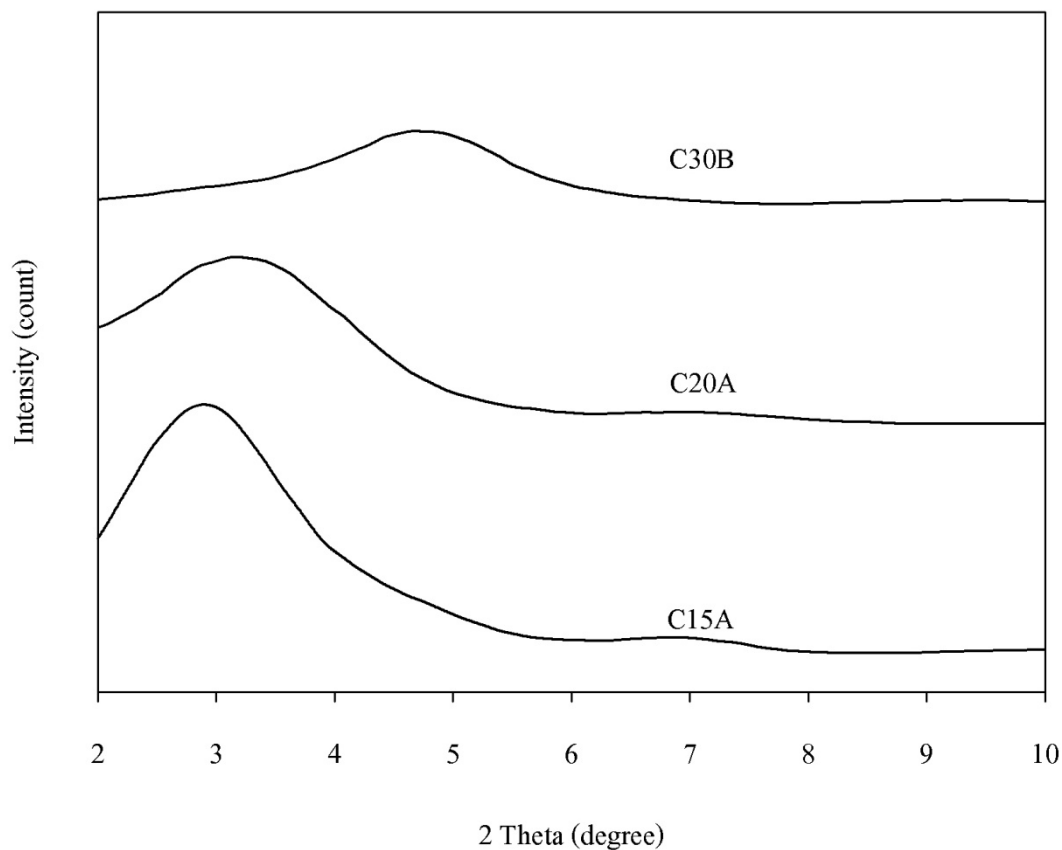
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติทางความร้อนของออร์กาโนเคลย์

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเคลย์ ในลักษณะที่เกิดการขยายชั้นของเคลย์ (intercalated structure) หรือเกิดการแตกชั้นกันของเคลย์ (exfoliated structure) รวมทั้งคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ (d-spacing) จากสมการของแบร็กก์ (Bragg's equation) [Chiu et al., 2004; Sardashti, 2009]

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟ XRD ของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด ได้แก่ Cloisite[®] 15A (C15A) Cloisite[®] 20A (C20A) และ Cloisite[®] 30B (C30B) ค่ามุม 2θ และระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิดแสดงในตารางที่ 4.1 C15A และ C20A ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ (organic surfactant) ชนิดเดียวกัน คือ dimethyl, dihydrogenated tallow, quaternary ammonium ที่มีสายโซ่ยาว 2 สายโซ่ที่มาจาก hydrogenated tallow ฟังก์ชันของ C15A ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.87° ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 3.08 นาโนเมตร ส่วนฟังก์ชันของ C20A ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 3.31° ซึ่งจะมียุทธศาสตร์ห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 2.67 นาโนเมตร การที่ระยะห่างระหว่างชั้นของ C15A มากกว่าของ C20A เนื่องจากในการดัดแปรโครงสร้างของ C15A ใช้ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์สูงกว่า [Santos et al., 2008] ในกรณีของ C30B ซึ่งถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ต่างชนิด คือ methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium ที่มีสายโซ่ยาวเพียงหนึ่งสายที่มาจาก tallow และมีหมู่ไฮดรอกซิลเอทิล 2 หมู่ จาก XRD pattern พบว่า ฟังก์ชันของ C30B ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 4.81° ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 1.84 นาโนเมตร



รูปที่ 4.1 กราฟ XRD ของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด

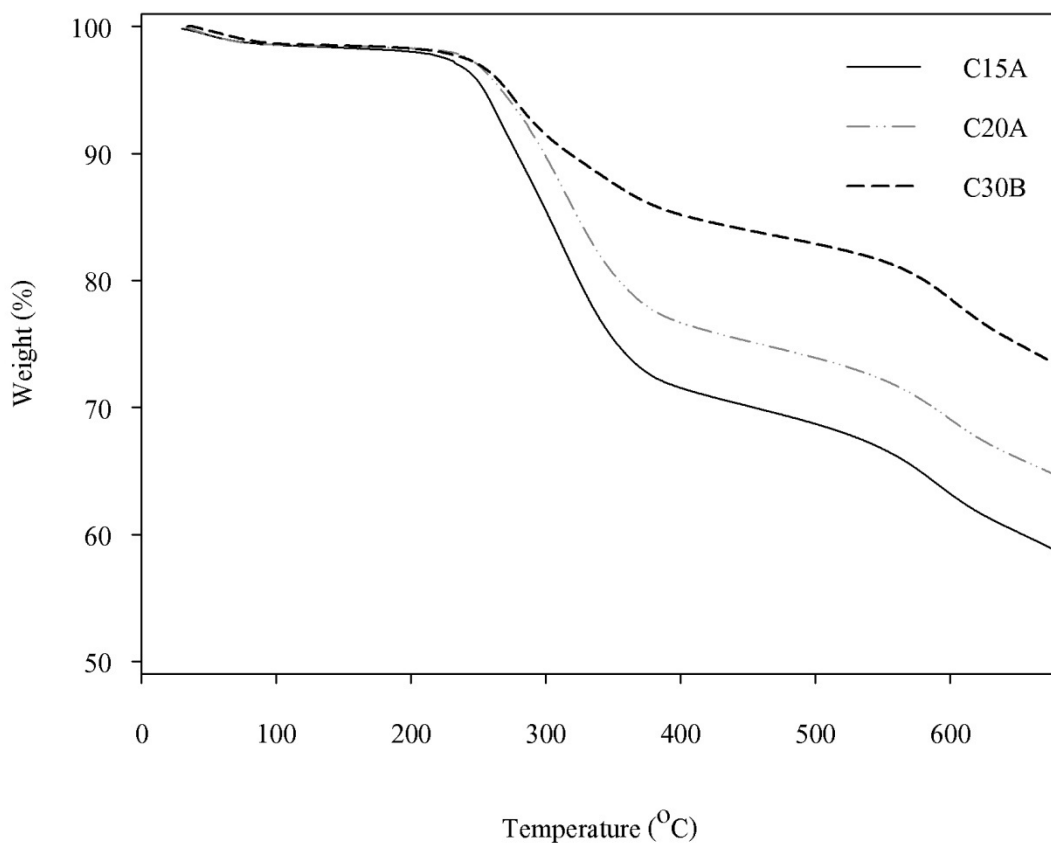
ตารางที่ 4.1 ค่ามุม 2θ และระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด

