

การปรับเปลี่ยนค่าการซึมผ่านของก๊าซและค่าการนำความร้อน
ของวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

นางสาวอิสราภรณ์ ศิริวิริยะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและเพิ่มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

MODIFICATION OF PERMEABILITY AND THERMAL CONDUCTIVITY
OF POLYPROPYLENE/CLAY/CARBON NANOTUBE COMPOSITE

Miss Issaraporn Siriwiriyakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับเปลี่ยนค่าการซึมผ่านของก๊าซและค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

โดย

นางสาวอิสราภรณ์ ศิริวิริยะกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. วรรณ เต๋ไพลีฐพงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชราธร มงคลศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. วรรณ เต๋ไพลีฐพงษ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิธิศ หนูทอง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. จันจิรา จัปศิลป์)

อิสรากรณ์ ศิริวิริยะกุล: การปรับเปลี่ยนค่าการซึมผ่านของก๊าซและค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MODIFICATION OF PERMEABILITY AND THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYPROPYLENE/CLAY/ CARBON NANOTUBE COMPOSITE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.วรัญญู แต่ไพสิฐพงษ์, 114 หน้า.

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายสองส่วนคือ (ก) ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้ปริมาณพอลิโพรพิลีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดที่แตกต่างกัน และ (ข) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซและไอน้ำ และค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

วัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด ระยะห่างระหว่างชั้นของดินเหนียวถูกวัดด้วยเครื่อง XRD เครื่อง SEM ถูกใช้ศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุประกอบแต่ง โดยการศึกษาสมบัติเชิงกลคือค่าความทนแรงดึงและค่าโมดูลัส ค่าความสามารถการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์การซึมผ่านก๊าซและเครื่องวิเคราะห์การซึมผ่านไอน้ำ ค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบแต่งด้วยเครื่อง TGA

ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์เทคนิค XRD พบว่าปริมาณ PPMA เป็น 2 เท่าของสารตัวเติมและจำนวนครั้งของการตัดเม็ด 3 ครั้งเหมาะสมกับการเตรียมวัสดุประกอบแต่ง และการกระจายตัวของเคลย์แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวแบบ intercalated และการเติมเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ร้อยละ 1 ถึง 3 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความทนแรงดึงและค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นร้อยละ 64 และ 134 ตามลำดับ ค่าความสามารถการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มลดลงร้อยละ 77 และ 44 ตามลำดับ ค่าการนำความร้อนของวัสดุเพิ่มขึ้นร้อยละ 17

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5370616821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : POLYPROPYLENE / CLAY / CARBONNANOTUBE / PERMEABILITY / THERMAL CONDUCTIVITY

ISSARAPORN SIRIWIRIYAKUL: MODIFICATION OF PERMEABILITY AND THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYPROPYLENE / CLAY / CARBON NANOTUBE COMPOSITE. ADVISOR: VARUN TAEPASITPHONGSE, Ph.D., 114 pp.

The goals of this research were two folds, (i) preparation of PP/clay/CNT composite with different loading of PPMA and number of times in extrusion, and (ii) to study the effects of loading of clay and carbonnanotube on mechanical properties, permeability and thermal conductivity.

The PP/clay/CNT composite were prepared in the twin screw extruder in mixing procedure and compression. Gallery spacing between clay platelaes of the clay and composite films were measured by X-ray diffraction. Scanning Electron Microscope (SEM) was used to study the distribution of filler in composite films. The mechanical properties were observed Tensile Stress and Young's Modulus. The Oxygen Permeation (OP) of the composite flim were measured by Oxygen Permeation Analyzer. The Water Vapor Permeation (WVP) of the composite flim were measured by Water Vapor Permeation Analyzer. Thermal Conductivity of the composite flim were measured by Thermal Constant Analyser (TCA)

The XRD results showed that at ratio PPMA:filler 2:1 and number of times in extrusion 3 times is appropriate condition for preparation of PP/clay/CNT composite, and results showed that the melt PP/clay/CNT composite showed interacted. The effects of clay and CNT content at 0-3 wt. % improved the Tensile Stress, Young's Modulus and Thermal Conductivity of the composite. The addition of clay and CNT decreased oxygen permeation and water vaper permeation.

Department : Chemical Engineering Student's Signature.....

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการให้คำแนะนำ คุณดูแล ตลอดจน
ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อาจารย์ ดร.วรัญ แต่ไพสิฐ
พงษ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี ประธานคณะกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิธิศ หนูทอง และ อาจารย์ ดร.จันจิรา จับศิลป์ กรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่
ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และประสบการณ์ทางวิชาชีพตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาเล่าเรียน

ขอขอบคุณ คุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความเข้าใจในสรรพวิชา และอบรมสั่งสอน
ในเรื่องต่าง ๆ

ขอบคุณเพื่อนพ้องพี่น้องในห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคคลท่านอื่นอีกมากมาย ที่คอยให้
กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณที่ทำให้ทำงานได้
ประสบความสำเร็จและมีทุกวันนี้ได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	5
2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP).....	5
2.1.1 คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน.....	6
2.1.2 การใช้งานของพอลิโพรพิลีน.....	8
2.2 เคลย์ (Clay).....	8
2.2.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	10
2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube).....	11
2.3.1 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	12
2.3.2 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	14
2.4 วัสดุนาโนคอมโพสิต.....	14
2.4.1 ลักษณะของการกระจายตัวของ Polymer/Clay Nanocomposites.....	16
2.4.2 วิธีการสังเคราะห์ Polymer/Clay Nanocomposites.....	17
2.5 ค่าความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability).....	19
2.6 แบบจำลองของการซึมผ่านของก๊าซ (Modeling of Permeability).....	20
2.6.1 Nielsen Model.....	21
2.6.2 Bharadwaj Model หรือ Modified Nielsen Model.....	22

2.7	การนำความร้อน (Heat Conduction).....	23
2.8	แบบจำลองการหาค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต	26
2.9	คุณสมบัติเชิงกล	26
2.10	แบบจำลองการหาค่า Tensile Stress และ Young’s Modulus ของวัสดุพอลิเมอร์ คอมโพสิต	30
บทที่ 3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 4	วิธีดำเนินการวิจัย	40
4.1	สารเคมี	40
4.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน	40
4.3	วิธีการเตรียมวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโน ทิวบ์	41
4.4	วิธีการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนา โนทิวบ์ด้วยเครื่อง Compression.....	42
4.5	การวิเคราะห์ผล	43
บทที่ 5	ผลและการวิเคราะห์.....	46
5.1	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction, XRD)	46
5.2	สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต	55
5.3	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP)	62
5.4	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP)	64
5.5	ค่าการนำความร้อน	67
5.6	ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา	71
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย	74
6.1	สรุปผลการวิจัย	74
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	75
	รายการอ้างอิง	76
	ภาคผนวก.....	82
	ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	83
	ภาคผนวก ข ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน	89
	ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ	93

ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง TCA	98
ภาคผนวก จ การหาค่า Volume fraction ของสารตัวเติม	104
ภาคผนวก ฉ Tensile Stress และ Young's Modulus จากการทำนาย	106
ภาคผนวก ช ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ จากการทำนาย	110
ภาคผนวก ซ ค่าการนำความร้อน จากการทำนาย	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	114

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิโพรพิลีน	7
ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ (P) ของฟิล์มพอลิเมอร์	20
ตารางที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์	24
ตารางที่ 2.4 ค่าการนำความร้อนของ thermally conductive fillers	25
ตารางที่ 4.1 สูตรการผสมคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่อหา สูตรการขึ้นรูปที่เหมาะสม.....	41
ตารางที่ 4.2 สูตรการผสมวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์	42
ตารางที่ 5.1 ค่ามุม 2-theta และ d-spacing ของ Bentonite, o-MMT, วัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT ที่ ปริมาณ PPMA และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดต่าง ๆ	49
ตารางที่ 5.2 ค่ามุม 2-theta และ d-spacing ของวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT	51
ตารางที่ 5.3 ค่ามุม 2-theta และ d-spacing ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในวัสดุคอมโพสิต	55
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต	61
ตารางที่ 5.5 ค่าเชิงความร้อนของวัสดุคอมโพสิตโดยวัดด้วยเครื่อง (TCA).....	69

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 องค์ประกอบของรีโธอร์ทเพาซ์.....	2
ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน	5
ภาพที่ 2.2 การจัดเรียงโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน	6
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเคลย์แบบ 1:1 Layered silicates	9
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเคลย์แบบ 2:1 Layered silicates	9
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	10
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของแกรไฟต์ (graphite).....	11
ภาพที่ 2.7 เซลล์หนึ่งหน่วย (unit cell) ของโครงสร้างผลึกแบบก่่องจัดรัสของเพชร	11
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของโมเลกุล C ₆₀	12
ภาพที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังเดี่ยว	13
ภาพที่ 2.10 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น	13
ภาพที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของเคลย์แบบ Conventional Composites	15
ภาพที่ 2.12 ลักษณะการกระจายตัวของเคลย์แบบ Nanocomposites.....	15
ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ Polymer/clay Nanocomposites.....	16
ภาพที่ 2.14 วิธีการสังเคราะห์ Polymer/clay Nanocomposites	18
ภาพที่ 2.15 เส้นทางการซึมผ่านของโมเลกุล ในpolymer-layered silicate nanocomposites	22
ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างระดับของ orientation parameter ที่มีผลต่อ polymer-layered silicate nanocomposites.....	23
ภาพที่ 2.17 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ	27
ภาพที่ 2.18 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	28
ภาพที่ 2.19 (a) การเรียงตัวในวัสดุคอมโพสิต (b) Longitudinal Normal Stress (c) Transverse Normal Stress	31
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิต และ Volume Fraction ของสารตัวเติม .33	
ภาพที่ 3.1 TEM micrographs of PP/PPAA/o-MMT nanocomposites	35
ภาพที่ 3.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของ PP and PP-g-AA/o- MMT nanocomposites ที่ความดันต่าง ๆ	35
ภาพที่ 3.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray diffraction (WAXD)	36

ภาพที่ 3.4 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิต PP/MWNT โดยวัดเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ..37

ภาพที่ 3.5 ค่า tensile strength, modulus และ elongation at break ที่มีผลต่อ PP/MWNT และ PP/MWNT/2 wt% เมื่อเติมด้วย PPMA ปริมาณต่าง ๆ..... 38

ภาพที่ 4.1 ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัตถุตามกฎของแบร็ก44

ภาพที่ 5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของ Bentonite และ o-MMT46

ภาพที่ 5.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณ PPMA เป็น 0 และ 1 เท่าของปริมาณสารตัวเติมและจำนวนครั้งของการตัดเม็ด 1 ถึง 4 ครั้ง48

ภาพที่ 5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณ PPMA เป็น 2 และ 3 เท่าของปริมาณสารตัวเติมและจำนวนครั้งของการตัดเม็ด 1 ถึง 4 ครั้ง48

ภาพที่ 5.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของ o-MMT และ วัสดุคอมโพสิตที่เติมเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ.....50

ภาพที่ 5.5 ขั้นตอนการเกิดการแตกตัวของชั้นเคลย์ระหว่างการผสมวัสดุคอมโพสิตแบบหลอมเหลว51

ภาพที่ 5.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 1%โดยน้ำหนัก และเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ.....52

ภาพที่ 5.7 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2%โดยน้ำหนัก และเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ.....52

ภาพที่ 5.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 3%โดยน้ำหนัก และเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ.....53

ภาพที่ 5.9 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติม CNT ในปริมาณต่าง ๆ.....54

ภาพที่ 5.10 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิต ที่เติม CNT ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ผสมกับเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ.....54

ภาพที่ 5.11 ค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ56

ภาพที่ 5.12 ค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ56

ภาพที่ 5.13 การเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ57

ภาพที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ57

ภาพที่ 5.15 การเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลือบและคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ58

ภาพที่ 5.16 ค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ59

ภาพที่ 5.17 ค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ59

ภาพที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ60

ภาพที่ 5.19 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ60

ภาพที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ61

ภาพที่ 5.21 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ62

ภาพที่ 5.22 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ63

ภาพที่ 5.23 การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในวัสดุคอมโพสิตจากการทดลองกับ Modified Nielsen Model ที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ64

ภาพที่ 5.24 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ65

ภาพที่ 5.25 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ66

ภาพที่ 5.26 การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไอน้ำในวัสดุคอมโพสิต จากการทดลองกับ Modified Nielsen Model ที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ66

ภาพที่ 5.27 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ68

ภาพที่ 5.28 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ68

ภาพที่ 5.29 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลือบต่าง ๆ70

ภาพที่ 5.30 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ70

ภาพที่ 5.31 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ71

ภาพที่ 5.32 ผิวรอยแตกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม72

ภาพที่ 5.33 ผิวของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/เคลย์.....	72
ภาพที่ 5.34 ผิวของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/คาร์บอนนาโนทิวบ์	73

บทที่ 1

บทนำ

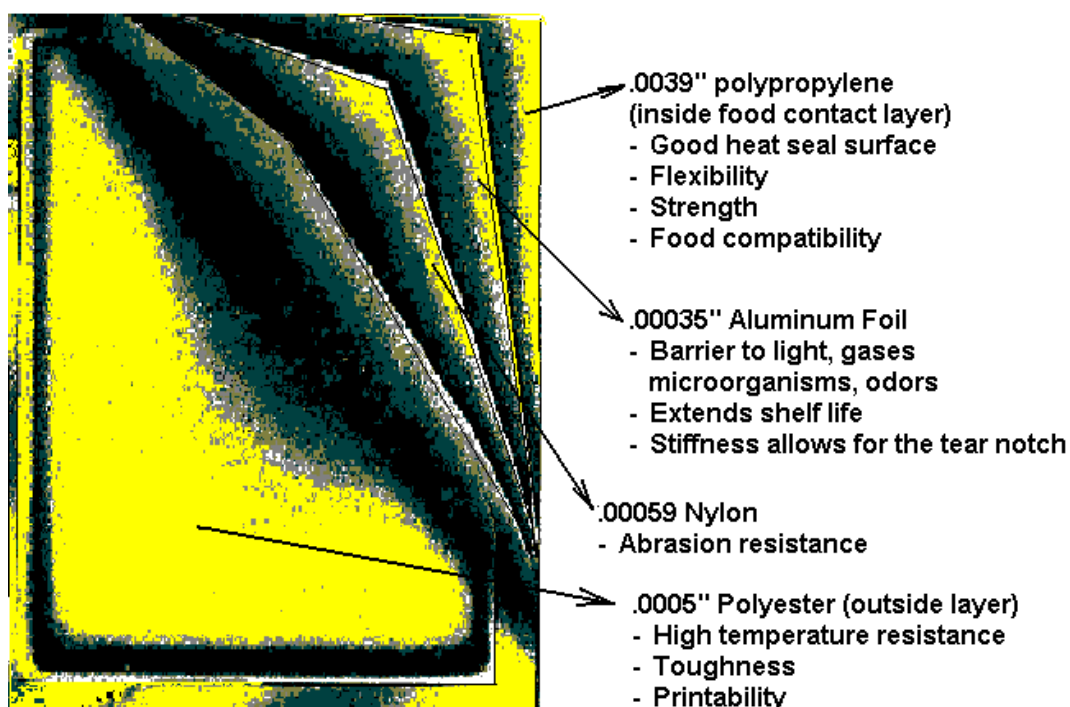
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกหรือพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน และเข้ามามีบทบาทแทนที่วัสดุเชิงพาณิชย์อื่น ๆ ซึ่งมีการใช้งานในอดีต เช่น ไม้ เหล็ก และเซรามิก เนื่องจากพอลิเมอร์มีข้อได้เปรียบในหลาย ๆ ด้าน ทั้งในเรื่องความสามารถในการขึ้นรูปที่ง่ายกว่า ต้นทุนการขึ้นรูปที่ถูกกว่า และยังมีสมบัติเด่นตรงที่มีน้ำหนักเบา บางชนิดมีความเหนียว ใส บางชนิดมีความสามารถยึดเกาะ (adhesive) หรือทนการติดไฟ บางชนิดสามารถทนการตัด โกง ได้สูง มีความสามารถในการกักเก็บการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว และโดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์จะมีการนำความร้อนที่ต่ำ (เป็นฉนวนความร้อน)

สมบัติในการกักเก็บการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว และสมบัติการนำความร้อนของพอลิเมอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้มากมาย ผลลัพธ์บางอย่างต้องการสมบัติในการกักเก็บการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวที่ดี บางอย่างก็ต้องการสมบัติการนำความร้อนที่ดี แต่มีตัวอย่างผลลัพธ์ที่ต้องการคุณสมบัติทั้งสองอย่างที่ดีคือ รีทอร์ทแพช (retort pouch)

รีทอร์ทแพชเป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกลามิเนตแบบยึดหยุ่นซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน และมีแนวโน้มของการใช้เพิ่มขึ้นในอนาคต รีทอร์ทแพชมีคุณสมบัติเด่นคือมีความยืดหยุ่นและทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี สามารถใช้บรรจุอาหารได้หลายชนิด ผลผลิตจากพลาสติกลามิเนตกับอะลูมิเนียมฟอยล์ หรือพลาสติกกับพลาสติก สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ฆ่าเชื้อได้ และยังสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพอาหารด้าน สี กลิ่น รส จากความชื้น ก๊าซออกซิเจน และการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ เก็บที่อุณหภูมิห้องได้ นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบา ไม่ยุบหรือบวม ไม่เกิดสนิม และที่สำคัญคือสามารถใช้กับเตาไมโครเวฟได้ [1, 2, 3, 4]

รีทอร์ทแพชเป็นบรรจุภัณฑ์ลามิเนตที่อ่อนตัวได้ โดยลามิเนต (Laminates) คือวัสดุหลาย ๆ ชั้น (multilayers) ประกอบกัน ซึ่งอาจจะเป็นฟอยล์ กระดาษหรือพลาสติก ซึ่งถูกเลือกนำมาใช้ตามลักษณะการใช้งานและลักษณะจำเพาะของบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการ ในการรวมกันของวัสดุต่าง ๆ นั้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ดีในด้านต่าง ๆ เช่น เพิ่มความแข็งแรง หรือเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านไอน้ำ ก๊าซออกซิเจน หรือป้องกันแสงได้ [7] ส่วนใหญ่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้น อัดติดกัน [1, 5, 6] ดังภาพที่ 1.1 [6]



ภาพที่ 1.1 องค์ประกอบของรีทอร์ทแพซ

ชั้นที่อยู่นอกสุด เป็นพลาสติกชนิดพอลิเอสเตอร์ (polyester) มีความหนาประมาณ 12 ไมครอน มีสมบัติแข็งแรงทนทาน ด้านทานแรงกระแทกได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูง มีความเหนียว ฝักัดง่าย และสามารถพิมพ์ข้อความหรือภาพกราฟิกได้โดยไม่หลุดลอก

ชั้นที่ 2 เป็นพลาสติกชนิดไนลอน (nylon) มีความหนา 15-25 ไมครอน มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี แต่ป้องกันไอน้ำได้ปานกลาง

ชั้นที่ 3 เป็นชั้นของอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil) มีความหนา 7 - 9 ไมครอน ชั้นนี้มีสมบัติป้องกันแสง อากาศ หรือจุลินทรีย์และกลิ่นได้ดี และยังเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ทำให้ใช้ความร้อนในกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนลดลง

ชั้นที่ 4 เป็นพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (polypropylene) เป็นชั้นที่อยู่ใ้สุด มีความหนา 70 - 100 ไมครอน มีสมบัติป้องกันการรั่วซึม มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง สามารถปิดผนึกได้ดี และเนื่องจากต้องสัมผัสกับอาหารจึงไม่ควรทำปฏิกิริยากับอาหาร

บางครั้งรีทอร์ทแพซจะมีลักษณะใส (foil-free-pouch) เนื่องจากมีการใช้พลาสติกอื่นซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดี เช่น พอลิ(ไวนิลิดีนคลอไรด์) (PVDC)

หรือ เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVOH) แทนการใช้อะลูมิเนียมฟอยล์ โดยระหว่างชั้นของพลาสติกแต่ละชั้นจะมีชั้นของกาวเป็นตัวทำหน้าที่ยึดพลาสติกแต่ละชั้นให้ติดกัน

โดยทั่วไปแล้วรีทอร์ทแพคเกจจิ้งที่ใช้อะลูมิเนียมฟอยล์จะมีปัญหาเรื่องการรีไซเคิลหรือทำลาย เพราะมีทั้งพลาสติกและโลหะผสมกันอยู่ แนวทางในการแก้ปัญหาหนึ่งคือการไม่ใช้อะลูมิเนียมฟอยล์ แต่ก็จะมีปัญหาว่ารีทอร์ทแพคเกจจิ้งที่ไม่ใช้อะลูมิเนียมฟอยล์จะมีสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำลง และมีค่าการซึมผ่านก๊าซสูงขึ้น (การป้องกันการซึมผ่านก๊าซที่ลดลง) แนวทางหนึ่งที่น่าจะแก้ปัญหาข้างต้นได้ก็คือการใช้วัสดุประกอบแต่ง (หรือเรียกอีกอย่างว่าวัสดุคอมโพสิต) ที่มีเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นองค์ประกอบมาใช้ทดแทน เพราะมีรายงานว่าเคลือบจะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีค่าการป้องกันการซึมผ่านก๊าซดีขึ้น และสารคาร์บอนนาโนทิวบ์ช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติการนำความร้อนที่ดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซและสมบัติด้านการนำความร้อนของพอลิเมอร์โดยการผสมเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในพอลิโพรพิลีนเพื่อผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติทั้งสองด้านที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธีการหลอมเหลว โดยใช้ปริมาณพอลิโพรพิลีนมาเลือกแอนไฮไดรด์และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การเตรียมวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธีการหลอมเหลว โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw Extruder) เดิมพอลิโพรพิลีนมาเลือกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนเป็น 0 ถึง 3 เท่าของปริมาณสารตัวเติม และ จำนวนครั้งของการตัดเม็ดเป็น 1 ถึง 3 ครั้ง

1.3.2 การเตรียมวัสดุประกอบแต่งพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธีการหลอมเหลว อัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์คือ 0 ถึง 3% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในอัตราส่วน 0 ถึง 3% โดยน้ำหนัก โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในรูปแบบ masterbatch

1.3.3 การเตรียมชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปแบบอัด (Compression)

1.3.4 การเปรียบเทียบลักษณะทางโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology) และลักษณะการกระจายตัวของชั้นเคลือบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) และ scanning electron microscopy (SEM)

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีต่อ

ก. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ทดสอบความสามารถในการดึงยึด (Tensile testing) และค่าโมดูลัสของวัสดุประกอบแต่ง

ข. สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) ทดสอบหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค. ค่าการซึมผ่านของก๊าซ (Permeability) ทดสอบหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เข้าใจวิธีการเตรียม PP/Montmorillonite clay/Carbon nanotube composites

1.4.2 ได้ทราบอิทธิพลของปริมาณ Montmorillonite clay และปริมาณ Carbon nanotube ที่มีต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และ สมบัติการซึมผ่านก๊าซ (Permeability properties)

1.4.3 ได้แนวทางในการพัฒนาปรับปรุงรีโอร์ทเพาซ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

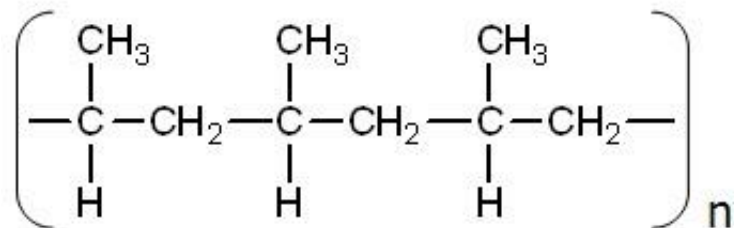
2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : Poly(1-methylethylene)

ชื่อพ้อง (Synonyms) : Polypropene, Polipropene 25 [USAN], Propylene polymers,
1-Propene homopolymer

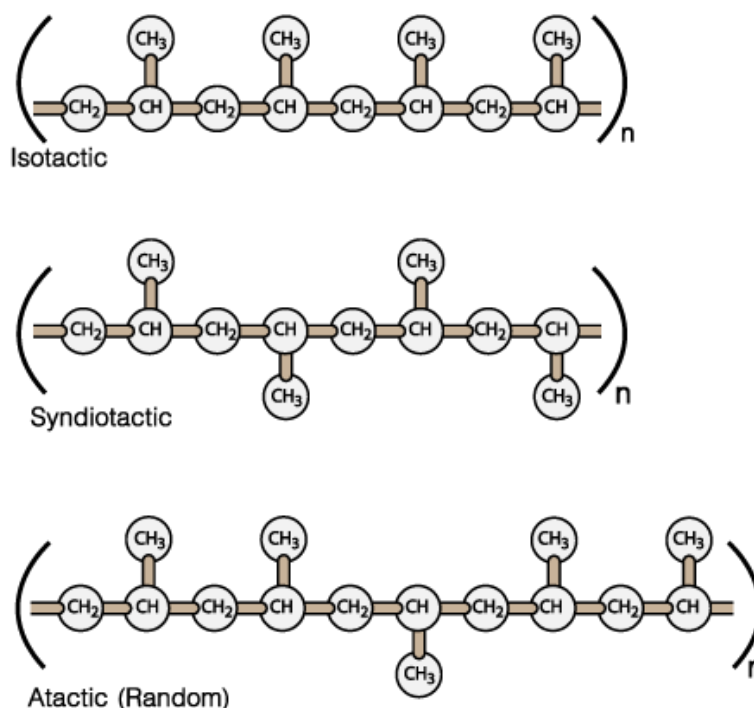
สูตรเคมีคือ $(C_3H_6)_n$

สูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) :



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีน (PP) เป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) คือพอลิเมอร์พลาสติกที่สามารถขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนซ้ำ ๆ ได้หลายครั้ง พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของ propylene (C_3H_6) หลาย ๆ ตัวเชื่อมต่อกันโดยเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของก๊าซโพรพิลีน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบพวกโลหะ เช่น ไทเทเนียม คลอไรด์ การใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสถานะของการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิดคือ isotactic, syndiotactic และ atactic ขึ้นอยู่กับทิศทาง การจับของหมู่เมธิลกับอะตอมคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การจัดเรียงโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน [9]

พอลิโพรพิลีนชนิด isotactic นำมาผลิตเป็นพลาสติกใช้อยู่โดยทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ จึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็ง ทนทาน ตรงข้ามกับชนิด atactic ซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ที่จะมีความเหนียวมากกว่าเนื่องจากหมู่เมทิลมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่วนชนิด syndiotactic ที่หมู่เมทิลจัดเรียงตรงข้ามกันจะมีความแข็งน้อยกว่า แต่จะทนทานมากกว่าชนิด isotactic [9]

2.1.1 คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนคุณสมบัติดังนี้ [8]

- มีลักษณะโปร่งแสงจนถึงขุ่น มีความแข็งแรง แข็งกว่า โพลีเอทิลีน(PE) แต่ความยืดหยุ่นต่ำกว่า
- มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ในช่วง $0.855 - 0.946 \text{ g/cm}^3$ สามารถลอยน้ำได้เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน
- มีจุดหลอมเหลวสูง $130-171 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงทำให้สามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Sterilization : $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ได้
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง

- มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี

- ทนทานต่อสารเคมีส่วนมาก ได้แก่ กรด ต่าง แอลกอฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะเกิดการพองตัว อ่อนนิ่ม หรือพื้นผิวเป็นรอยได้ในสารเคมีที่มีองค์ประกอบเป็นคลอรีนหรือไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติไม่มีขั้วสามารถดูดซึมสารที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นจึงสามารถทนต่อสารที่มีขั้วได้ดีกว่า และพอลิโพรพิลีนจะพองตัวและสลายตัวได้ในสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เช่น ไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟิวริก เข้มข้นและร้อน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิโพรพิลีน [10]

ASTM or UL test	Property	Unmodified resin
<i>PHYSICAL</i>		
D792	Specific gravity	0.905
D792	Specific volume (in ³ /lb)	30.8-30.4
D570	Water absorption, 24 hours, 1/8 inch thick (%)	0.01-0.03
<i>MECHANICAL</i>		
D638	Tensile strength (psi)	5,000
D638	Elongation (%)	10-20
D638	Tensile modulus (10 ⁵ psi)	1.6
D790	Flexural modulus (10 ⁵ psi)	1.7-2.5
D256	Impact strength, Izod (ft-lb/in of notch)	0.5-2.2
D785	Hardness, Rockwell R	80-110
<i>THERMAL</i>		
C177	Thermal conductivity (10 ⁴ cal-cm/sec-cm ² -°C)	2.8
D696	Coefficient of thermal expansion (10 ⁵ in/in-°F)	3.2-5.7
D648	Deflection temperature (°F)	

	at 264 psi	125-140
	at 66 psi	200-250
UL94	Flammability rating	HB
<i>ELECTRICAL</i>		
D149	Dielectric strength (V/mil) short time, 1/8-in. thick	500-660
D150	Dielectric constant at 1kHz	2.2-2.6
D150	Dissipation factor at 1kHz	0.0005-0.0018
D257	Volume resistivity (ohm-cm) at 73°F, 50% RH	10~17
D495	Arc resistance(s)	160

2.1.2 การใช้งานของพอลิโพรพิลีน

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีนที่พบเสมอคือ ก่อสร้างเครื่องมือ กระจาเป่า ปกแพ้ม เอกสาร ก่อสร้างและตลับเครื่องสำอาง เครื่องใช้ในครัวเรือน ก่อสร้างบรรจุอาหาร อุปกรณ์ของรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางการแพทย์ ขวดใส่สารเคมี กระจาป้องกันน้ำมันเครื่อง กระจาสอบข้าว และถุงบรรจุปุ๋ย

พลาสติกสำหรับใช้งานในทางการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการส่วนมากทำจากพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีข้อดีคือทนต่อความร้อนสูงได้ สามารถนำไปอบฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดความดัน (autoclave) เมื่อทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ก็สามารถนำเข้าไปเครื่องล้างจานอัตโนมัติ และภาชนะบรรจุอาหาร สำหรับไมโครเวฟได้ [8]

2.2 เกลย์ (Clay)

โดยปกติแล้วเคลย์ส่วนใหญ่มาจากแร่ที่ได้มาจากการระเบิดของภูเขาไฟ หรือกระบวนการ Hydrothermal ของ volcanic rock ซึ่งเมื่อภูเขาไฟระเบิด แร่เกิดการฟุ้งกระจายไปในอากาศและจะถูกลมพัดพาไปตกที่ต่าง ๆ บางทีก็ตกที่ทะเลสาบ ทะเล แผ่นดิน เป็นต้น แล้วทับถมกันเป็นชั้น ประกอบกับสภาวะและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เคลย์เกิดขึ้นมา การวิเคราะห์ทางเคมี

ของเคลย์แสดงส่วนประกอบ คือ silicon, alumina และน้ำ นอกจากนี้ยังมีเหล็ก โลหะอัลคาไลน์และ โลหะอัลคาไลน์เอิร์ทอยู่ด้วย [11]

ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ นั้น ใช้เคลย์เติมลงไปผสมกับผลิตภัณฑ์เพื่อ เป็นการเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์พลาสติกหรือพอลิเมอร์ เพราะเคลย์นั้นมีโครงสร้างเป็น Silicate ที่แข็งแรงจึงทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ได้ ส่วนประเภทของเคลย์ที่นิยมใช้ เป็นสารเสริมแรงนั้น อยู่ในกลุ่มของ Phyllosilicates (Sheet Silicates) หรือที่นิยมเรียกว่า Layered silicates ซึ่งส่วนใหญ่มักพบได้สองชนิดคือ 1:1 Layered silicates และ 2:1 Layered silicates

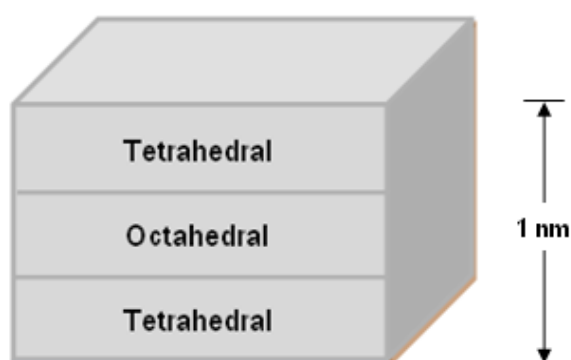
1:1 Layered silicates



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเคลย์แบบ 1:1 Layered silicates [12]

ภายในโครงสร้างของเคลย์ประเภทนี้ประกอบด้วยชั้นของ Tetrahedral sheet ต่ออยู่กับชั้น Octahedral sheet มีความหนาโดยประมาณ 0.7 นาโนเมตร ตัวอย่างของเคลย์ประเภทนี้คือ kaolinite

2:1 Layered silicates

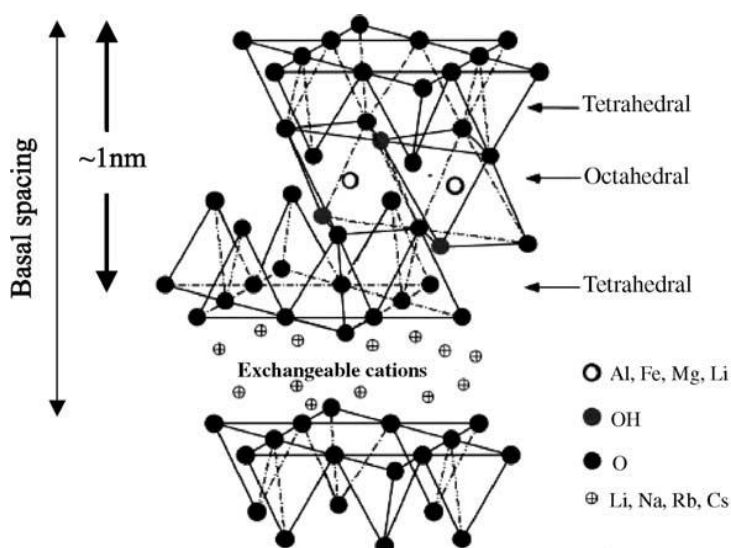


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเคลย์แบบ 2:1 Layered silicates [12]