Designation	2 Theta (degree)	Interlayer spacing (nm)
C15A	2.87	3.08
C20A	3.31	2.67
C30B	4.81	1.84

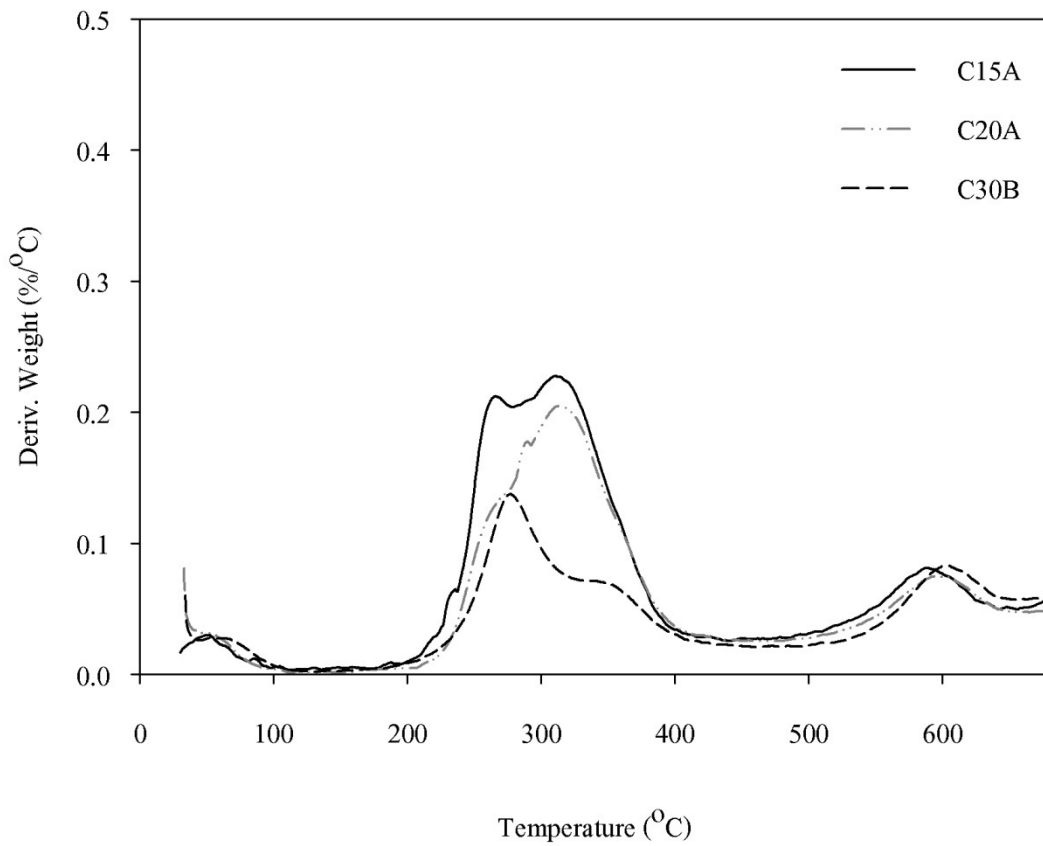
4.1.2 สมบัติทางความร้อน

Thermogravimetric analysis (TGA) นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงกราฟ TGA และ DTG ของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิดตามลำดับ และตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด

พบว่าออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลง 3 ลำดับ การเปลี่ยนแปลงลำดับที่หนึ่ง(1st transition) ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการระเหยของความชื้นและน้ำที่อยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์ ลำดับ การเปลี่ยนแปลงลำดับที่สอง (2nd transition) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่นำมาใช้ในการดัดแปรเคลย์ การเปลี่ยนแปลงลำดับที่สาม (3rd transition) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการกำจัดน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของเคลย์ ซึ่งสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของออร์กาโนเคลย์ในลักษณะเดียวกันนี้ได้ถูกรายงาน โดย Marras และคณะ (2007) และ Xie และคณะ (2001)



รูปที่ 4.2 กราฟ TGA ของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด



รูปที่ 4.3 กราฟ DTG ของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด

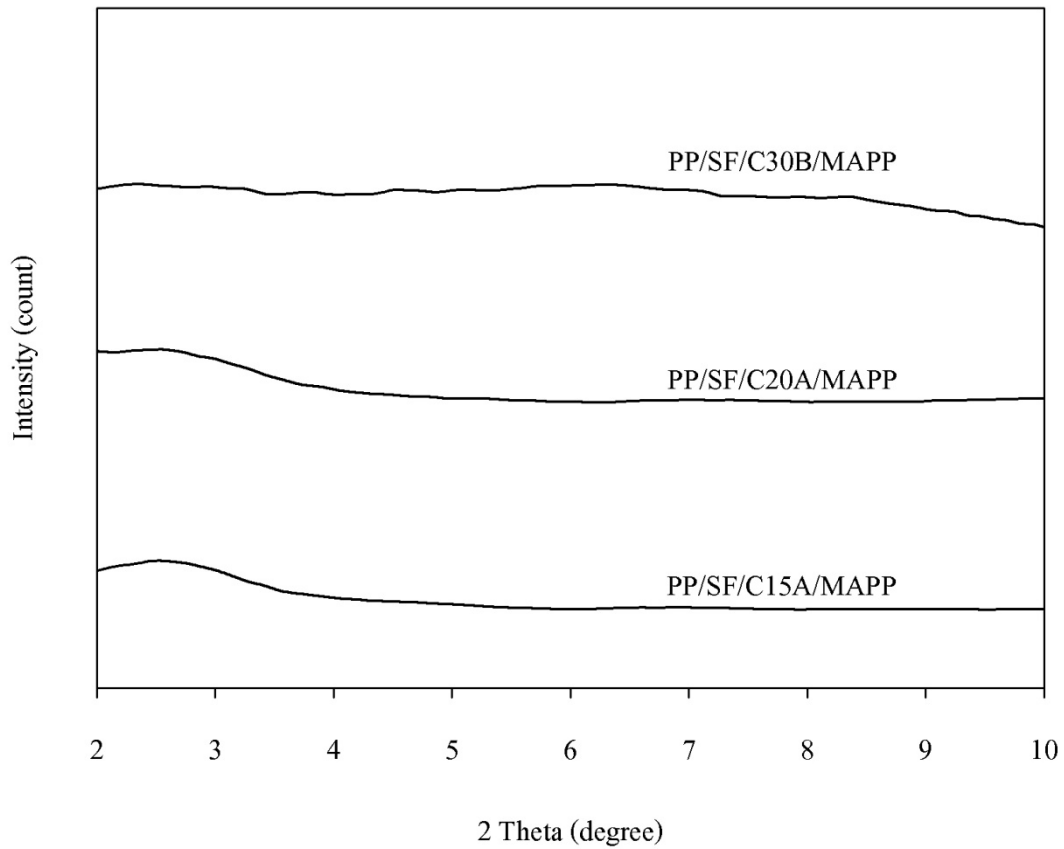
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิด

Designation	T_d (°C)		
	1 st transition	2 nd transition	3 rd transition
C15A	51	305	588
C20A	50	308	595
C30B	53	273	602

4.2 ผลของชนิดของออร์กาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตระหว่างพอลิพรพิลีนและเส้นใยป่านครนารายณ์

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์

กราฟ XRD และค่ามุม 2θ และระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ของคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกันแสดงดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ ตำแหน่งพีคของ PP/SF/C15A/MAPP ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.54° มีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 3.48 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับข้อมูลของ XRD ของ C15A ซึ่งมีค่า 2θ เท่ากับ 2.87° และมีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 3.08 นาโนเมตร พบว่า มีการเคลื่อนพีคไปที่มุมที่ต่ำกว่า และระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เพิ่มขึ้น ดังนั้น PP/SF/C15A/MAPP แสดงลักษณะโครงสร้างแบบขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์ (intercalated structure) [Kord et al., 2010; Sinha Ray and Okamoto, 2003] ส่วนตำแหน่งพีคของ PP/SF/C20A/MAPP ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.54° และมีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เท่ากับ 3.48 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ใน C20A ดังนั้น PP/SF/C20A/MAPP แสดงลักษณะโครงสร้างแบบการขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์เช่นเดียวกัน สำหรับ PP/SF/C30B/MAPP ไม่ปรากฏตำแหน่งของพีคขึ้น ดังนั้น PP/SF/C30B/MAPP แสดงลักษณะโครงสร้างแบบการแตกชั้นกันของออร์กาโนเคลย์ (exfoliated structure) [Barick and Tripathy, 2010; Sinha Ray and Okamoto, 2003]



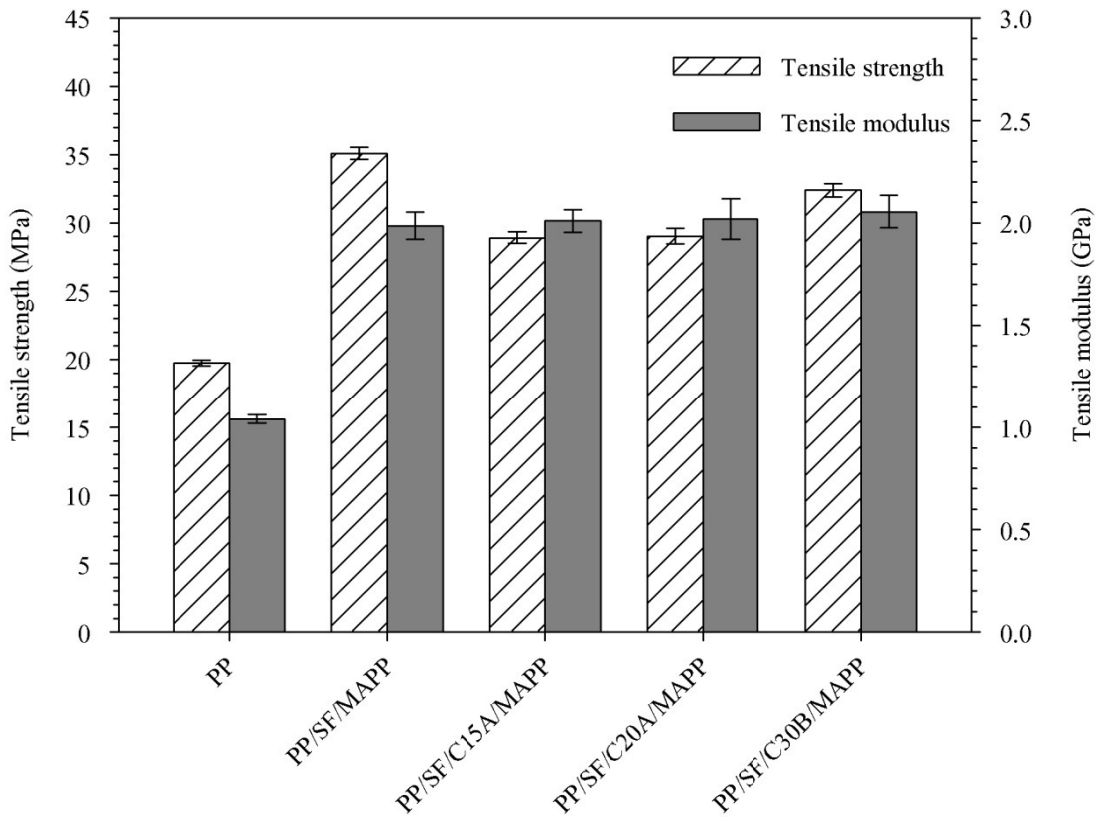
รูปที่ 4.4 กราฟ XRD ของคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน

ตารางที่ 4.3 คำนวณ 2θ และระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ของคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน

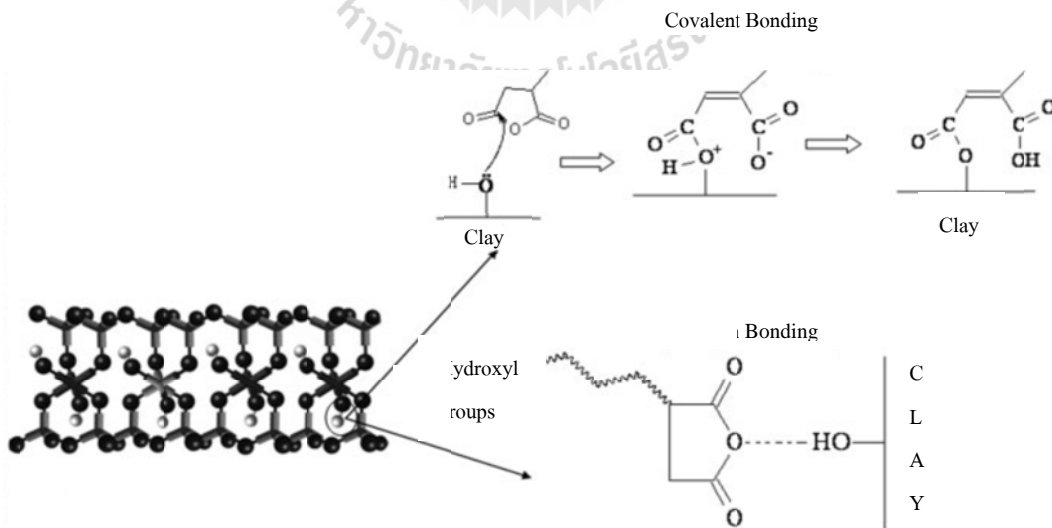
Designation	2 Theta (degree)	Interlayer spacing (nm)
PP/SF/C15A/MAPP	2.54	3.48
PP/SF/C20A/MAPP	2.54	3.48
PP/SF/C30B/MAPP	-	-