ภายในโครงสร้างของเคลย์ประเภทนี้ประกอบด้วยชั้นของ Tetrahedral sheet 2 ชั้น ที่ต่ออยู่กับส่วนปลายของชั้น Octahedral sheet ของ Aluminium หรือ Magnesium hydride โดยมีความหนาของชั้นโดยทั่วไปประมาณ 1 นาโนเมตร

2.2.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

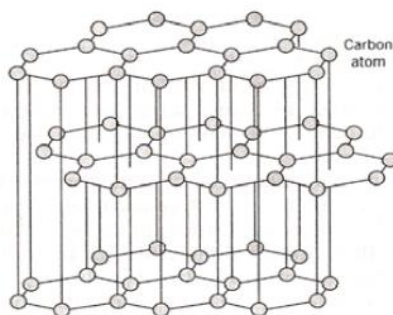
มอนต์มอริลโลไนต์เป็นเคลย์ที่ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการใช้ประโยชน์ทางด้านพอลิเมอร์ เช่นเพื่อการเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ หรือการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซในวัสดุ จัดอยู่ในกลุ่มสมคไทต์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดย M_x คือ Monovalent cation และ x คือ degree of isomorphous substitution (ส่วนมากอยู่ระหว่าง 0.5 and 1.3) มีโครงสร้างเป็นแบบ 2:1 Layered silicates ดังภาพที่ 2.5 ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและอะลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกา และยึดเกาะออกซิเจนร่วมกัน ผลึกจะเชื่อมต่อในแนวระดับเป็นชั้น ๆ และมักมีไอออนของโซเดียมหรือแคลเซียมอยู่ด้วยในระหว่างชั้นโครงสร้าง คุณสมบัติคือสามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจน ทำให้ประจุบวกต่าง ๆ สามารถเข้าแทรกในระหว่างชั้นโครงสร้างได้ง่าย อนุภาคชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงและเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่าย มีค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect Ratio Lamella) สูง โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100-200 นาโนเมตร และมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวประมาณ $750 \text{ m}^2/\text{g}$ [11]



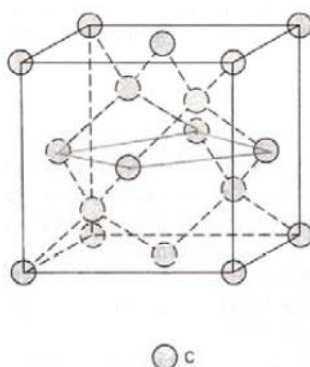
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [14]

2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube)

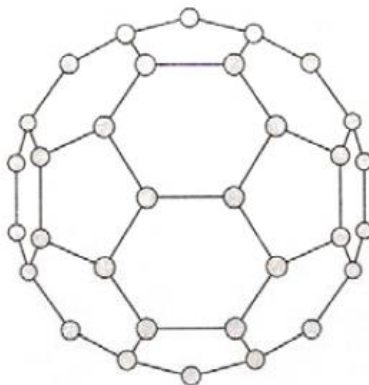
คาร์บอนมีอัญรูปในธรรมชาติ 4 แบบคือ แบบอสัณฐาน (amorphous carbon) แบบแกรไฟต์ (graphite) แบบเพชร (diamond) และแบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminster fullerene) ตัวอย่างโครงสร้างแบบอสัณฐานของคาร์บอนก็คือเขม่าควันโดยทั่วไป ส่วนโครงสร้างแบบแกรไฟต์และแบบเพชรนั้นแตกต่างกันตรงที่แกรไฟต์เป็นโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยของคาร์บอนที่เชื่อมต่อกันเป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม (hexagonal) จะเรียกระนาบนี้ว่า “แกรฟีน (graphene)” ระนาบของคาร์บอนหรือแกรฟีนนี้จะไม่อยู่เดี่ยว ๆ ถ้าหากแกรฟีนมาอยู่ซ้อนรวมกันเป็นชั้น ๆ จะได้วัสดุที่เรียกว่า “แกรไฟต์” แต่ละชั้นสามารถเลื่อนไปมาได้ แต่โครงสร้างแบบเพชรมีการเกาะเกี่ยวกันแน่นเป็นรูปทรงสามมิติ แบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral) ส่วนโครงสร้างแบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน หรือ บัคกี้บอล (buckyball) เป็นโครงสร้างที่เพิ่งค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60 อะตอมมาต่อกันเป็นทรงกลมกลวงแบบลูกฟุตบอล [16]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของแกรไฟต์ (graphite) [15]



ภาพที่ 2.7 เซลล์หนึ่งหน่วย (unit cell) ของโครงสร้างผลึกแบบกล่องจัตุรัสของเพชร [15]



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของโมเลกุล C_{60} [15]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotubes) เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งเพิ่งค้นพบในปี พ.ศ. 2534 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับฟูลเลอร์รีน ต่างกันที่ฟูลเลอร์รีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม (spherical shape) แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (cylindrical shape) ชื่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์มาจากขนาดของมัน ซึ่งมีขนาดระดับนาโน (10^{-9} เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผมมนุษย์ มีความยาวประมาณ 1 ล้านเท่าของความกว้างของมัน คาร์บอนนาโนทิวบ์มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีผนังชั้นเดียวหรือเป็นท่อเดี่ยว เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว (single walled carbon nanotube; SWNT) และชนิดที่มีผนังซ้อนกัน 2 – 50 ชั้นเรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น (multi walled carbon nanotube; MWNT) [17]

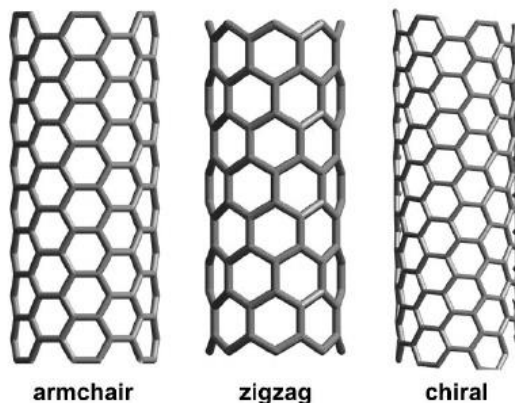
2.3.1 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามจำนวนชั้นของผนังท่อ [18] มีรายละเอียดดังนี้

1) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว (single walled carbon nanotube; SWNT)

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว เกิดจากการม้วน โดยแผ่นแกรไฟต์บาง ๆ เพียงแผ่นเดียวให้เป็นทรงกระบอก ซึ่งการม้วนของแผ่นแกรไฟต์จะอยู่ในรูปของคู่อันดับเวกเตอร์ (n,m) เรียกว่า ไครอลเวกเตอร์ (chiral vector) โดยจำนวน n และ m หมายถึงจำนวนของ unit vector สองทิศทางในโครงสร้างผลึกที่เป็นรังผึ้งของแกรไฟน์ ถ้า $m = 0$ ท่อนาโนจะเรียกว่า แบบซิกแซก (zigzag) ถ้า $n = m$ ท่อนาโนจะเรียกว่า แบบเก้าอี้ (armchair) และถ้าเป็นกรณีอื่นจะเรียกว่า ไครอล

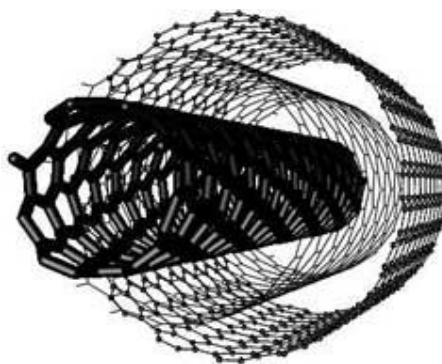
(chiral) สมบัติที่โดดเด่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียวคือความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก



ภาพที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว [19]

2) คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (multi walled carbon nanotube; MWNT)

คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้นประกอบด้วยแผ่นแกรไฟต์หลาย ๆ แผ่นม้วนกันเป็นทรงกระบอกคล้ายกระดาษที่ม้วนอยู่ ส่วนใหญ่ขนาดของท่อที่สังเคราะห์ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 2 นาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้นอธิบายได้ด้วย 2 โมเดล คือ โมเดลตุ๊กตารัสเซีย (Russian doll model) อธิบายว่าแผ่นแกรไฟต์ม้วนตัวเป็นทรงกระบอก โดยมีคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียวแบบ $n,m = (0,8)$ ซ้อนอยู่ในคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียวแบบ $(0,10)$ และ โมเดลกระดาษหนัง (parchment model) เกิดจากแผ่นแกรไฟต์เดี่ยวม้วนรอบ ๆ ตัวเอง และระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นของแกรไฟต์จะเท่ากับ 0.33 – 0.36 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.10 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น [20]

2.3.2 การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายด้าน ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย คุณสมบัติเชิงกลที่พิเศษของคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้ คือเป็นโครงสร้างนาโนที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นอย่างมาก โดยจากการศึกษาพบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กเกินกว่า 60 เท่า อีกทั้งเป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น สามารถทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า จึงได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด อย่างเช่น อุปกรณ์กีฬากอล์ฟและเทนนิส วัสดุเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิตเส้นใยและสิ่งทอ เป็นต้น (และมีแนวโน้มในการใช้ผลิตเป็นโครงสร้างของเครื่องบินอีกด้วย) [21]

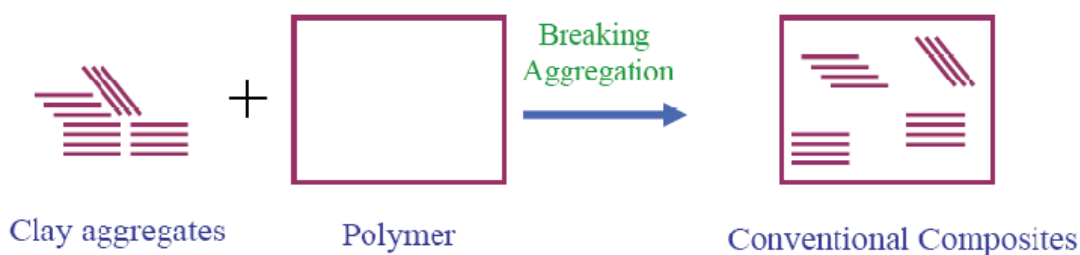
คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการนำความร้อนที่สูง จึงมีการประยุกต์เป็นวัสดุคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นสื่อนำความร้อนทดแทนชิ้นส่วนโลหะในการใช้งานหลายอย่างรวมถึงชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฯลฯ อย่างไรก็ตามค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มีอัตราค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความคาดหวังจากการนำความร้อนที่แท้จริง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์และพื้นที่โดยรอบเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายโอนจากการนำความร้อน [40]

2.4 วัสดุนาโนคอมโพสิต

วัสดุนาโนคอมโพสิตเป็นการอธิบายลักษณะของวัสดุ 2 เฟส โดยที่เฟสหนึ่งเข้าไปกระจายตัวในอีกเฟสหนึ่งในระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) โดยสารที่เดิมมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ตัวอย่างของสารเติมที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิตที่สำคัญคือ carbon black, fumed silica, silver nanocrystal, ion oxide, titanium dioxide และที่สำคัญที่สุดคือ organophilic layered clay สมบัติเด่นที่สำคัญที่ได้จากวัสดุนาโนคอมโพสิตคือสมบัติทางกล ทางความร้อน สมบัติด้านการซึมผ่าน และสมบัติด้านการติดไฟ เป็นต้น [13]

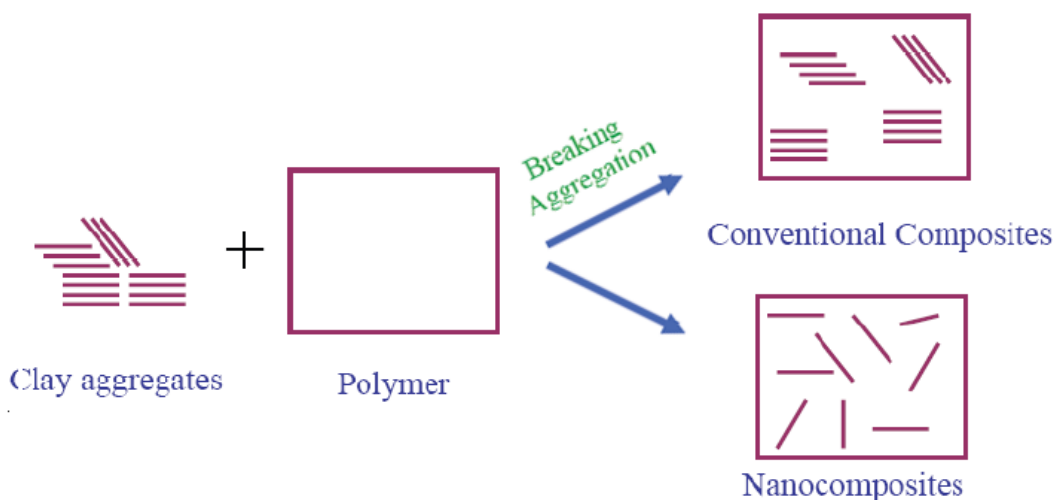
พอลิเมอร์/เคลย์นาโนคอมโพสิต เป็นนาโนเทคโนโลยีซึ่งสารเสริมแรงที่ใช้จะอยู่ในกลุ่ม Smectite clay ตัวอย่างเช่น hectorite, montmorillonite และ synthetic mica โดยวัสดุเหล่านี้ มักนิยมนำมาทำเป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ ลักษณะของเคลย์ในกลุ่ม Smectite นี้ มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ

ในอดีตความสนใจหลักคือการใช้เคลย์ (Clay) เพื่อการเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ และสนใจศึกษาถึงวิธีการทำให้อนุภาคของกลุ่มก้อนเคลย์เกิดการกระจายตัวออกเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 เพื่อทำให้อยู่ในรูปของ micro-sized filler เพื่อเสริมแรงในพอลิเมอร์ ซึ่งจากภาพดังกล่าวทำให้พบว่าเมื่อสามารถกระจายกลุ่มอนุภาคเคลย์ได้ดีก็จะสามารถช่วยสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตให้ดีขึ้นแต่ก็ต้องใช้เคลย์ในปริมาณมากเพื่อปรับปรุง Modulus ในขณะที่ strength และ toughness ของพอลิเมอร์ลดลง



ภาพที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของเคลย์แบบ Conventional Composites [22]

ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลทั้ง modulus, strength และ toughness จึงไม่เพียงแต่ที่จะทำให้อ่อนนุ่มของอนุภาคเคลย์เกิดการแยกออกจากกันเท่านั้น แต่ต้องทำให้แต่ละชั้นในอนุภาคเคลย์แตกออกด้วย เพื่อให้เป็นนาโนคอมโพสิต ดังแสดงในภาพที่ 2.12 [13]



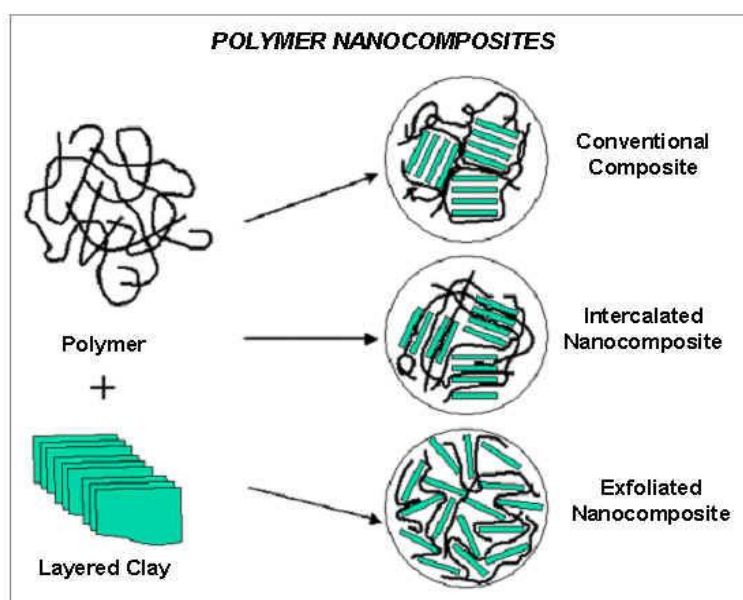
ภาพที่ 2.12 ลักษณะการกระจายตัวของเคลย์แบบ Nanocomposites [22]

มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาระบบพอลิเมอร์/เคลย์ นาโนคอมโพสิต ที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเติมเคลย์ลงในพอลิเมอร์แล้ว สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะใส่ปริมาณเคลย์ลงไปเพียงเล็กน้อย Y. Kojima และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาโดยเติมเคลย์ลงใน Nylon 6 เพียง 3-4% โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณเคลย์ดังกล่าวสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้เป็นอย่างดี โดย Young's Modulus เพิ่มขึ้น 103 % ค่า Tensile strength เพิ่มขึ้น 49% และสมบัติ Heat distortion temperature เพิ่มขึ้น 14% นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมอื่น ๆ เช่น ความสามารถในการทนทานต่อการติดไฟ ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ เป็นต้น

นอกจากนี้ก็ยังส่งผลต่อสมบัติทางแสง (Optical properties) ของวัสดุอีกด้วย เนื่องจากความหนาแน่นของชั้นเคลย์แต่ละชั้นนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าความยาวคลื่นแสง (Wavelength of visible light) ดังนั้นการที่เคลย์เกิดการ exfoliated ได้ดีในพอลิเมอร์ก็จะช่วยทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสีเดียวกับเนื้อพลาสติก และชิ้นงานไม่ขุ่นเหมือนกับการเติมสารเติมเนื้อ (filler) ที่มีขนาดใหญ่

2.4.1 ลักษณะของการกระจายตัวของ Polymer/Clay Nanocomposites

โดยลักษณะการกระจายตัวของวัสดุนาโนคอมโพสิต สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ Polymer/clay Nanocomposites [13]

1) Conventional Composites

การเกิดวัสดุคอมโพสิตในลักษณะเกิดขึ้นเมื่อเคลย์ทำหน้าที่เป็น Conventional Filler โดยที่สายโซ่พอลิเมอร์จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างกลุ่มของชั้นเคลย์ที่ไม่เกิดการแตกออกจากกัน และในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ก็ไม่มีแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นเคลย์

2) Intercalated Nanocomposites

วัสดุนาโนคอมโพสิตแบบนี้เกิดจากการแทรกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ เข้าไปในโครงสร้างของ Layered silicates

3) Exfoliated Nanocomposites หรือ Delaminated Nanocomposites

วัสดุนาโนคอมโพสิตแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อชั้นเคลย์แยกออกจากกันโดยเด็ดขาด และมีการกระจายตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์โดยระยะทางเฉลี่ยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเคลย์ที่ผสมลงไป [13]

2.4.2 วิธีการสังเคราะห์ Polymer/Clay Nanocomposites

วิธีการสังเคราะห์นิยมใช้กันในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 3 วิธี [14] คือ

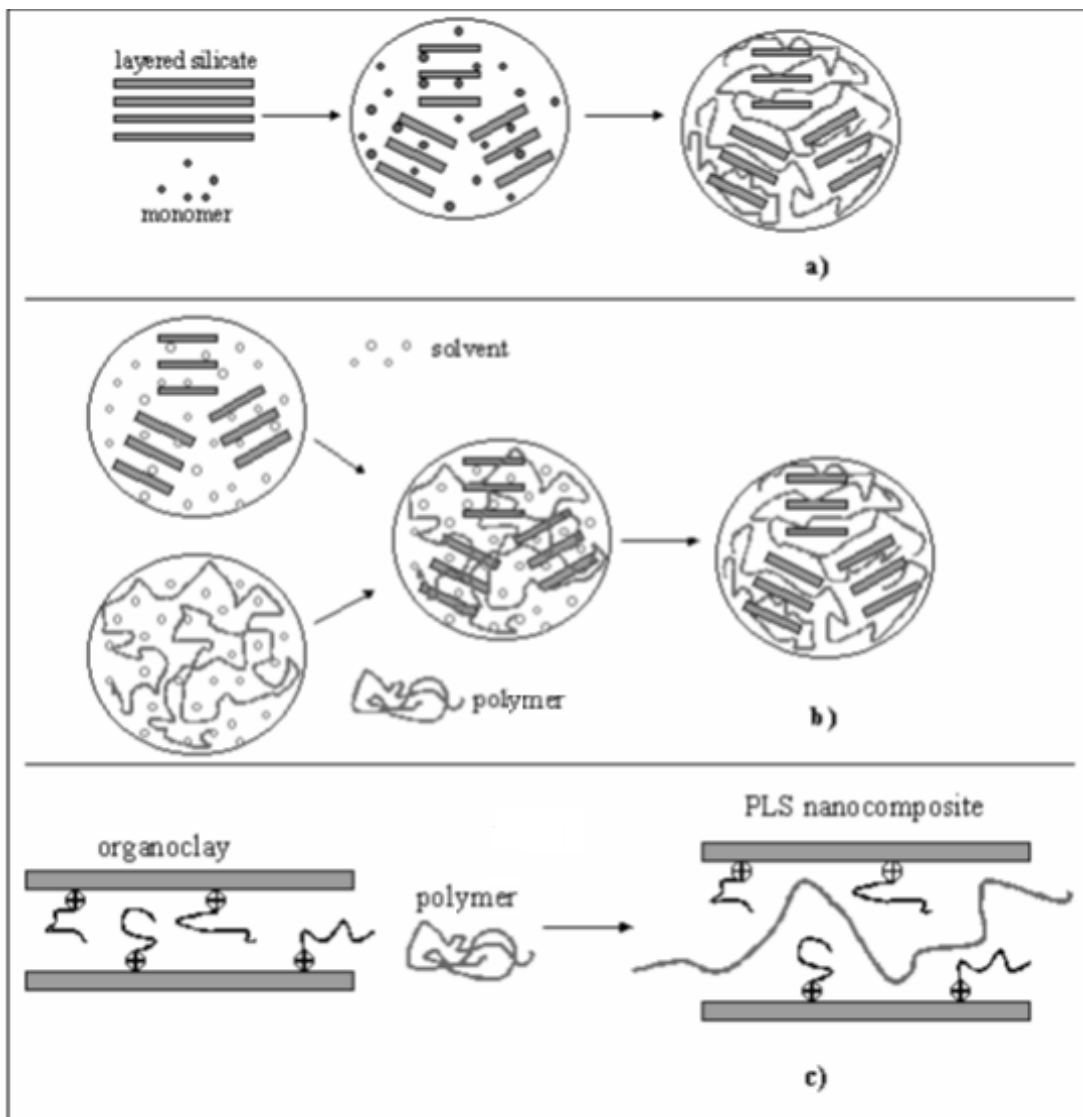
1) In-situ Polymerization

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธี In-situ Polymerization นี้เป็นวิธีแรก ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ Polymer/clay Nanocomposites ปัจจุบันเป็นวิธีทั่ว ๆ ไปในการสังเคราะห์ Thermoset clay Nanocomposites ขั้นตอนแรก Organoclay จะถูกทำให้บวมตัว (Swollen) ใน Monomer ในขั้นตอนนี้ต้องใช้ระยะเวลาาน ซึ่งมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของโมเลกุลมอนอเมอร์ หลังจากทีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะทำการเติมเทอร์โมเซต (Thermoset) เช่น Epoxies หรือ Unsaturated polyester และ Curing agent หรือ Peroxide ตามลำดับ ในระหว่างการเกิด Swelling phase จะเกิด Surface energy ของเคลย์สูงเข้าไปจับกับ Monomer molecule ที่มีขั้ว ทำให้เกิดการพองตัวออกกระยะระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้น

2) วิธีการใช้สารละลาย (Solution Method)

วิธีการนี้จะคล้ายกับ In-situ polymerization โดย Organoclay จะถูกนำมากระจายตัวในสารละลายที่มีขั้ว เช่น Toluene หรือ N,N-Dimethylformamide ทำให้เกิดโครงสร้างในลักษณะที่เป็นเจล (Gel) หลังจากนั้นพอลิเมอร์ที่ละลายได้ในตัวทำละลายนี้ ถูกนำมาเติมในตัวทำละลายและเกิดการกระจายตัวเป็นแบบ Intercalation ระหว่างชั้นของเคลย์ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการกำจัดตัวทำละลายออก โดยการระเหยออกไปซึ่งปกติจะใช้ตู้อบ ข้อดีของการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือสามารถ

สังเคราะห์ Intercalated nanocomposites ที่พอลิเมอร์มีความเป็นขั้วต่ำหรือไม่มีขั้วเลย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยากที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากต้องใช้ปริมาณของตัวทำละลายในปริมาณที่มาก ทำให้สิ้นเปลือง และมีต้นทุนในการผลิตสูง



ภาพที่ 2.14 วิธีการสังเคราะห์ Polymer/clay Nanocomposites [25]

a) in situ polymerization; b) intercalation of polymer from solution; c) melt compounding

3) Melt Intercalation

วิธี Melt Intercalation เป็นการผสมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่ผ่านการหลอมแล้ว กับ Organoclay เพื่อให้เกิดระยะห่างกันระหว่างพอลิเมอร์กับเคลย์ชั้น หลังจากผสมกันเรียบร้อยแล้ว จะผ่านกระบวนการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิเหนือ T_g (Glass Transition Temperature) ของพอลิเมอร์และเกิดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิต[24] วิธีการสังเคราะห์วิธีนี้ช่วยให้ พอลิเมอร์เข้าไปแทรกตัวอยู่ในระหว่างชั้นของซิลิเกตได้ดี กระบวนการ Melt Intercalation นี้ในปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้เลย โดยสามารถจะเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์/เคลย์ ได้โดยใช้เครื่อง Extrusion ในโรงงาน

2.5 ค่าความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability)

ค่าการส่งผ่านโมเลกุลของของก๊าซหรือไอน้ำผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ หรือที่เรียกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) เป็นค่าที่ถูกแสดงในหลายมิติและหลายหน่วยมาก แต่โดยทั่วไปแล้วจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่าน (permeability coefficient) มีมิติตามสมการที่ 1.1 [26]

$$P = \frac{(\text{mass of permeating gas})(\text{membrane thickness})}{(\text{time})(\text{membrane area})(\text{pressure difference across membrane})} \quad (1.1)$$

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์และก๊าซ โดยลักษณะคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีผลต่อค่าความสามารถการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ ขึ้นอยู่กับสมบัติต่าง ๆ [27] ดังนี้

- 1) โครงสร้างของพอลิเมอร์
- 2) ลักษณะความเป็นผลึก
- 3) ความหนาแน่นของพอลิเมอร์
- 4) การจัดเรียงตัวของโมเลกุล และค่าความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์
- 5) น้ำหนักโมเลกุลและระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน
- 6) พันธะคู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์
- 7) ความมีสมมาตรและสภาพขั้วของพอลิเมอร์
- 8) สารเติมและพลาสติกไซเซอร์
- 9) สารเพิ่มเนื้อและเม็ดสี

10) การเชื่อมโยงของสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ (P) ของฟิล์มพอลิเมอร์ [26]

ฟิล์มพอลิเมอร์	อุณหภูมิ °C	P × 10 ¹³ (cm ³ cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹)		
		O ₂	CO ₂	H ₂ O
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (SG=0.914)	25	2.2	9.5	68
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (SG=0.964)	25	0.3	0.27	9.0
พอลิโพรพิลีน	30	1.7	6.9	51.0
พอลิไวนิลคลอไรด์	25	0.034	0.12	206
พอลิสไตรีน	25	1.9	-	1350
พอลิเอทิลเมทาคริเลต	25	0.889	3.79	2380
พอลิอะคริโลไนไตรด์	25	0.00015	0.00060	230

2.6 แบบจำลองของการซึมผ่านของก๊าซ (Modeling of Permeability)

การซึมผ่านโมเลกุลของสารขนาดเล็กผ่านเมทริกซ์อินทรีย์จะถูกกำหนดโดยการละลายและการแพร่ของโมเลกุลขนาดเล็กในเมทริกซ์ รวมทั้ง mean square displacement (ความยาวของเส้นทางเดินทั้งหมดหารด้วยความหนาของตัวอย่าง) อัตราส่วนของ permeability coefficient ของวัสดุคอมโพสิต P_c และพอลิเมอร์เมทริกซ์ P_m ยังมีความสัมพันธ์กับ tortuosity factor, τ ซึ่งหาได้โดยความยาวของส่วนที่แพร่ผ่านแต่ละอนุภาค (d') หารด้วยความหนาของฟิล์ม (d) ดังสมการ [28]

$$\frac{P_c}{P_m} = \frac{\phi_m}{\tau} \quad (1.2)$$

$$\tau = \frac{d'}{d} \quad (1.3)$$

โดย P_c = permeability of composite
 P_m = permeability of pure polymer
 ϕ_m = volume fraction of polymer
 τ = tortuosity factor

- d' = path length of diffusing particle
 d = thickness of membrane

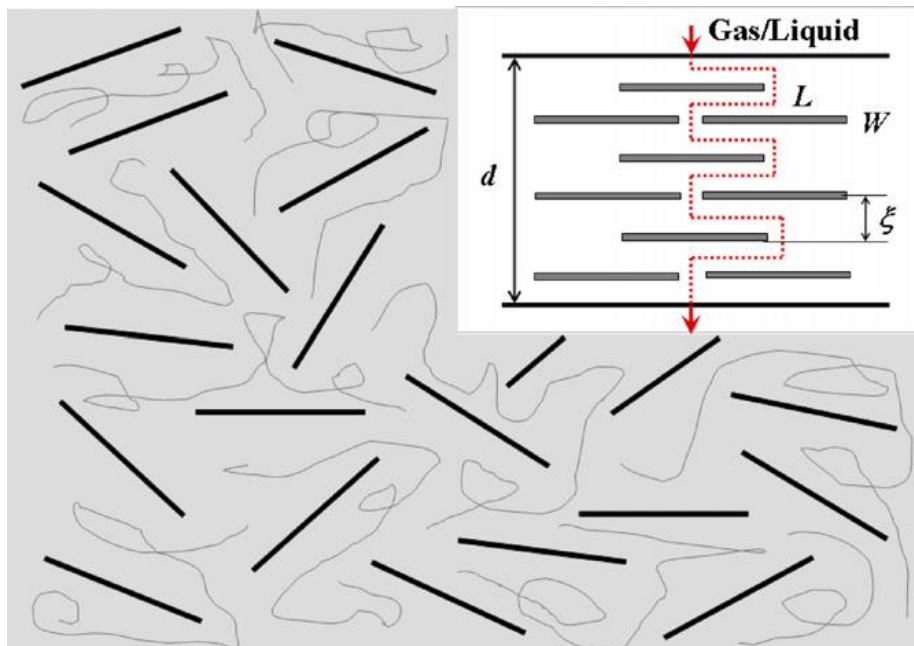
2.6.1 Nielsen Model

Nielsen model เป็นแบบจำลองที่แสดงถึงผลของตัวเติม (filler) ในวัสดุคอมโพสิตที่มีต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ โดยการซึมผ่านในวัสดุคอมโพสิตจะน้อยกว่าการซึมผ่านในเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมตัวเติมใด ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการซึมผ่านคือ ความคดเคี้ยวของเส้นทาง (path tortuosity) ในวัสดุคอมโพสิต (สมมุติให้เส้นทางของการซึมผ่านของสารไม่ข้ามผ่านอนุภาคตัวเติมใด ๆ ตัวเติมไม่มีการซึมผ่านของโมเลกุลก๊าซและของเหลว และตัวเติมทั้งหมดมีพื้นที่ผิวส่วนที่กว้างขนานกับพื้นผิวของฟิล์ม ตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่) [29] สมการแสดงดังนี้

$$\frac{P_c}{P_m} = \frac{1 - \phi_f}{1 + \frac{L}{2W} \phi_f} = \frac{\phi_m}{\tau} \quad (1.4)$$

- โดย ϕ_f = volume fraction of filler (clay)
 L = length of clay sheets
 W = width of clay sheets
 L/W = filler aspect ratio

จากภาพที่ 2.15 แสดงเส้นทางการซึมผ่านของโมเลกุลใน polymer-layered silicate nanocomposites ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแผ่น silicate จะกระจายตัวอยู่แบบ random ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่ในกรอบสี่เหลี่ยมขวามบนแสดงให้เห็นถึงแสดงเส้นทางการซึมผ่านของโมเลกุลใน polymer-layered silicate nanocomposites ตามแบบจำลองของ Nielsen ที่อนุภาคตัวเติมทั้งหมดมีพื้นที่ผิวส่วนที่กว้างขนานกับพื้นผิวของฟิล์ม



ภาพที่ 2.15 เส้นทางการซึมผ่านของโมเลกุล
ใน polymer-layered silicate nanocomposites [30]

2.6.2 Bharadwaj Model หรือ Modified Nielsen Model

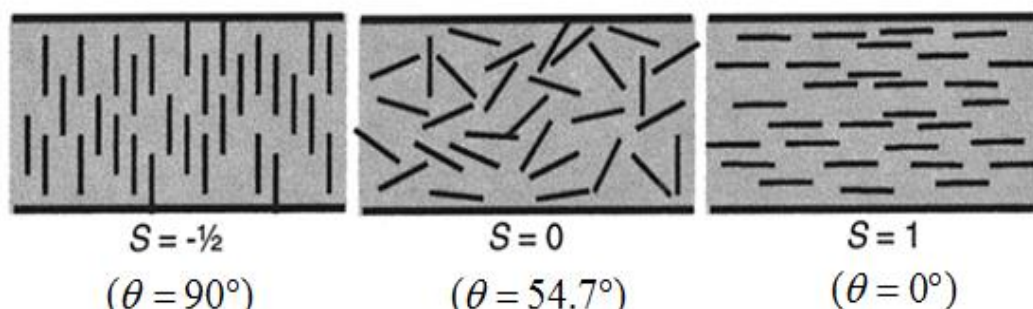
Bharadwaj ได้ปรับปรุงแบบจำลองของ Nielsen โดยการรวมเอา orientation parameter S ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวของ clay sheet โดยค่า S นี้มีความสัมพันธ์กับมุม θ [31] สมการของ Bharadwaj แสดงดังนี้

$$\frac{P_c}{P_m} = \frac{1 - \phi_f}{1 + \frac{L}{2W} \phi_f \left(\frac{2}{3}\right) \left(s + \frac{1}{2}\right)} \quad (1.5)$$

$$S = \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (1.6)$$

โดย S = orientation parameter

θ = angle between direction of preferred orientation and sheet normal



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างระดับของ orientation parameter
ที่มีผลต่อ polymer-layered silicate nanocomposites [31]