4.2.2 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและคอมพอลิทีทแสดงในตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.5 แสดงค่าการทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและคอมพอลิทีท MAPP ถูกเติมลงในระบบเพื่อช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ และช่วยให้ไฮดรอกซีโนเคลย์เกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น จากผลการทดลอง พบว่าคอมพอลิทีทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์มีค่าการทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของแรงดึงสูงกว่าพอลิโพรพิลีนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นใยป่านสรนารายณ์เป็นสารเสริมแรงที่ดีของพอลิโพรพิลีน การเติมไฮดรอกซีโนเคลย์ทั้งสามชนิดลงในคอมพอลิทีทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามอดูลัสแรงดึง แต่ส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึงลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณของ MAPP ที่ใช้ไม่เพียงพอหรือกระบวนการที่ใช้ในการผสมยังไม่ดีพอ จึงทำให้แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย รวมทั้งการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ Lee และคณะ (2009) ศึกษาผลของกระบวนการผสมที่มีต่อสมบัติทางกลของคอมพอลิทีทระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยจากไม้ และไฮดรอกซีโนเคลย์ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใช้กระบวนการผสมแบบ direct mixing ค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอลิทีทลดลงเมื่อเติมไฮดรอกซีโนเคลย์ แต่เมื่อใช้กระบวนการผสมแบบมาสเตอร์แบตช์ พบว่า ค่าการทนต่อแรงดึงของคอมพอลิทีทเพิ่มขึ้นเมื่อเติมไฮดรอกซีโนเคลย์ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาคอมพอลิทีทระหว่างพอลิโพรพิลีน เส้นใยป่านสรนารายณ์ และไฮดรอกซีโนเคลย์ทั้งสามชนิดนั้น พบว่า PP/SF/C30B/5MAPP แสดงค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง ไฮดรอกซีโนเคลย์ (OMMT) กับหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride group, MA) ของ MAPP ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 C30B ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วย methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium ซึ่งหมู่ไฮดรอกซีเอทิลและหมู่ไฮดรอกซีลในสารลดแรงดึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปร C30B และส่วนที่ไม่ถูกเปลี่ยนแปลงในเคลย์อาจจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ MA ด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ดังนั้น PP/SF/C30B/MAPP มีอันตรกิริยาระหว่างไฮดรอกซีโนเคลย์กับพอลิโพรพิลีนมากกว่า PP/SF/C20A/MAPP และ PP/SF/C15A/5MAPP ส่งผลให้มีค่าการทนแรงดึงที่สูงกว่า ส่วนค่ามอดูลัสแรงดึงของคอมพอลิทีทที่มีไฮดรอกซีโนเคลย์ทั้งสามชนิดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

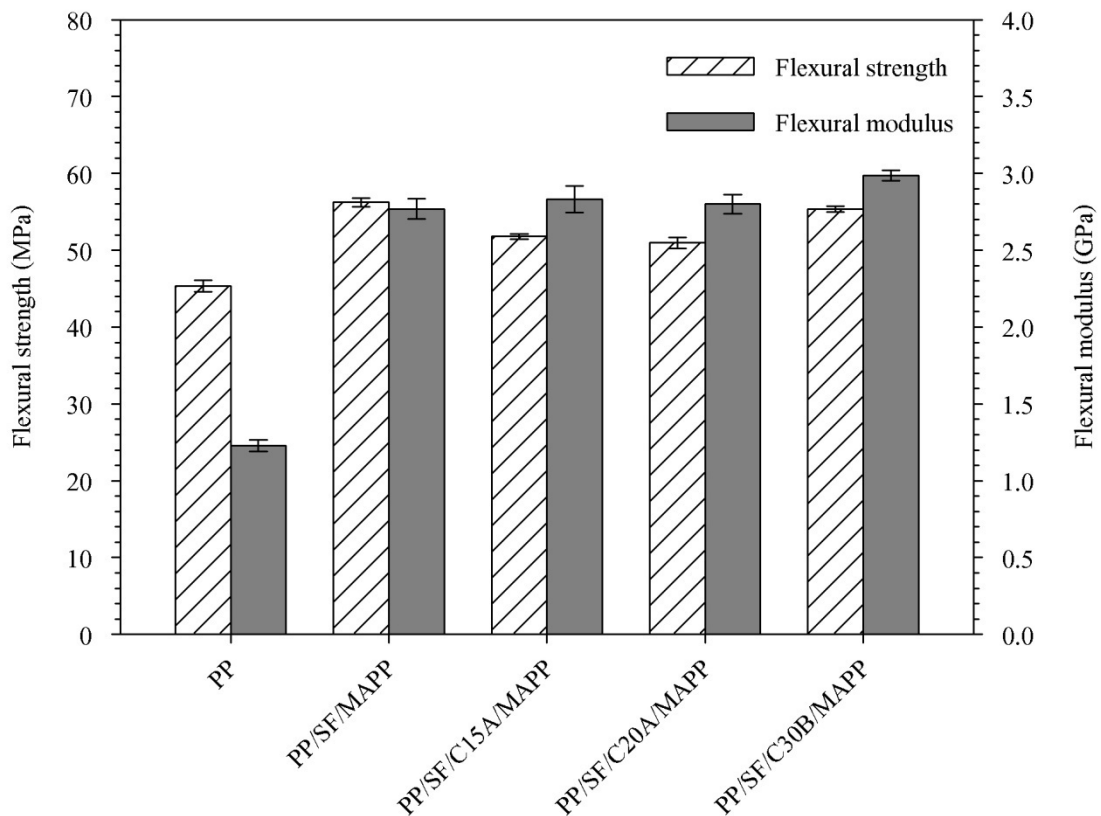


รูปที่ 4.5 ค่าการทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต



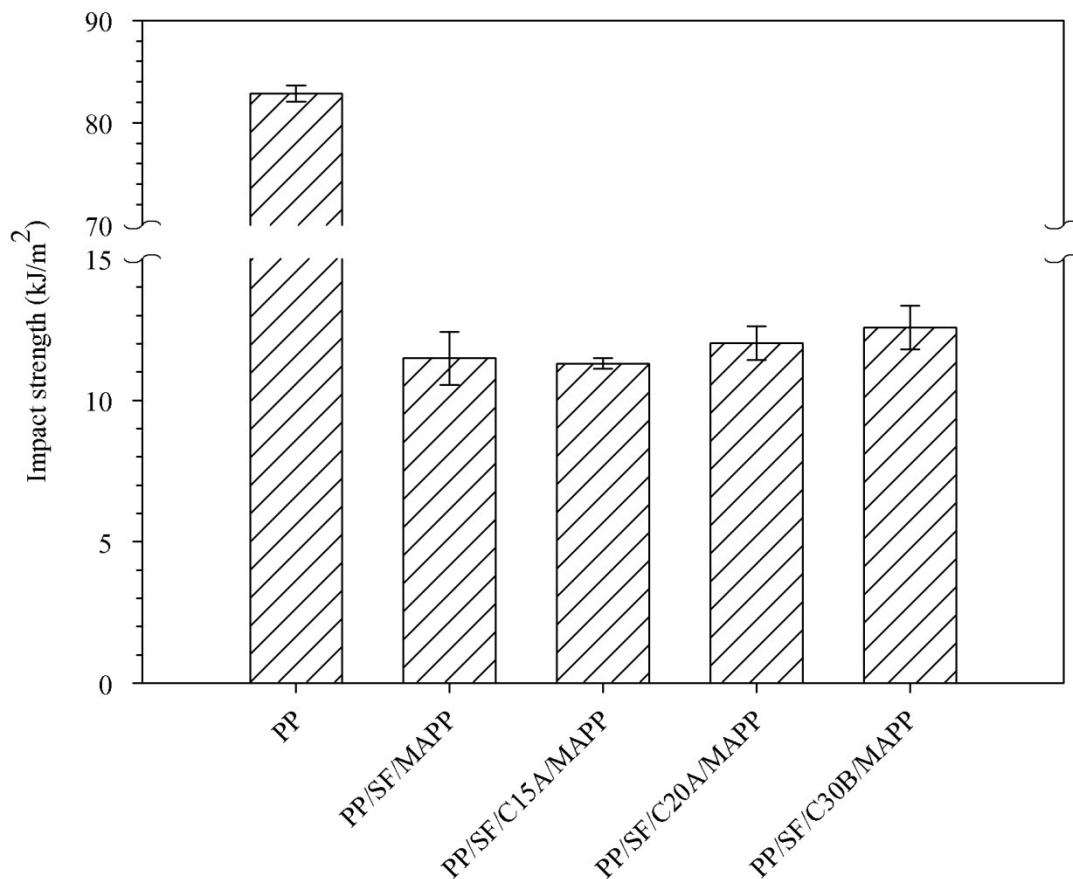
รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง OMMT และหมู่ MA ของ MAPP [Santos et al., 2008]

ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าการทนต่อแรงดึง การเติมเส้นใยปานครนารายณ์ทำให้ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น เมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ทั้งสามชนิดลงไปคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานครนารายณ์ทำให้ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งลดลง ส่วนค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่ง Sardashti (2009) พบว่าค่าการทนต่อแรงดัดโค้งของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยจากฟางข้าวลดลง เมื่อมีการเติมออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากปริมาณ MAPP ที่เติมลงไปยังไม่เพียงพอที่จะช่วยให้เคลย์เกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบคอมโพสิตที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ต่างชนิดกัน พบว่า PP/SF/C30B/MAPP มีค่าการทนต่อแรงดัดโค้งสูงที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกันกับผลของค่าการทนต่อแรงดึงของคอมโพสิต นอกจากนี้ ยังพบว่า การเติมออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของคอมโพสิต



รูปที่ 4.7 ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และคอมโพสิตแสดงในรูปที่ 4.8 การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ทำให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนลดลงอย่างมาก (ประมาณ 86%) เนื่องจากสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงเป็นตำแหน่งในพอลิเมอร์สำหรับการเริ่มต้นของการร้าว (crack initiation) [Nourbasksh and Ashori, 2009] อย่างไรก็ตาม การเติมออร์กาโนเคลย์ไม่ทำให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ลดลง ซึ่ง Lee และ Kim (2009) พบว่า การเติมออร์กาโนเคลย์ 1 phr ส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ เป็นเพราะชั้นซิลิเกตของออร์กาโนเคลย์ในคอมโพสิตมีค่าพลังงานดูดซับมากกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีออร์กาโนเคลย์ในระหว่างกระบวนการแตกหัก (fracture process)



รูปที่ 4.8 ค่าการทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

Designation	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m ²)
PP	19.75 ± 0.21	1.040 ± 0.021	45.33 ± 0.74	1.229 ± 0.037	82.85 ± 0.82
PP/SF/MAPP	35.10 ± 0.44	1.986 ± 0.066	56.23 ± 0.60	2.768 ± 0.066	11.48 ± 0.94
PP/SF/C15A/MAPP	28.92 ± 0.42	2.010 ± 0.055	51.78 ± 0.33	2.833 ± 0.087	11.30 ± 0.19
PP/SF/C20A/MAPP	29.04 ± 0.58	2.019 ± 0.099	50.97 ± 0.70	2.800 ± 0.063	12.02 ± 0.60
PP/SF/C30B/MAPP	32.39 ± 0.47	2.055 ± 0.079	55.38 ± 0.38	2.987 ± 0.034	12.57 ± 0.78



4.2.3 สมบัติทางกระแสวิทยา

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) ของพอลิโพรพิลีน และพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยทั่วไปเมื่อมีการเติมสารเสริมแรงลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะทำให้พอลิเมอร์มีความหนืดมากขึ้น นั่นคือจะมีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำลง การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ลงในพอลิโพรพิลีนส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนลดต่ำลง เนื่องจากเส้นใยไปรบกวนการไหลของพอลิเมอร์และทำให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยากขึ้น ในกรณีการเติมออร์กาโนเคลย์ลงในคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่าการเติม C15A และ C20A ทำให้ค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิตสูงขึ้น ซึ่ง Legon'kova และ Bokarev (2005) พบว่าค่าดัชนีการไหลของโคพอลิเอไมด์ซึ่งเตรียมโดยโคพอลิคอนเดนเซชันของกรดอะดิพิคและกรดเซบาคิกกับเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (copolycondensation of adipic and sebacic acids with hexamethylenediamine) เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากการเกิด plasticizing effect ของออร์กาโนเคลย์ในระบบ ส่วนการเติม C30B ลงในคอมโพสิตซึ่งถูกดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ต่างชนิดกันนั้น ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการไหลอย่างมีนัยสำคัญ Zhong และคณะ (2007) พบว่าความหนืดเฉือนของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับผงไม้ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและคอมโพสิตที่ไม่เติมออร์กาโนเคลย์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

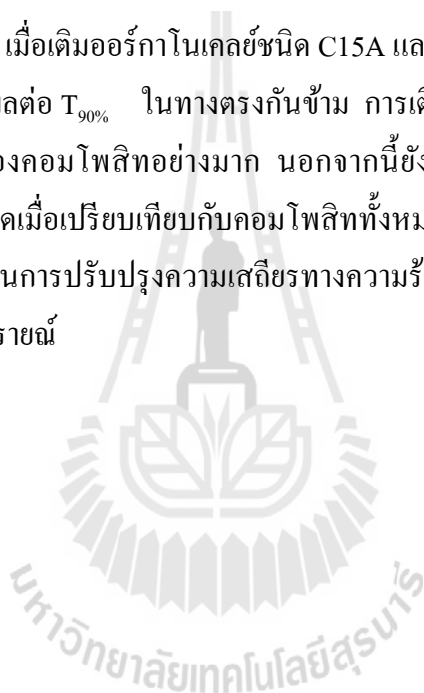
Table 4.5 ค่าดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