2.7 การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

การนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน โมเลกุลที่ได้รับความร้อนจะสั่นสะเทือนไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงต่อกันไปเรื่อย ๆ วัสดุจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, k)

ในกรณีที่อุณหภูมิทุก ๆ จุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เรียกว่า การนำความร้อนที่สภาวะคงที่ (Steady state heat conduction) ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ ในทางกลับกันหากอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้นหรือส่วนใดส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งอัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนค่าตามเวลา ในกรณีนี้เรียกว่า การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state heat conduction) ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือผลต่างของอุณหภูมิ มิติรูปร่างของวัตถุและคุณสมบัติของวัตถุ ซึ่งสมการที่ 1.7 และสมการที่ 1.8 แสดงความสัมพันธ์ของการนำความร้อนในสภาวะคงตัวผ่านผนังที่มีความหนา ΔX และพื้นที่ผิว A และผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาของผนังเป็น $\Delta T = T_2 - T_1$ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการนำความร้อนของผนัง ผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนา พื้นที่การนำความร้อนและเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลาง ดังสมการ

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (1.7)$$

ในกรณี $\Delta X \rightarrow 0$ สมการที่ 1.7 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยได้ ดังนี้

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dX} \quad (1.8)$$

ซึ่งสมการที่ 1.8 เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of heat conduction)

ตารางที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์ [33,34,35]

Material	Thermal Conductivity at 25°C [W/m·K]
Low density polyethylene (LDPE)	0.30
High density polyethylene (HDPE)	0.44
Polypropylene (PP)	0.11
Polystyrene (PS)	0.14
Polymethylmethacrylate (PMMA)	0.21
Nylon-6 (PA6)	0.25
Nylon-6.6 (PA66)	0.26
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	0.15
Poly(butylene terephthalate) (PBT)	0.29
Polycarbonate (PC)	0.20
Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) copolymer (ABS)	0.33
Polyetheretherketone (PEEK)	0.25
Polyphenylene sulfide (PPS)	0.30
Polysulfone (PSU)	0.22
Polyphenylsulfone (PPSU)	0.35

Polyvinyl chloride (PVC)	0.19
Polyvinylidene difluoride (PVDF)	0.19
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.27
Poly(ethylene vinyl acetate) (EVA)	0.34
Polyimide, Thermoplastic (PI)	0.11
Poly(dimethylsiloxane) (PDMS)	0.25
Epoxy resin	0.19

ตารางที่ 2.4 ค่าการนำความร้อนของ thermally conductive fillers [36-39]

Material	Thermal Conductivity at 25°C (W/m·K)
Graphite	100~400 (on plane)
Carbon black	6~174
Carbon Nanotubes	2000~6000
Diamond	2000
PAN-based Carbon Fibre	8~70 (along the axis)
Pitch-based Carbon Fibre	530~1100 (along the axis)
Copper	483
Silver	450
Gold	345
Aluminum	204
Nickel	158
Boron Nitride	250~300
Aluminum nitride	200
Beryllium oxide	260

2.8 แบบจำลองการหาค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต

แบบจำลองสำหรับการทำนายเพื่อหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตได้รับการพัฒนาขึ้นมากมายโดยใช้พื้นฐานเดียวกัน แบบจำลองสองรูปแบบพื้นฐานที่แสดงขอบเขตบน (upper bound) และขอบเขตล่าง (lower bound) ของค่า Thermal Conductivity ของวัสดุคอมโพสิตตามกฎการผสม (mixture rule) คือ series model และ parallel model ซึ่งความสัมพันธ์กับ volume fraction [40] ตามสมการ

$$\text{parallel model:} \quad k_c = k_m \phi_m + k_f \phi_f \quad (1.9)$$

$$\text{series model:} \quad k_c = \frac{1}{\left(\frac{\phi_m}{k_m} + \frac{\phi_f}{k_f} \right)} \quad (1.10)$$

โดย k_c = Thermal Conductivity of composite
 k_m = Thermal Conductivity of pure polymer
 k_f = Thermal Conductivity of filler
 ϕ_m = volume fraction of polymer
 ϕ_f = volume fraction of filler

2.9 คุณสมบัติเชิงกล

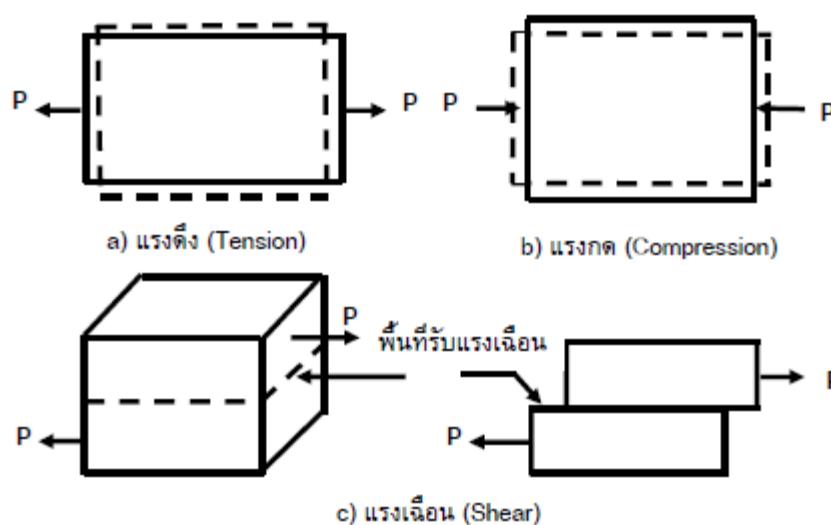
คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้น ๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากกระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากกระทำ

(ก) ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังภาพที่ 2.17(a)

(ข) ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังภาพที่ 2.17(b)

(ค) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำในทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังภาพที่ 2.17(c) มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน



ภาพที่ 2.17 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ [26]

ความเค้น (Stress) = แรงที่กระทำ / พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น

(หน่วยของความเค้นอาจเป็น N/mm^2 หรือ MPa หรือ kgf/mm^2 หรือ psi หรือ ksi ก็ได้)

ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะความเครียดสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

(ก) การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงอยู่เนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

(ข) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรม

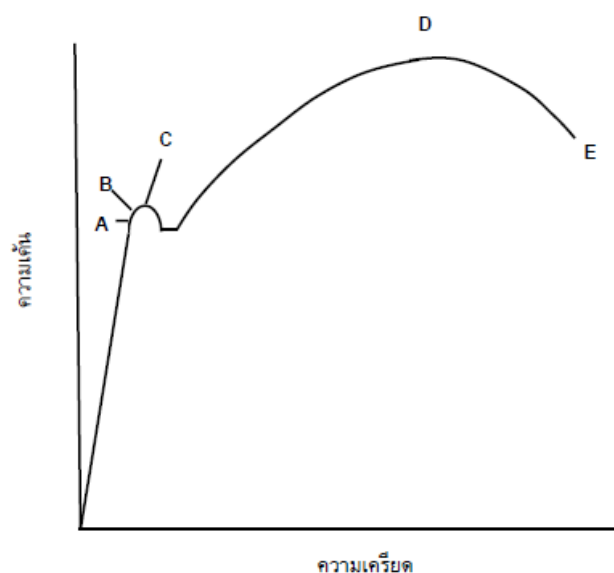
คืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าขีดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติก จะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม

การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

(ก) แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

(ข) แบบเนียน เรียกว่า ความเครียดเนียน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ



ภาพที่ 2.18 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)
แบบมีจุดคราก (Yield Point) [25]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship) สามารถแสดงด้วยเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ภาพที่ 2.18 การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ และความเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้ออกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

ในวิธีการทดสอบนี้ตัวอย่างที่ถูกดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 2.18 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ และมาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิสัยยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุสำหรับโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่าความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า

Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้นโดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง ที่จุดสุดท้ายของกราฟ (จุด E) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture)

Tensile Stress = แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ขึ้นทดสอบขาด (N) /พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น (mm^2)

Young's Modulus = ความเค้น/ความเครียด

$$= \sigma / \epsilon$$

$$= (F \div A) / (\Delta L \div L)$$

$$= (F.L) / (A.\Delta L)$$

โดย E = มอดูลัสของยัง มีหน่วยเป็น ปาสกาล (Pa) หรือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)

σ = ความเค้นตามยาว

ϵ = ความเครียดตามยาว

F = แรง ในหน่วย นิวตัน

A = พื้นที่หน้าตัดรับแรง ในหน่วย ตารางเมตร

ΔL = ส่วนที่ยืดออกของวัสดุ ในหน่วย เมตร

L = ความยาวปกติของวัสดุ ในหน่วย เมตร

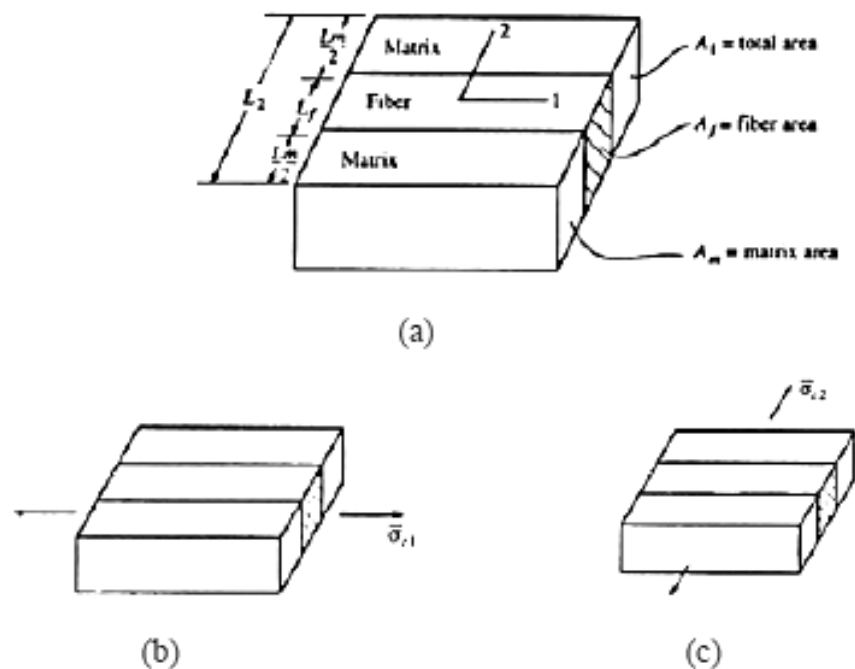
2.10 แบบจำลองการหาค่า Tensile Stress และ Young's Modulus ของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต

แบบจำลองการหาค่า Tensile Stress และ Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิต ต้องใช้ข้อสมมุติที่จะทำให้เกิดรูปแบบที่ง่ายและใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เป็นจริงมากที่สุด ซึ่งได้แก่

1. สารตัวเติมเรียงตัวสลับกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ และเรียงตัวขนานกัน ดังภาพที่ 2.19 a
2. สารตัวเติมนั้นจะต้องมีการกระจายอย่างต่อเนื่อง
3. วัสดุคอมโพสิตมีความเป็นเนื้อเดียว (Homogeneity)

4. เมตริกซ์เป็นวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic) คือมีคุณสมบัติอีลาสติกเท่ากันทุกทิศทาง แต่สารตัวเดิมเป็นได้ทั้งวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic) และ ออโรโทรปิก (Orthotropic)

- 5. เกิดจากความเครียดที่สม่ำเสมอทุกชั้น โดยพันธะเคมีระหว่างชั้นสมบรูณ์ขณะที่เกิดความเค้น
- 6. ความเค้นและความเครียดเป็นสัมพัทธ์เชิงเส้น (Linearity between stress and strain) นั่นคือวัตถุนั้นหากมีความเค้นมากจะทำให้เกิดความเครียดในทิศทางของความเค้นและเป็นปฏิภาคตรงกับความเค้นที่มากกระทำ เรียกว่ากฎของฮุก (Hooke's law)



ภาพที่ 2.19 (a) การเรียงตัวในวัสดุคอมโพสิต

(b) Longitudinal Normal Stress (c) Transverse Normal Stress [60]

2.10.1 แบบจำลองการหาค่า Tensile Stress

แบบจำลองสำหรับการทำนายเพื่อหาค่า Tensile Stress ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต แบบจำลองสองรูปแบบพื้นฐานที่แสดงขอบเขตบน (upper bound) และขอบเขตล่าง (lower bound) ของค่า Tensile Stress ของวัสดุคอมโพสิตตามกฎการผสม (Rule of Mixture for Longitudinal Stress) คือ series model มีการเรียงตัวของสารตัวเดิมในวัสดุคอมโพสิตตามแนวแรงดังภาพที่ 2.19b

และ (Inverse Rule of Mixture for Transverse Stress) คือ parallel model มีการเรียงตัวของสารตัวเติมในวัสดุคอมโพสิตขนานกับแนวแรงดั่งภาพที่ 2.19c ซึ่งความสัมพันธ์กับ volume fraction ตามสมการ

$$\text{series model: } \sigma_c = \sigma_m \phi_m + \sigma_f \phi_f \quad (1.11)$$

$$\text{parallel model: } \sigma_c = \frac{1}{\left(\frac{\phi_m}{\sigma_m} + \frac{\phi_f}{\sigma_f} \right)} \quad (1.12)$$

โดย σ_c = Tensile Stress of composite

σ_m = Tensile Stress of polymer

σ_f = Tensile Stress of filler

ϕ_m = volume fraction of polymer

ϕ_f = volume fraction of filler

2.10.2 แบบจำลองการหาค่า Young's Modulus

แบบจำลองสำหรับการทำนายเพื่อหาค่า Young's Modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต แบบจำลองสองรูปแบบพื้นฐานที่แสดงขอบเขตบน (upper bound) และขอบเขตล่าง (lower bound) ของค่า Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิตตามกฎการผสม (Rule of Mixture for Longitudinal Modulus) คือ series model มีการเรียงตัวของสารตัวเติมในวัสดุคอมโพสิตตามแนวแรงดั่งภาพที่ 2.19b และ (Inverse Rule of Mixture for Transverse Modulus) คือ parallel model มีการเรียงตัวของสารตัวเติมในวัสดุคอมโพสิตขนานกับแนวแรงดั่งภาพที่ 2.19c ซึ่งความสัมพันธ์กับ volume fraction ตามสมการ

$$\text{series model: } E_c = E_m \phi_m + E_f \phi_f \quad (1.13)$$

$$\text{parallel model: } E_c = \frac{1}{\left(\frac{\phi_m}{E_m} + \frac{\phi_f}{E_f} \right)} \quad (1.14)$$

โดย E_c = Young's Modulus of composite

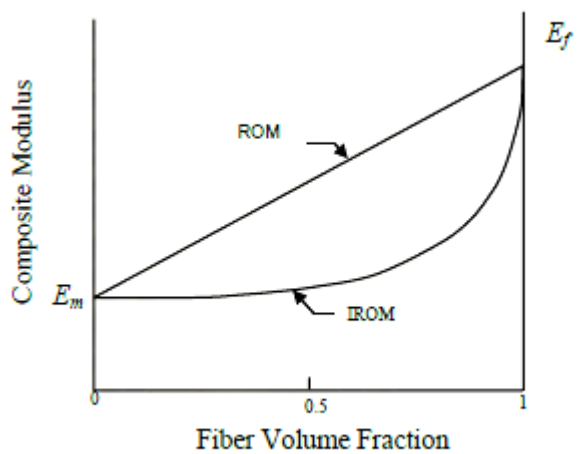
E_m = Young's Modulus of polymer

E_f = Young's Modulus of filler

ϕ_m = volume fraction of polymer

ϕ_f = volume fraction of filler

จากสมการแบบจำลองสามารถนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rule of Mixture for Longitudinal Modulus (ROM) Inverse Rule of Mixture for Transverse Modulus (IROM) ของวัสดุคอมโพสิต และ Volume Fraction ของสารตัวเติมได้ดังภาพที่ 2.20



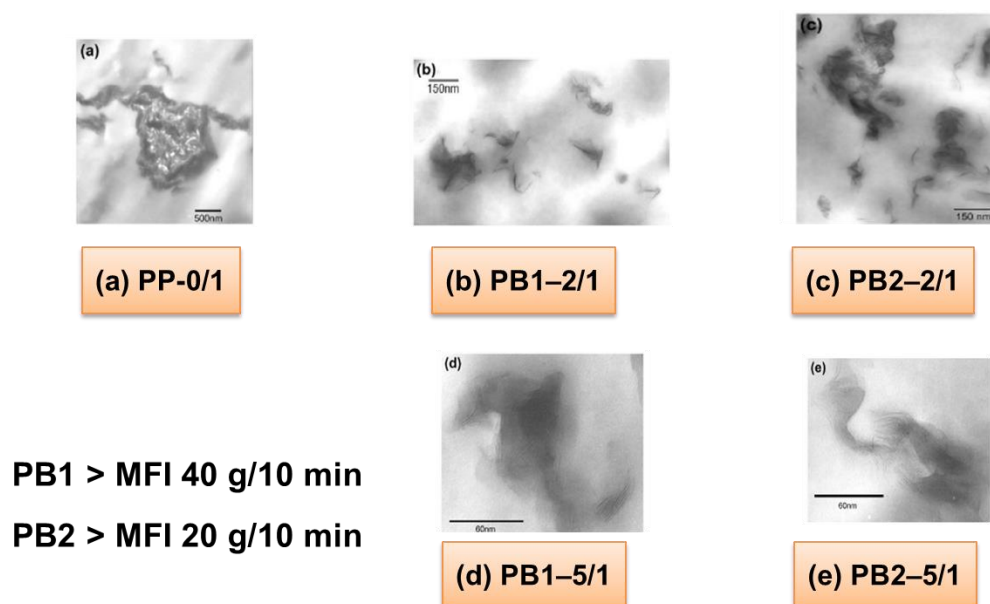
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิต และ Volume Fraction ของสารตัวเติม [61]

บทที่ 3

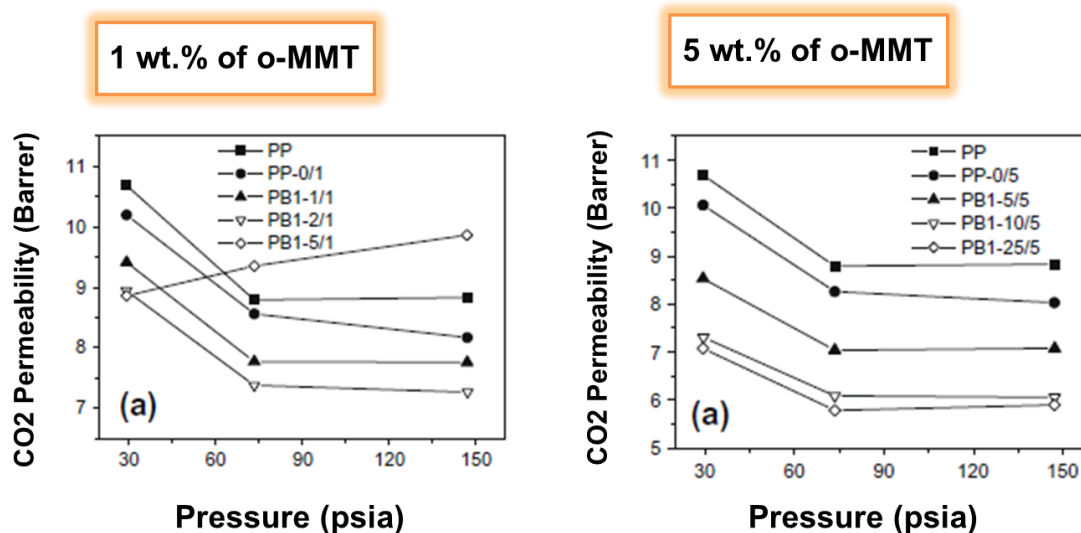
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.C. Chinellato และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาผลของตัวประสานที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/ออร์แกโนเคลย์ ที่เตรียมด้วยวิธีการ melt intercalation ใช้ acrylic acid grafted polypropylene (PPAA) เป็นตัวประสาน โดยใช้ PPAA 2 ชนิด คือ PB1 (melt flowrate index 40 g/ 10 min) และ PB2 (melt flowrate index 20 g/ 10 min) ปริมาณของออร์แกโนเคลย์ (o-MMT) ที่ใส่คือ 0, 1 และ 5% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนโดยมวลของปริมาณ PP-g-AA/o-MMT คือ 0/1, 1/1, 2/1 และ 5/1 วัสดุคอมโพสิตเตรียมโดย twin-screw extruder ด้วยอุณหภูมิ (จากปากกรวยป้อนถึงไวดทางออก) คือ 200, 220, 240, 230, 240 และ 220 °C อัตราเร็วของสกรูคือ 100 รอบต่อนาทีและ อัตราการป้อนสารคือ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยการผสมในขั้นตอนแรกจะเตรียมพอลิโพรพิลีน masterbatch ที่มีปริมาณ o-MMT 10% โดยน้ำหนัก ใน extruder และ dilute ด้วยพอลิโพรพิลีนในขั้นตอนที่ 2 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยศึกษาลักษณะและการกระจายตัวของชั้นเคลย์ด้วยเครื่อง wide angle X-ray scattering (WAXS) และ transmission electron microscopy (TEM) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.1 แสดงภาพจากการเทคนิค TEM ของวัสดุคอมโพสิต PP/o-MMT โดยภาพ a ไม่เติม PPAA เคลย์จะเกาะตัวเป็นก้อน แต่เมื่อเติม PPAA เป็น 2 เท่าของ o-MMT ดังภาพ b และ c เคลย์จะมีการกระจายตัวในคอมโพสิตมากขึ้น โดย PB1 มีการกระจายตัวดีกว่า PB2 เพราะ melt flowrate index มากกว่าช่วยให้เกิดการผสมกันได้ดีมากขึ้นและภาพ d และ e แต่เมื่อเติม PPAA เป็น 5 เท่าของ o-MMT เคลย์จะมีการกระจายตัวในคอมโพสิตมากกว่าการเติม PPAA เป็น 2 เท่าของ o-MMT โดย PB1 มีการกระจายตัวดีกว่า PB2 เพราะ melt flowrate index มากกว่าเช่นเดียวกันให้ ผลสรุปว่าเมื่อไม่ได้ใส่ PPAA การกระจายตัวของเคลย์ใน PP/o-MMT จะอยู่ในระดับ micrometer scale จะเป็น conventional microcomposite แต่เมื่อใส่ PPAA จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์การแทรกตัวของไปในชั้นของเคลย์ได้ดีกว่า ทำให้มีโครงสร้างแบบ intercalated nanocomposites และมีบางส่วนที่ชั้นของเคลย์แยกออกจากกันอย่างเด็ดขาดเกิดเป็น โครงสร้างแบบ exfoliated nanocomposites การวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัสดุคอมโพสิตแสดงดังภาพที่ 3.2 พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงในทุกตัวอย่างที่มีการใส่เคลย์ลงไป นอกจากนี้การใส่ตัวประสานก็มีผลทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงถึง 50% เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน และตัวอย่างที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดหรือค่าความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ (barrier properties) ที่ดีที่สุดคือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน compatibilizer/organoclay เป็น 5/1

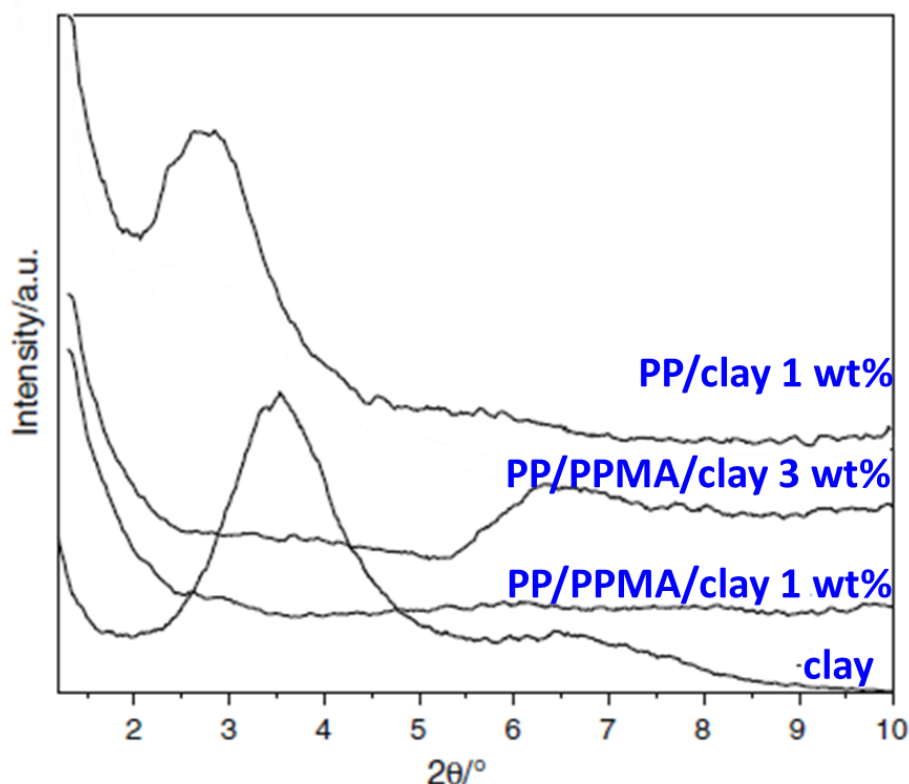


ภาพที่ 3.1 TEM micrographs of PP/PPAA/o-MMT nanocomposites



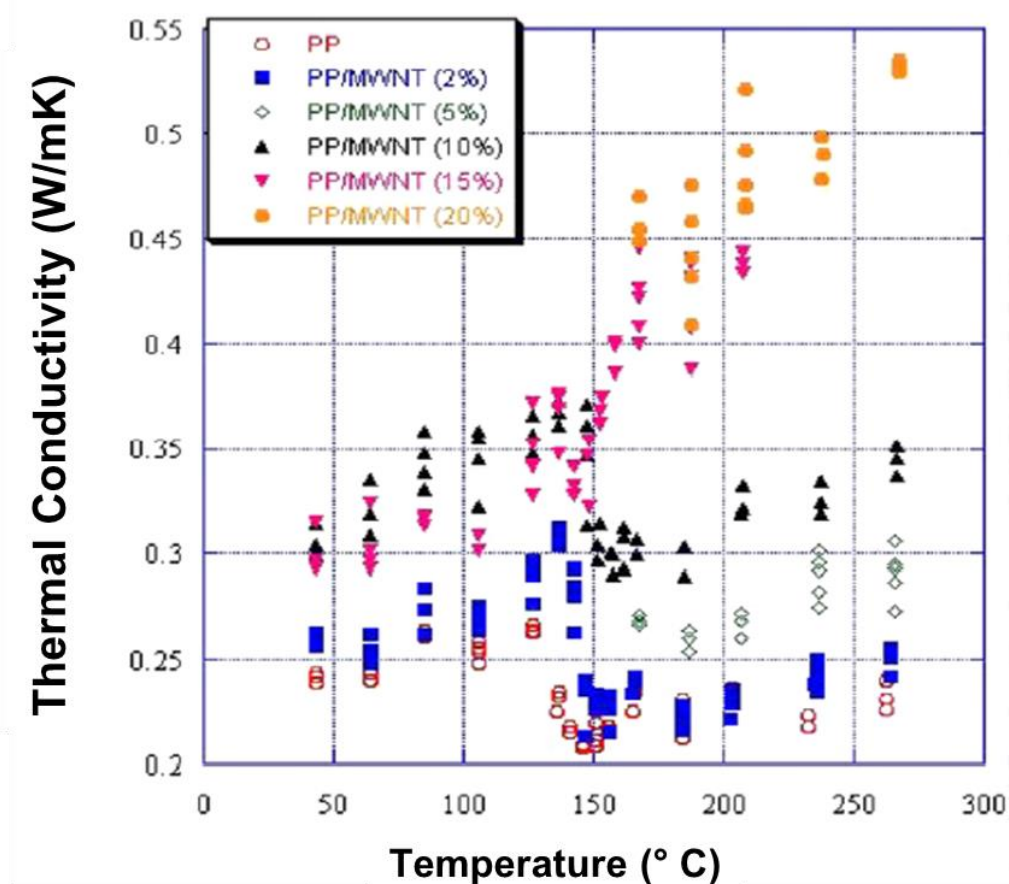
ภาพที่ 3.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ PP and PP-g-AA/o-MMT nanocomposites ที่ความดันต่าง ๆ

Luljeta Raka และคณะ [42] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตของพอลิโพรพิลีน /layered silicate ที่เตรียมโดย single-step melt-mixing method โดยใช้ iPP (isotactic PP) เป็นเมทริกซ์ โดยมีตัวประสานคือ Maleic anhydride grafted polypropylene (PPMA) เตรียมวัสดุคอมโพสิตด้วยเครื่อง recirculating co-rotating twinscrew micro-extruder ปริมาตร 5 cm^3 ที่อุณหภูมิ $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 min โดยผสมเคลย์ที่ความเข้มข้น 1 และ 3 % โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วย compression molded ที่อุณหภูมิ $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 นาที โดยไม่ต้องใช้ความดัน หลังจากนั้นก็อัดด้วยความดัน 100 bars เป็นเวลา 3 นาที และหล่อเย็นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องด้วยคอยล์น้ำของเครื่อง ได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ $100\text{-}300 \text{ }\mu\text{m}$ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย wide-angle X-ray diffraction (WAXD), transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) และ differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าที่ปริมาณเคลย์ 1% โดยน้ำหนัก โครงสร้างของวัสดุนาโนคอมโพสิตจะเป็นแบบ exfoliated และที่ความเข้มข้นของเคลย์สูงกว่า โครงสร้างของวัสดุนาโนคอมโพสิตก็จะเป็นแบบผสมระหว่าง intercalated และ exfoliated ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray diffraction (WAXD)

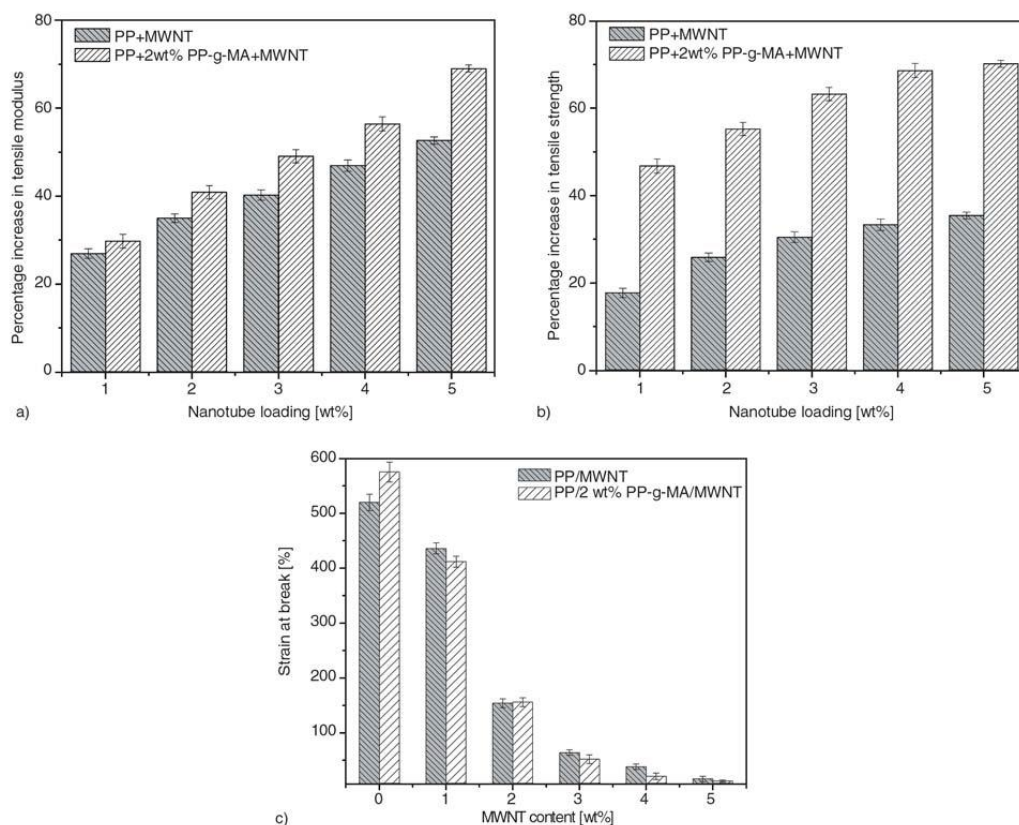
Takashi Kashiwagi และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการทนต่อการติดไฟของวัสดุนาโนคอมโพสิตของพอลิโพรพิลีน/คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น (PP/MWNT) ปริมาณของ MWNT ที่ใช้คือ 0.5-4 % โดยน้ำหนัก การแพร่กระจายของ MWNTs ในวัสดุนาโนคอมโพสิตวิเคราะห์ได้โดย SEM และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง(optical microscopy) คุณสมบัติติดไฟวัดด้วย cone calorimeter ในบรรยากาศไนโตรเจน ค่า thermal conductivities ของวัสดุนาโนคอมโพสิตถูกวัดเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.4 พบว่าการนำความร้อนของวัสดุนาโนคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ MWNT



ภาพที่ 3.4 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิต PP/MWNT โดยวัดเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

K. Prashantha [44] ศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตของพอลิโพรพิลีน/คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น (PP/MWNT) ที่เตรียมโดยการทำให้ materbatch ของ PP/MWNT (MWNT เข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก) เจือจางลง ด้วยวิธี melt compounding โดยใช้ตัวประสานคือ Maleic anhydride grafted polypropylene (PPMA) เพื่อช่วยให้ MWNT กระจายตัวในวัสดุคอมโพสิตได้ดี