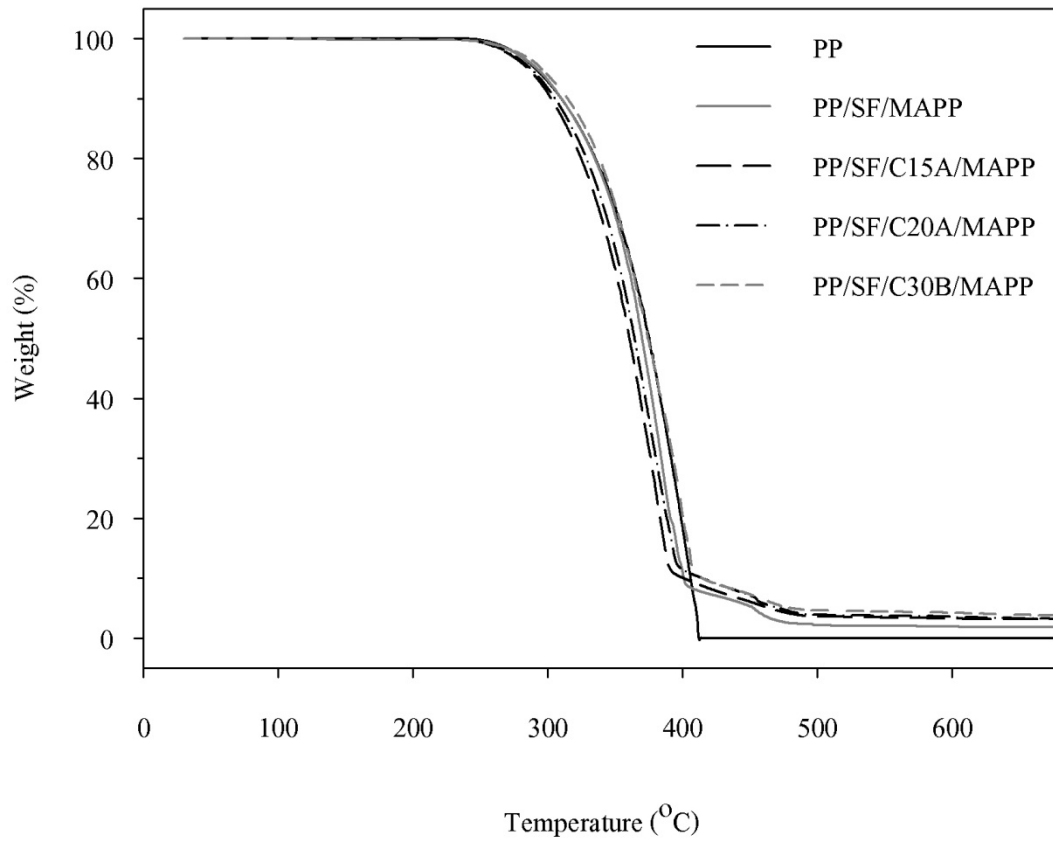
Designation	MFI (g/10 min)
PP	6.19 ± 0.12
PP/SF/MAPP	2.06 ± 0.14
PP/SF/C15A/MAPP	5.70 ± 0.25
PP/SF/C20A/MAPP	6.17 ± 0.22
PP/SF/C30B/MAPP	1.73 ± 0.10

4.2.4 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากความร้อน (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, $T_{5\%}$) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ 90% ของน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากความร้อน (thermal decomposition temperature at 90% weight loss, $T_{90\%}$) และปริมาณเถ้า (char residue) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวทางความร้อน

ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพลีเมอร์แสดงในตารางที่ 4.6 จากกราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพลีเมอร์ในรูปที่ 4.9 พบว่า พอลิโพรพิลีนมีการสลายทางความร้อนเพียงขั้นตอนเดียว โดยพบ $T_{5\%}$ ที่อุณหภูมิ 291 องศาเซลเซียส $T_{90\%}$ ที่อุณหภูมิ 406 องศาเซลเซียส และไม่มีปริมาณถ่านเหลืออยู่ ในขณะที่คอมโพลีเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานครนารายณ์ นั้นมีการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน ในขั้นตอนต่อมาเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวทางความร้อนของลิกนินและเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณถ่านเหลืออยู่ 1.94% ซึ่งปริมาณถ่านที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติคือลิกนิน ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น เมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C15A และ C20A ส่งผลต่อการลดลงของ $T_{5\%}$ ของคอมโพลีเมอร์ แต่ไม่ส่งผลต่อ $T_{90\%}$ ในทางตรงกันข้าม การเติม C30B ไม่ส่งผลต่อ $T_{5\%}$ ของคอมโพลีเมอร์ แต่เพิ่ม $T_{90\%}$ ของคอมโพลีเมอร์อย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณถ่านที่เหลือของ PP/SF/C30B/MAPP มีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพลีเมอร์ทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติม C30B มีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนของคอมโพลีเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปานครนารายณ์





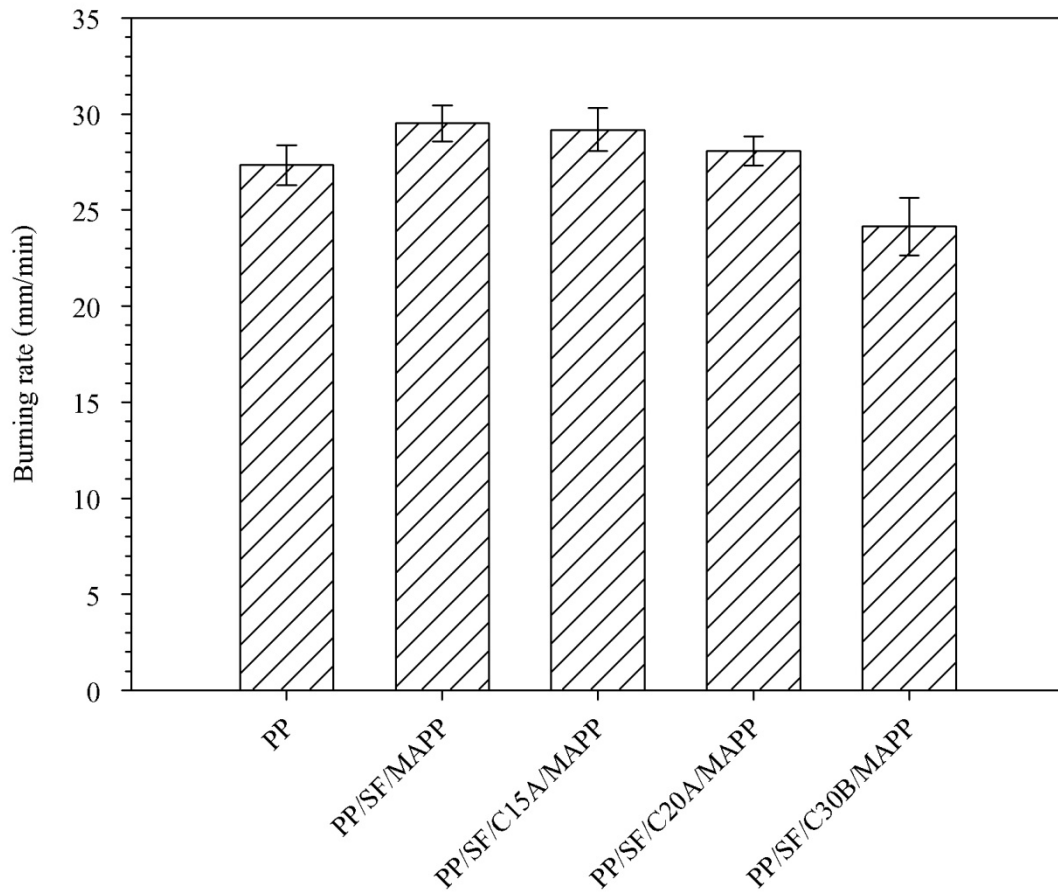
รูปที่ 4.9 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