ขึ้น ผสมด้วยเครื่อง twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 195-210 °C อัตราเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาที ปริมาณ PPMA ที่ใช้คือ 2% โดยน้ำหนัก และปริมาณเคลย์ 1-5% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปขึ้นรูป เพื่อศึกษาสมบัติวิทยากระแส (Rheological) โดยการศึกษาศักยภาพกระแส โดยใช้ compression moulding ที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 2 นาที ได้ชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร และเพื่อ การศึกษาสมบัติเชิงกลจะขึ้นรูปโดยใช้ injection moulded ที่อุณหภูมิ 205-220 °C ความดัน 300 bar ความเร็วรอบของสกรู 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่าการเติม PP-g-MA มีผลต่อ คุณสมบัติวิทยากระแส สมบัติเชิงกลและสถานะวิทยาของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่เติม MWNT ใน ปริมาณต่าง ๆ การวิเคราะห์ด้วย Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าในตัวอย่างที่เติม PPMA คาร์บอนนาโนทิวบ์มีการกระจายที่เหมาะสมอย่างสม่ำเสมอ การกระจายตัวที่ดีขึ้น การเติม PPMA ยังทำให้ dynamic moduli, viscosity, tensile moduli, flexural moduli and Charpy impact resistance เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุนาโนคอมโพสิตที่ไม่ได้เติมตัวประสาน ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ค่า tensile strength, modulus และ elongation at break ที่มีผลต่อ PP/MWNT และ PP/MWNT/2 wt% เมื่อเติมด้วย PPMA ปริมาณต่าง ๆ [44]

การศึกษายืนยันว่า การเติม PPMA มีผลทำให้ MWNT กระจายตัวในเมตริกซ์ของพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้นและทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างพื้นผิวสัมผัส อีกทั้งยังช่วยในการปรับปรุงสมบัติ rheological percolation threshold และสมบัติเชิงกลของวัสดุนาโนคอมโพสิตให้ดีขึ้น

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 สารเคมี

4.1.1 เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิโพรพิลีนที่ใช้เป็น Homopolymer ของบริษัท SCG Chemicals Company Ltd. รหัส EL-PRO P600F ซึ่งมีค่าอัตราการหลอมไหล (Melt flow rate) 10 กรัม/10 นาที ที่อุณหภูมิ 230 °C

4.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ของบริษัท Thai Nippon Chemical Industry Company Ltd. รหัส EXGEL HT1 เป็น organically modified montmorillonite

4.1.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube) ในรูป masterbatch ของบริษัท Nanocyl รหัส PLASTICYL PP2001 มีปริมาณต่อคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผงหลายชั้นในพอลิโพรพิลีนอยู่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.1.4 เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Maleic Anhydride, PPMA) ของบริษัท DuPont รหัส FUSABOND P613 ซึ่งมีค่าอัตราการหลอมไหล (Melt flow rate) 49 กรัม/10 นาที ที่อุณหภูมิ 190 °C

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

4.2.1 เครื่อง Extrusion Labtech Engineering Company Ltd. รุ่น LTE 20-40 ประกอบด้วย รางน้ำหล่อเย็น รุ่น LW100 และเครื่องตัดเม็ดพลาสติก รุ่น LZ 120

4.2.2 เครื่อง Compression ของบริษัท Labtech Engineering Company Ltd.

4.2.3 แม่พิมพ์ขนาด 5 x 5 เซนติเมตร ขนาดความหนา 1 เซนติเมตร

4.2.4 แผ่นเหล็กรองแม่พิมพ์ขนาด 16 x 16 เซนติเมตร

4.2.5 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Binder

4.2.6 เครื่องชั่งไฟฟ้า

4.2.7 ถาดเหล็กก้นลึกปริมาตร 4 ลิตร

4.2.8 แผ่นอลูมิเนียม

4.3 วิธีการเตรียมวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

4.3.1 ชั่งน้ำหนักเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ มอนต์มอริลโลไนต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ตามที่ต้องการ

4.3.2 นำสารที่ชั่งน้ำหนักไว้ใส่กรวยป้อนของเครื่อง Extrusion โดยตั้งอุณหภูมิของสกรูเท่ากับ 195 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 70 รอบต่อนาที

4.3.3 เม็ดพลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกอัดผ่านสกรูออกมาเป็นเส้นลงในรางน้ำหล่อเย็น โดยถูกดึงที่ความเร็วที่เท่ากับ 13 เมตรต่อนาที แล้วเข้าเครื่องตัดเส้นพอลิเมอร์ให้เป็นเม็ดพลาสติก (Pellet) ความยาวของเม็ดพลาสติกเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

4.3.4 นำเม็ดพลาสติกที่ได้ใส่ลงในถาดเหล็กก้นลึกซึ่งมีปริมาตร 4 ลิตรจากนั้นนำถาดเหล็กก้นลึกเข้าสู่อบ ตั้งค่าอุณหภูมิในการอบ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3.5 นำเม็ดพลาสติกที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนที่ 4.3.4 มาผสมและตัดเป็นเม็ดพลาสติกตามขั้น ตอนที่ 4.3.2-4.3.3 อีกครั้ง เปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูเป็น 150 รอบต่อนาที

4.3.6 นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.3.5 ใส่ในถาดเหล็ก และนำเข้าตู้อบอีกครั้ง โดยอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเก็บเม็ดพลาสติกใส่ถุงซิปล็อค

4.3.7 ปฏิบัติซ้ำตามขั้น ตอนที่ 4.3.1 ถึง 4.3.6 โดยเปลี่ยนสัดส่วนขององค์ประกอบดังตารางที่ 4.1 โดยแต่ละสูตรตัดเม็ดสูตรละ 4 ครั้ง และเก็บตัวอย่างทุกครั้งเพื่อนำไปวิเคราะห์ XRD เพื่อหาสูตรการขึ้นรูปที่เหมาะสม

4.3.8 ปฏิบัติซ้ำตามขั้น ตอนที่ 4.3.1 - 4.3.6 โดยเปลี่ยนสัดส่วนขององค์ประกอบดังตารางที่ 4.2 และตัดเม็ดสูตรละ 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 สูตรการผสมคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่อหาสูตรการขึ้นรูปที่เหมาะสม

สูตรที่	PP (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	PPMA (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	clay (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	CNT (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
1	94	0	3	3
2	88	6	3	3
3	82	12	3	3
4	76	18	3	3

ตารางที่ 4.2 สูตรการผสมวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

สูตรที่	PP (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	PPMA (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	clay (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	CNT (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
PP	100	0	0	0
PP/ 1%clay/ 0%CNT	97	2	1	0
PP/ 2%clay/ 0%CNT	94	4	2	0
PP/ 3%clay/ 0%CNT	91	6	3	0
PP/ 0%clay / 1%CNT	97	2	0	1
PP/ 1%clay / 1%CNT	94	4	1	1
PP/ 2%clay / 1%CNT	91	6	2	1
PP/ 3%clay / 1%CNT	88	8	3	1
PP/ 0%clay / 2%CNT	94	4	0	2
PP/ 1%clay / 2%CNT	91	6	1	2
PP/ 2%clay / 2%CNT	88	8	2	2
PP/ 3%clay / 2%CNT	85	10	3	2
PP/ 0%clay/ 3%CNT	91	6	0	3
PP/ 1%clay /3%CNT	88	8	1	3
PP/ 2%clay /3%CNT	85	10	2	3
PP/ 3%clay /3%CNT	82	12	3	3

4.4 วิธีการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง Compression

4.4.1 ชั่งน้ำหนักเม็ดพลาสติกวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมไว้

4.4.2 นำเม็ดพลาสติกวางบนแผ่นเหล็กใช้แผ่นอลูมิเนียมรองก่อน

4.4.3 นำแผ่นเหล็กชุดล่างเข้าเครื่อง Compression ตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมเม็ดพลาสติก (preheat) เป็นเวลา 5 นาที

4.4.4 นำแผ่นเหล็กชุดล่างออกมา จากนั้นนำแผ่นเหล็ก(แผ่นบน)วางประกบโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมรองก่อน

4.4.5 นำแม่พิมพ์ทั้งชุดเข้าเครื่อง Compression ตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียสและความดัน 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อขึ้นรูปฟิล์มด้วยการบีบอัด (Compression) เป็นเวลา 5 นาที

4.4.6 ย้ายแม่พิมพ์ทั้งชุดจากส่วนให้ความร้อนนำไปเข้าในส่วนหล่อเย็นด้วยน้ำของเครื่องcompression เพื่อลดอุณหภูมิเป็นเวลา 5 นาที

4.4.7 แยกแผ่นฟิล์มออกมาจากแม่พิมพ์

4.4.8 ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 4.4.1 ถึง 4.4.7 โดยเปลี่ยนสูตรองค์ประกอบตามตารางที่ 4.2 และการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวัดหาค่า Thermal Conductivity จะใช้แม่พิมพ์ขนาด 5 x 5 เซนติเมตร ขนาดความหนา 1 เซนติเมตร โดยเพิ่มเวลา preheat เป็น 30 นาที

4.5 การวิเคราะห์ผล

4.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffraction, XRD)

เครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ คือ เทคนิคการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบผิวหน้าของผลึกทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอ็กซ์เกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า ขั้นตอนการกระเจิงแสงของรังสีเอ็กซ์แสดงในภาพที่ 4.1 โดยการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ทำให้สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้ โดยใช้สมการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ใน สมการที่ 4.1 สมการนี้เรียกว่า “สมการของแบร็ก (Bragg equation)” [45]

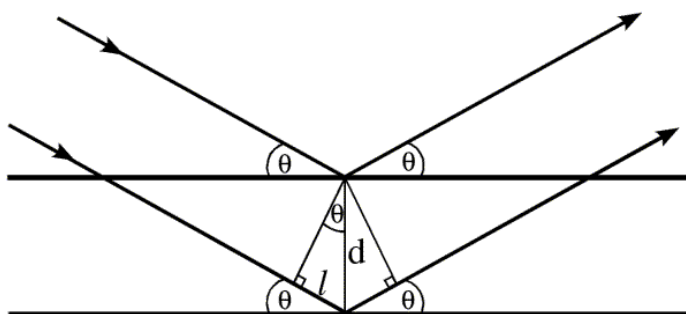
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4.1)$$

โดย n = ตัวเลขจำนวนเต็ม

λ = ความยาวคลื่น (nm)

d = ระยะห่างระหว่างชั้น (Angstrom)

θ = มุมของการเลี้ยวเบน



ภาพที่ 4.1 ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัตถุตามกฎของแบรค [46]

นำชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ผสมด้วยวิธี melt method โดยเครื่อง extrusion มาขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer : Bruker AXS รุ่น D8 Discover ที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็น CuK โดยใช้ความยาวคลื่น 1.5406 \AA ใช้กำลังไฟฟ้า 40 mV และกระแสไฟฟ้า 40 mA ใช้มุมตั้งแต่ 2° ถึง 40° โดยใช้อัตราเร็ว 0.02 degree/step

4.5.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Instron รุ่น 5587 โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปที่เป็นฟิล์มมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 12×1 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D882 (โดยรวมที่จับที่ด้านหัวและท้ายของชิ้นงานด้านละ 1 เซนติเมตร) จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดไว้เข้าเครื่อง ทดสอบแรงดึง โดยใช้ Load cell เท่ากับ 1 กิโลนิวตัน ตั้งค่าให้ความเร็วในการดึงชิ้นงาน 50 มิลลิเมตรต่อนาทีและให้หยุดเมื่อชิ้นงานขาด หลังจากนั้นบันทึกข้อมูล และนำข้อมูลมาสร้างกราฟ เพื่อหาค่าโมดูลัส และค่าความทนแรงดึง

4.5.3 การหาค่าความสามารถการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeation, OP)

ความสามารถการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability) ที่เป็นที่สนใจโดยทั่วไปคือสภาพการซึมผ่านของออกซิเจน วัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าของสภาพการซึมผ่านที่ต่างกัน ในงานนี้วัดค่าความสามารถการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ภายใต้สภาวะของอุณหภูมิและความชื้นคงที่ ที่อุณหภูมิ 73°F (23°C) และความชื้นสัมพัทธ์ 0% RH. เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นฟิล์ม 100 ตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่อง Oxygen Permeation Analyzer ยี่ห้อ Mocon รุ่น ox-tran model 2/21 ตามมาตรฐาน ASTM D-3985

4.5.4 การหาค่าความสามารถการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation, WVP)

สภาพการซึมผ่านของวัสดุขึ้นอยู่กับการแพร่และสภาพการละลายได้ วัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าของสภาพการซึมผ่านที่ต่างกัน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกใช้ชนิดของวัสดุเพื่อใช้เป็น

วัสดุบรรจุภัณฑ์สำหรับการบรรจุอาหารชนิดต่าง ๆ จากการทดสอบด้านหนึ่งของวัสดุเป็นอากาศแห้ง (dry air) หรือสารดูดซับความชื้น (desiccant) ในขณะอีกด้านหนึ่งทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ รายงานปริมาณไอน้ำที่ผ่านวัสดุในหน่วยกรัม สามารถแปลงผันค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเป็นค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$P = \frac{WVTR}{\Delta p} \quad (4.2)$$

โดย P = ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำ (g/h.m².Pa)
 WVTR = อัตราการซึมผ่านได้ของไอน้ำ (g/h.m²)
 Δp = ความแตกต่างของความดันย่อย (Pa)

การวิเคราะห์นี้ใช้เครื่อง Water Vapor Transmission Rate Analyzer ยี่ห้อ Mocon รุ่น Permatran-W model 398 ตามมาตรฐาน ASTM F 1249 โดยนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปที่ มาตัดเป็นรูปหกเหลี่ยมตามขนาดที่กำหนดโดยแม่พิมพ์ของเครื่องทดสอบทั้งหมด 2 แผ่นแล้วประกอบเข้าเครื่อง WVTR ตั้งค่าพื้นที่ผิวสำหรับทดสอบที่ 50 ตารางเซนติเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 250 cm³/min ที่อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียสความดัน 1 บรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ 90%

4.4.5 การทดสอบหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)

ทดสอบหาค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ใช้เครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB) โดยวัดค่าที่อุณหภูมิห้อง และใช้ชิ้นงานขนาด 5 x 5 เซนติเมตร ความหนา 1 เซนติเมตร ใช้ output of power 0.02 W และใช้เวลาในการวัด 20 วินาที

4.4.6 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิต

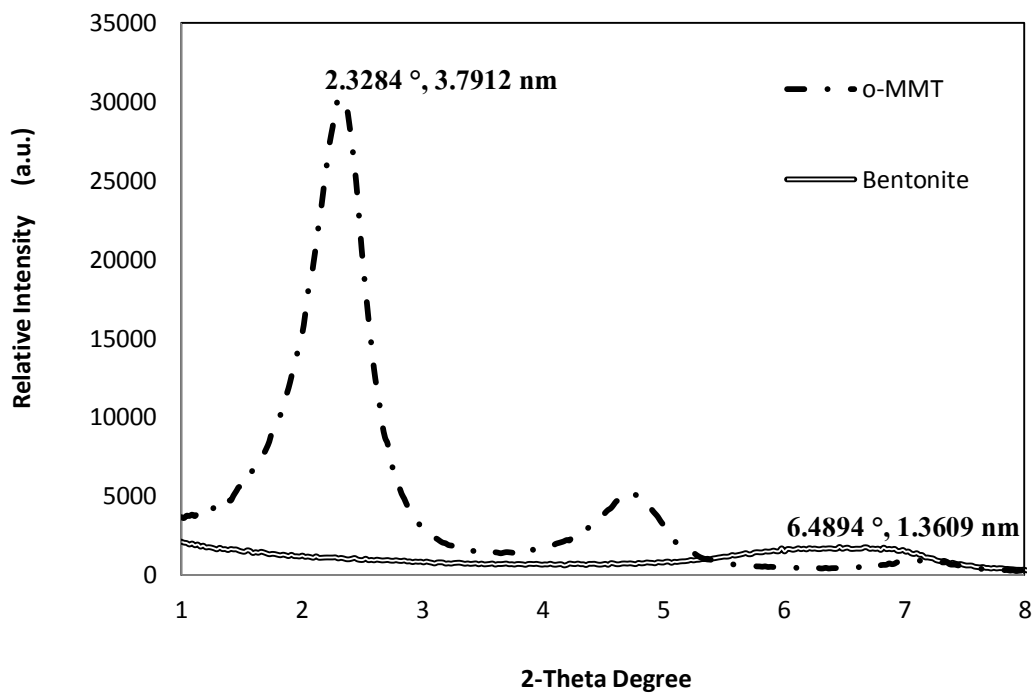
การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) โคนใช้เครื่องรุ่น Jeol JSM 6400

บทที่ 5

ผลและการวิเคราะห์

5.1 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction, XRD)

ในงานวิจัยนี้ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เคลย์ที่เป็นออร์กาโนเคลย์ (organoclay, o-MMT) ในการผสมวัสดุคอมโพสิต ซึ่งออร์กาโนเคลย์ (organoclay) หรือโมดิฟายด์เคลย์ (modified clay) เป็นคำที่ใช้เรียกกลุ่มแร่เคลย์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้ว โดยการนำกลุ่มแร่เคลย์ที่มีสมบัติพิเศษคือสามารถแสดงการขยายตัว (expandability) ได้สูงเมื่อใส่น้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างและมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน (cations exchange) ได้ดี เช่น กลุ่มแร่มอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งมีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ (hydrophilic) ถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์ (organophilic) แทนโดยการแทนที่ประจุต่าง ๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงทำให้ออร์กาโนเคลย์สามารถกระจายตัวได้ดีในวัสดุคอมโพสิต[50]