Designation	T _{5%} (°C)	T _{90%} (°C)	Residue at 600°C (%)
PP	291	406	0.00
PP/SF/MAPP	292	401	1.94
PP/SF/C15A/MAPP	285	401	3.28
PP/SF/C20A/MAPP	287	406	3.59
PP/SF/C30B/MAPP	295	415	4.24

4.2.5 สมบัติการต้านการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต โดยการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน (horizontal burning test) แสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.7 โดยทั่วไป การเริ่มต้นการติดไฟของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตจะเกิดจากการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการตัดแปรโครงสร้างของเคลย์ ซึ่งจะไปเร่งให้การสลายตัวของพอลิเมอร์เร็วขึ้น [Pannirselvam, 2008] จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์จาก 27.34 มิลลิเมตรต่อนาที เป็น 29.51 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากเส้นใยป่านศรนารายณ์สามารถติดไฟได้ดี มีงานวิจัยพบว่า การเติมเส้นใยธรรมชาติทำให้อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนสูงขึ้น [Abu bakar et al., 2010; Sain et al., 2004; Suppakarn and Jarukumjorn, 2009] เมื่อเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C15A และ C20A ลงในคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่า อัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิตที่มีออร์กาโนเคลย์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ ในขณะที่อัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิตที่มี C30B ลดลงเหลือ 24.15 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากการมีปริมาณเถ้าที่เหลือสูงที่สุด รวมทั้ง C30B มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแตกชั้นกันของออร์กาโนเคลย์ (exfoliated structure) กลไกการหน่วงไฟของออร์กาโนเคลย์เกี่ยวข้องกับการสร้างเถ้า (high-performance carbonaceous-silicate char) ซึ่งจะปกคลุมบนพื้นผิวของวัสดุในขณะที่มีการเผาไหม้ [Lee et al., 2010; Sinha Ray and Okamoto, 2003] นอกจากนี้ Lee และคณะ (2010) พบว่าเมื่อมีการใช้ออร์กาโนเคลย์ในปริมาณเล็กน้อย อัตราการแตกชั้น (degree of exfoliation) มีส่วนสำคัญในการปรับปรุงสมบัติการต้านการติดไฟของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนกับเส้นใยจากไม้ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น



รูปที่ 4.10 อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

ตารางที่ 4.7 อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต

Designation	Burning rate (mm/min)
PP	27.34 ± 1.02
PP/SF/MAPP	29.51 ± 0.94
PP/SF/C15A/MAPP	29.18 ± 1.12
PP/SF/C20A/MAPP	28.07 ± 0.75
PP/SF/C30B/MAPP	24.15 ± 1.50

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การเติมเส้นใยป่านสรนารายณ์ลงในพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้สมบัติการทนต่อแรงดึงและแรงคดโค้งเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าการทนต่อแรงกระแทกและค่าดัชนีการไหลต่ำลง คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าพอลิโพรพิลีน แต่มีอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่า

การเติมออร์กาโนเคลย์ลงไปในคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ส่งผลต่อการลดลงของค่าการทนต่อแรงดึงและแรงคดโค้ง แต่ไม่ทำให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกและมอดูลัสลดลง จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าคอมโพสิทที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C15 และ C20A แสดงลักษณะโครงสร้างของเคลย์เป็นแบบขยายชั้นของออร์กาโนเคลย์ ส่วนคอมโพสิทที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C30B แสดงลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแตกชั้นของออร์กาโนเคลย์ การเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C30B ลงในคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ไม่ทำให้ค่าดัชนีการไหลเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C15A และ C20A ส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลของคอมโพสิทเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิทพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์ลดลงเมื่อมีการเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C30B แต่การเติมออร์กาโนเคลย์ชนิด C15 และ C20A ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเผาไหม้ของคอมโพสิท คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านสรนารายณ์และออร์กาโนเคลย์ชนิดคลอไรด์ 30 บี แสดงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านการติดไฟที่สูงที่สุด

บรรณานุกรม

เอกสารแผนพัฒนาการผลิตป่านศรนารายณ์ ปี 2545-2549. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ASTM Standard D635, 2006. Standard test method for rate of burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/D0635-10, www.astm.org.

Available : <http://www.scprod.com>.

Abu Bakar, M. B. et al. (2010). Flammability and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites. J. Appl. Polym. Sci. 116: 2714-2722.

Arzondo, L. M., Pérez, C. J., and Carella, J. M. (2005). Injection molding of long sisal fiber-reinforced polypropylene: Effects of compatibilizer concentration and viscosity on fiber adhesion and thermal degradation. Polym. Eng. Sci. 45: 613-621.

Barick, A. K. and Tripathy, D. K. (2010). Preparation and characterization of thermoplastic polyurethane/organoclay nanocomposites by melt intercalation technique: Effect of nanoclay on morphology, mechanical, thermal, and rheological properties. J. Appl. Polym. Sci. 117: 639-654.

Beckermann, G. (2007). Performance of Hemp-Fibre Reinforced Polypropylene Composite Materials. Ph.D. Thesis. University of Waikato, Hamilton, New Zealand.

Bismarck, A., Mishra, S., and Lampke, T. (2005). Plant fibers as reinforcement for green composites. In A. K. Mohanty, M. Misra and L. T. Drzal (Eds.), Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Florida: CRC Press.

Biswal, M., Mohanty, S., and Nayak, S. K. (2009). Influence of organically modified nanoclay on the performance of pineapple leaf fiber-reinforced polypropylene nanocomposites. J. Appl. Polym. Sci. 114: 4091-4103.

Charu, S. (2008). Studies on Development of Polypropylene-Clay Nanocomposite for Automotive Applications. M.Eng. Thesis. Thapar University, Patiala, India.

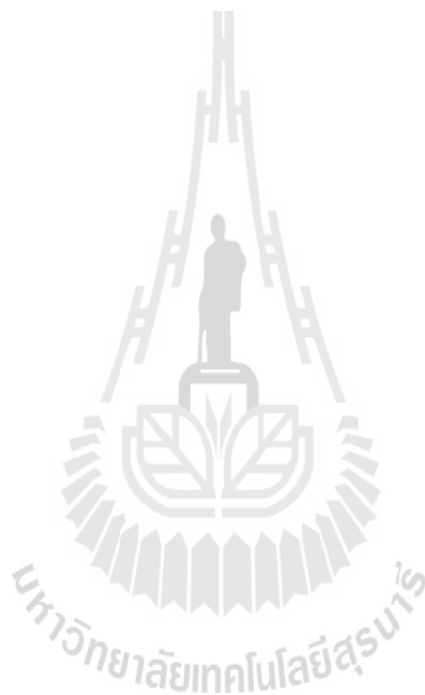
Chen, L. and Wang, Y.-Z. (2010). A review on flame retardant technology in China. Part I: Development of flame retardants. Polym. Adv. Technol. 21: 1-26.

- Chiu, F.-C. et al. (2004). Combined effects of clay modifications and compatibilizers on the formation and physical properties of melt-mixed polypropylene/clay nanocomposites. J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys. 42: 4139-4150.
- Feng, D., Caulfield, D. F., and Sanadi, A. R. (2001). Effect of compatibilizer on the structure-property relationships of kenaf-fiber/polypropylene composites. Polym. Compos. 22: 506-517.
- Fornes, T. D. et al. (2002). Effect of organoclay structure on nylon 6 nanocomposite morphology and properties. Polym. 43: 5915-5933.
- Ghasemi, I. and Kord, B. (2009). Long-term water absorption behaviour of polypropylene/wood flour/organoclay hybrid nanocomposite. Iran. Polym. J. 18: 683-691.
- Giannelis, E., Krishnamoorti, R., and Manias, E. (1999). Polymer-silicate nanocomposites: Model systems for confined polymers and polymer brushes polymers in confined environments. Adv. Polym. Sci. 138: 107-147.
- Gu, R. and Kokta, B. V. (2009). Mechanical properties of PP composites reinforced with BCTMP aspen fiber. J. Thermoplast. Compos. Mater. 23: 513-542.
- Guo, G. et al.. (2007). Flame retarding effects of nanoclay on wood-fiber composites. Polym. Eng. Sci. 47: 330-336.
- Han, G. et al. (2008). Bamboo-fiber filled high density polyethylene composites: Effect of coupling treatment and nanoclay. J. Polym. Environ. 16: 123-130.
- He, H. et al. (2010). Organoclays prepared from montmorillonite with different cation exchange capacity and surfactant configuration. Appl. Clay Sci. 48: 67-72.
- Hetzer, M. and De Kee, D. (2008). Wood/polymer/nanoclay composites, environmentally friendly sustainable technology: A review. Chem. Eng. Res. Des. 86: 1083-1093.
- Jang, J. and Lee, E. (2001). Improvement of the flame retardancy of paper-sludge/polypropylene composite. Polym. Test. 20: 7-13.
- Jeencham, R., Suppakarn, N., and Jarukumjorn, K. (2009). Effect of ammonium polyphosphate on flammability and mechanical properties of polypropylene/sisal fiber composites. In Koo, J. H. (2005). Polymer Nanocomposites : Processing, Characterization, and Applications. New York: McGraw-Hill.
- Kiliaris, P. and Papaspyrides, C. D. (2010). Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy. Prog. Polym. Sci. 35: 902-958.

- Kord, B. (2011). Effect of organo-modified layered silicates on flammability performance of high-density polyethylene/rice husk flour nanocomposite. J. Appl. Polym. Sci. 120: 607-610.
- Kord, B., Hemmasi, A., and Ghasemi, I. (2010). Properties of PP/wood flour/organomodified montmorillonite nanocomposites. Wood Sci. Technol. 45: 111-119.
- Kozłowski, R. and Władzyka-Przybylak, M. (2008). Flammability and fire resistance of composites reinforced by natural fibers. Polym. Adv. Technol. 19: 446-453.
- Proceedings of the the 11th Pacific Polymer Conference 2009. Cairns, Australia.
- Laoutid, F. et al. (2009). New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. Mater. Sci. Eng. R Rep. 63: 100-125.
- Lee, H. and Kim, D. S. (2009). Preparation and physical properties of wood/polypropylene/clay nanocomposites. J. Appl. Polym. Sci. 111: 2769-2776.
- Lee, Y. H. (2008). Foaming of Wood Flour/Polyolefin/Layered Silicate Composites. Ph.D. Thesis. University of Toronto, Toronto, Canada.
- Lee, Y. H. et al. (2010). The effects of clay dispersion on the mechanical, physical, and flame-retarding properties of wood fiber/polyethylene/clay nanocomposites. J. Appl. Polym. Sci. 118: 452-461.
- Legon'kova, O. and Bokarev, A. (2005). Physicomechanical and Rheological Characteristics of Composite Materials with Organic and Inorganic Fillers. Russ. J. Appl. Chem. 78: 1494-1497.
- Lei, S. G., Hoa, S. V., and Ton-That, M.-T. (2006). Effect of clay types on the processing and properties of polypropylene nanocomposites. Compos. Sci. Technol. 66: 1274-1279.
- Lei, Y. et al. (2007). Influence of nanoclay on properties of HDPE/wood composites. J. Appl. Polym. Sci. 106: 3958-3966.
- Marras, S. I. et al. (2007). Thermal and colloidal behavior of amine-treated clays: The role of amphiphilic organic cation concentration. J. Colloid Interface Sci. 315: 520-527.
- Mohanty, A. K. et al. (2005). Natural fibers, biopolymers, and biocomposites: An introduction. In A. K. Mohanty, M. Misra and L. T. Drzal (Eds.), Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Florida: CRC Press.
- Nourbakhsh, A. and Ashori, A. (2009). Influence of nanoclay and coupling agent on the physical and mechanical properties of polypropylene/bagasse nanocomposite. J. Appl. Polym. Sci. 112: 1386-1390.

- Pandey, J. K. et al. (2010). Recent advances in the application of natural fiber based composites. Macromol. Mater. Eng. 295: 975-989.
- Pannirselvam, M. (2008). Design, Development, and Characterization of Polypropylene Clay Nanocomposites. M.Eng. Thesis. RMIT University, Melbourne, Australia.
- Pickering, K. L. et al. (2007). Optimising industrial hemp fibre for composites. Compos: Part A, 38: 461-468.
- Rana, A. K. et al. (1998). Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: Effect of compatibilizer. J. Appl. Polym. Sci. 69(2): 329-338.
- Reddy, C. R., Sardashti, A. P., and Simon, L. C. (2010). Preparation and characterization of polypropylene-wheat straw-clay composites. Compos. Sci. Technol. 70: 1674-1680.
- Reichert, P. et al. (2000). Poly(propylene)/organoclay nanocomposite formation: Influence of compatibilizer functionality and organoclay modification. Macromol. Mater. Eng. 275: 8-17.
- Sain, M. et al. (2004). Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. Polym. Degrad. Stab. 83: 363-367.
- Santos, K. S. et al. (2008). Polyolefin-based nanocomposite: The effect of organoclay modifier. J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys. 46: 2519-2531.
- Sardashti, A. (2009). Wheat Straw-Clay-Polypropylene Hybrid Composites. M.Eng. Thesis. University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Sinha Ray, S. and Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. Prog. Polym. Sci. 28: 1539-1641.
- Suppakarn, N. and Jarukumjorn, K. (2009). Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: Effect of flame retardant type and content. Compos: Part B, 40: 613-618.
- Wang, K. et al. (2007). Correlation of rheology-orientation-tensile property in isotactic polypropylene/organoclay nanocomposites. Acta Mater. 55: 3143-3154.
- Xie, W. et al. (2001). Thermal characterization of organically modified montmorillonite. Thermochim. Acta 367-368: 339-350.
- Yeh, S. K. and Gupta, R. K. (2010). Nanoclay-reinforced, polypropylene-based wood-plastic composites. Polym. Eng. Sci. 50: 2013-2020.
- Zhang, S. and Horrocks, A. R. (2003). A review of flame retardant polypropylene fibres. Prog. Polym. Sci. 28: 1517-1538.

Zhong, Y. et al. (2007). Enhancement of wood/polyethylene composites via compatibilization and incorporation of organoclay particles. Polym. Eng. Sci. 47: 797-803.



ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกัจจร ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2533 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering) University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 35 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 5 ฉบับ

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาว นิธินาถ สุขกาญจน์ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Macromolecular Science) University of Case Western Reserve, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ การตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer characterization) และพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 40 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 8 ฉบับ