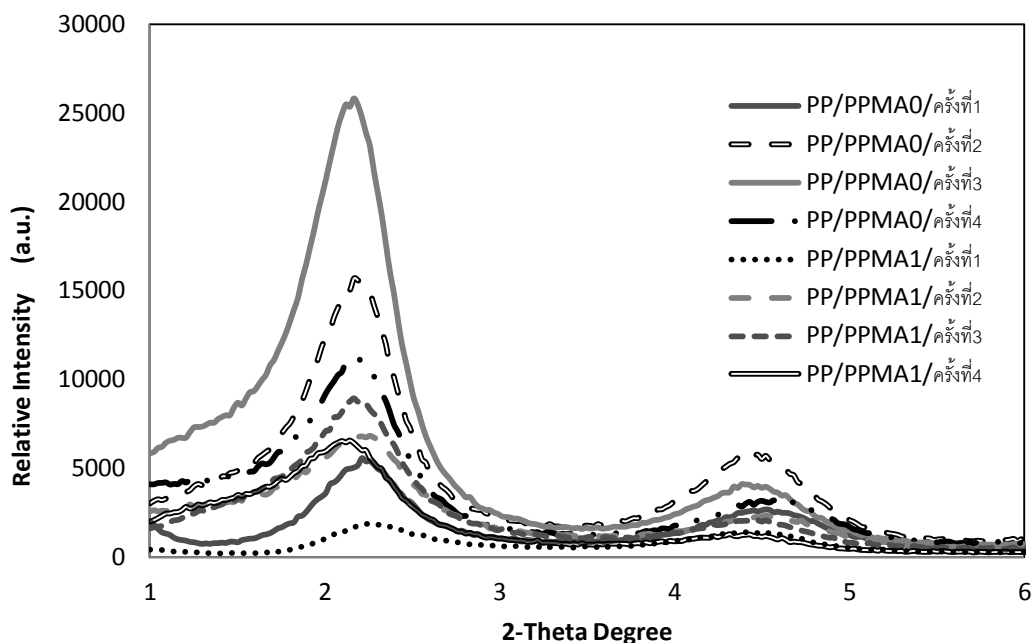
ภาพที่ 5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของ Bentonite และ o-MMT

จากภาพที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.1 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของ Bentonite (เคลย์ที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพผิว) และ o-MMT (เคลย์ที่ผ่านการปรับการปรับสภาพผิวแล้ว) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction เพื่อศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกต (d-spacing) พบว่าค่า d-spacing ของชั้นซิลิเกตของ Bentonite และ o-MMT มีค่า 1.3609 nm และ 3.7912 nm ตามลำดับ ซึ่งระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตมากจะช่วยให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นซิลิเกตได้ง่ายขึ้น จากการวิเคราะห์ค่า d-spacing ของชั้นซิลิเกตของ o-MMT มีค่ามากกว่า Bentonite ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เคลย์แบบ o-MMT มาเติมในวัสดุคอมโพสิต

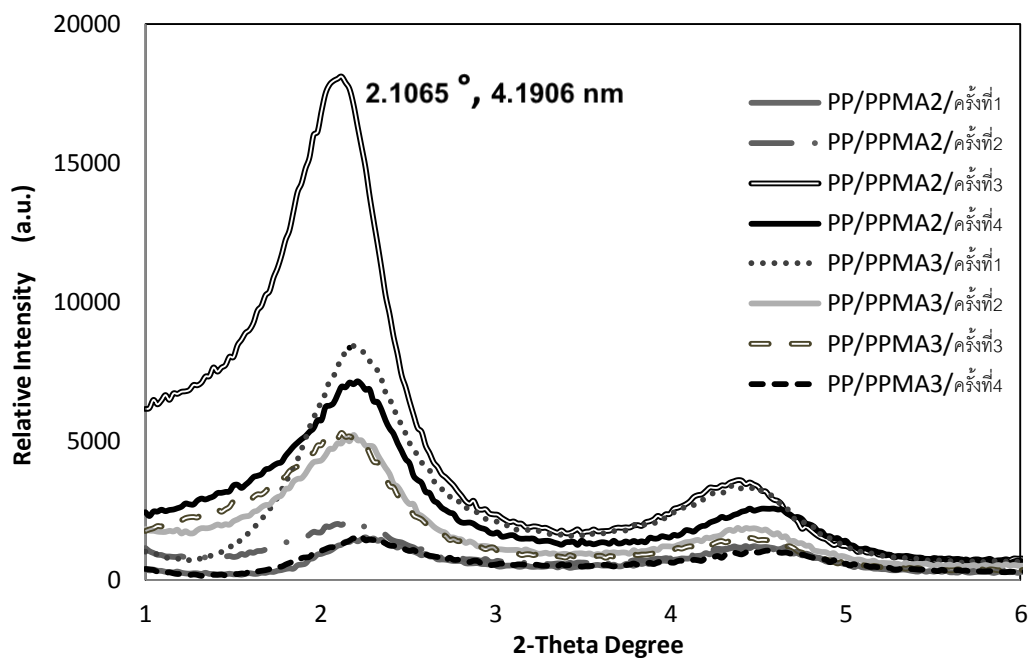
5.1.1 การหาปริมาณ PPMA และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุคอมโพสิต

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้วิธีการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (twin-screw extruder) ซึ่งต้องศึกษาหาปริมาณ PPMA และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุคอมโพสิต โดยนำวัสดุคอมโพสิตมาผสม PPMA เป็นปริมาณ 0 ถึง 3 เท่าของปริมาณสารตัวเติมและจำนวนครั้งของการตัดเม็ดเป็น 1 ถึง 4 ครั้ง (ทุกตัวอย่างผสมด้วยเคลย์ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักเช่นเดียวกัน) มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction เพื่อศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกต

ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 5.2 ภาพที่ 5.3 และตารางที่ 5.1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PPMA และจำนวนครั้งของการตัดเม็ด มีผลทำให้ค่า d-spacing ของชั้นซิลิเกตเพิ่มมากขึ้นด้วย เป็นการยากที่จะให้เกิดการผสมที่ชั้นซิลิเกตแตกตัวแบบ exfoliated และมีการกระจายตัวแบบเป็นเนื้อเดียวกันในระดับนาโนเมตร เป็นเพราะตัวเมตริกซ์ซึ่งก็คือพอลิโพรพิลีนมีความเป็นขั้วต่ำ ในขณะที่เคลย์เป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) วิธีการที่จะเพิ่มความเข้ากันได้ของระหว่างเมตริกซ์และสารตัวเติมคือการปรับสภาพผิวเคลย์เป็นสารประกอบออร์แกนิก (organic compound) ซึ่งช่วยให้เป็นไฮโดรฟิลิกลดลง ส่วนของพอลิเมอร์ที่เป็นออร์แกนิกฟิลิกสูงจะปรับปรุงด้วยการทำให้ขั้วมีความเป็นออร์แกนิกฟิลิกลดลง โดยการเติม compatibilizer ที่ประกอบด้วยกลุ่มขั้วที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์และออร์แกนิกซิลิเกต [47,48] ซึ่งในงานวิจัยนี้ PPMA ทำหน้าที่เป็น compatibilizer ช่วยให้วัสดุคอมโพสิตผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น และการตัดเม็ดทำให้เกิดแรงเฉือนทำให้ชั้นของซิลิเกตแตกตัวจากกันได้ดียิ่งขึ้น [49] จากการวิเคราะห์ระยะ d-spacing ของชั้นซิลิเกตที่มีค่ามากที่สุดคือ 4.1906 nm ที่ปริมาณ PPMA เป็น 2 เท่าของสารตัวเติม และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดเป็น 3 ครั้ง จึงเลือกใช้ปริมาณ PPMA และจำนวนครั้งนี้ในการผสมวัสดุคอมโพสิต



ภาพที่ 5.2 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณ PPMA เป็น 0 และ 1 เท่าของปริมาณสารตัวเติมและจำนวนครั้งของการตัดเม็ด 1 ถึง 4 ครั้ง



ภาพที่ 5.3 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณ PPMA เป็น 2 และ 3 เท่าของปริมาณสารตัวเติมและจำนวนครั้งของการตัดเม็ด 1 ถึง 4 ครั้ง

ตารางที่ 5.1 ค่ามุม 2-theta และ d-spacing ของ Bentonite, o-MMT, วัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT ที่ ปริมาณ PPMA และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดต่าง ๆ

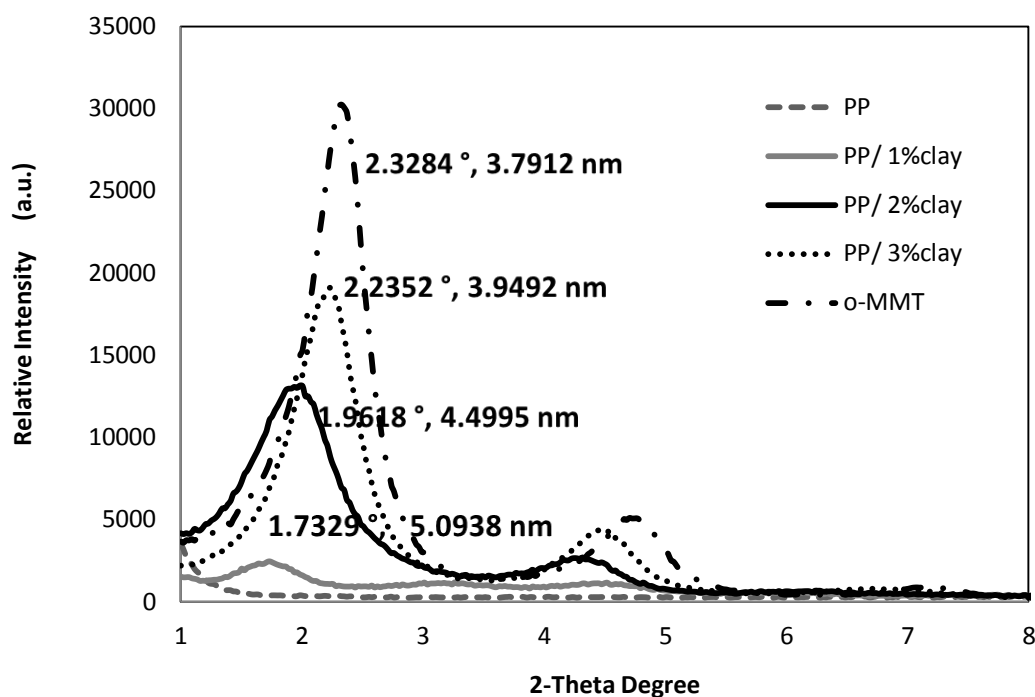
ตัวอย่าง	2-theta (degree)	d-spacing (nm)
Bentonite	6.4894	1.3609
o-MMT	2.3284	3.7912
PP/PPMA0/ครั้งที่1	2.2345	3.9505
PP/PPMA0/ครั้งที่2	2.1858	4.0386
PP/PPMA0/ครั้งที่3	2.1570	4.0925
PP/PPMA0/ครั้งที่4	2.1667	4.0741
PP/PPMA1/ครั้งที่1	2.2470	3.9286
PP/PPMA1/ครั้งที่2	2.2543	3.9159
PP/PPMA1/ครั้งที่3	2.1742	4.0601
PP/PPMA1/ครั้งที่4	2.1187	4.1664
PP/PPMA2/ครั้งที่1	2.2803	3.8712
PP/PPMA2/ครั้งที่2	2.1443	4.1166
PP/PPMA2/ครั้งที่3	2.1065	4.1906
PP/PPMA2/ครั้งที่4	2.1929	4.0292
PP/PPMA3/ครั้งที่1	2.1897	4.0314
PP/PPMA3/ครั้งที่2	2.1846	4.0407
PP/PPMA3/ครั้งที่3	2.1171	4.1695
PP/PPMA3/ครั้งที่4	2.2140	3.9871

5.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT ด้วยเครื่อง XRD

ผลการตรวจสอบโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction แสดงระยะห่างระหว่างชั้นซิติเลตดังภาพที่ 5.4 และตารางที่ 5.2 พบว่า o-MMT ที่มีค่า d-spacing ของชั้นซิติเลต 3.7912 nm เมื่อเติมเคลย์ในพอลิโพรพิลีนปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก ค่า d-spacing ของชั้นซิติเลตสูงขึ้นเป็น 5.0938 nm จะเห็นว่าเมื่อเติมเคลย์ลงในวัสดุคอมโพสิตค่า d-spacing ของ

ชั้นซิลิเกตมีค่าสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการเติม PPMA และ shear stress จากการผสม ดังภาพที่ 5.5 ขั้นตอนการเกิดการแตกตัวของชั้นเคลย์ระหว่างการผสมวัสดุคอมโพสิตแบบหลอมเหลว โดยเริ่มจากแรงเฉือนจากเครื่อง extrusion ทำให้กลุ่มอนุภาคเคลย์แตกตัวกันเล็กน้อย และชั้นของเคลย์เปิดออกทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แทรกตัวไปอยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์ได้ [49] แต่เมื่อปริมาณของเคลย์ในวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นค่า d-spacing ของชั้นซิลิเกตจะลดลง เห็นได้ดัง พอลิพรพิลีนที่เติมเคลย์ 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนัก ค่า d-spacing มีค่าเท่ากับ 5.0938 nm, 4.4995 nm และ 3.9492 nm ตามลำดับ และจากภาพที่ 5.6 – ภาพที่ 5.8 ภาพของวัสดุคอมโพสิตที่เติมทั้งเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของเคลย์ในวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นค่า d-spacing ของชั้นซิลิเกตจะลดลงเช่นเดียวกัน

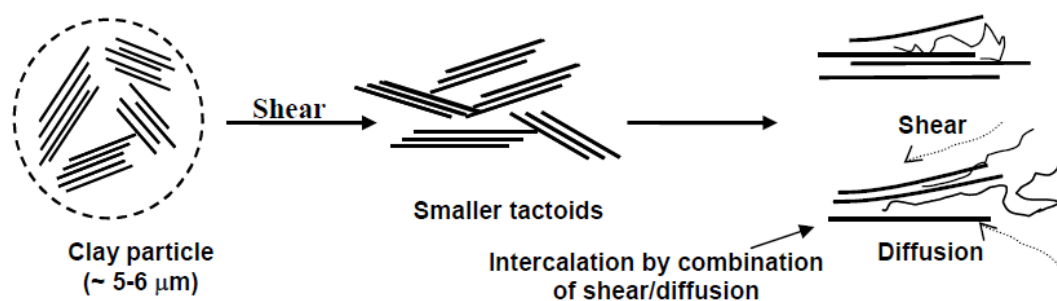
การกระจายตัวของชั้นซิลิเกตถ้ากระจายตัวแบบ exfoliated nanocomposites จะไม่พบพีคของ XRD แต่ถ้าเป็นแบบ intercalated nanocomposites จะพบพีคของชั้นของซิลิเกตที่มีมุม 2θ ลดลงเมื่อเทียบกับพีคของชั้นของซิลิเกตของเคลย์ที่เติมลงในวัสดุคอมโพสิต [41] ดังนั้นในการทดลองนี้การเกิดวัสดุคอมโพสิตจึงเป็นแบบ intercalated nanocomposites



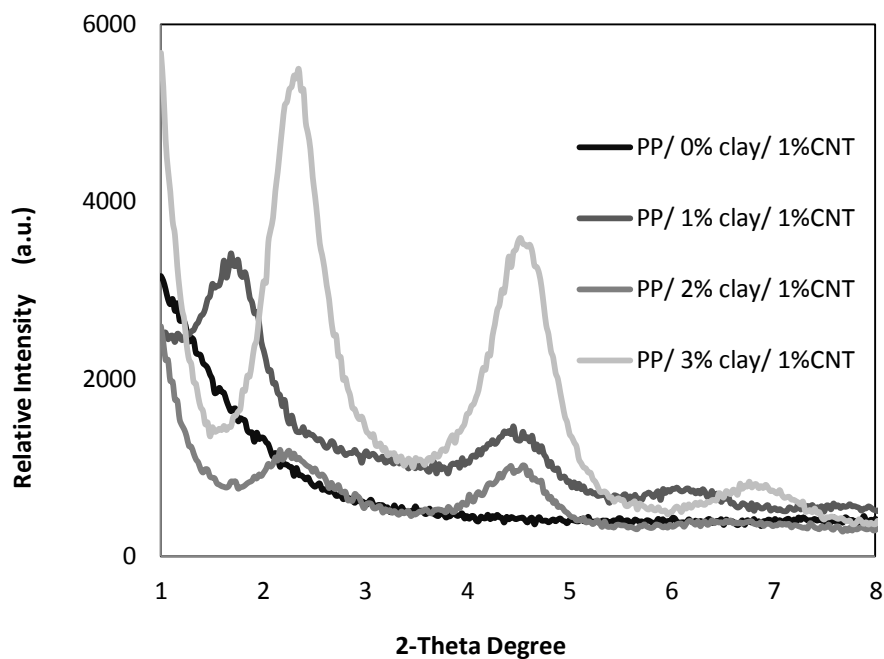
ภาพที่ 5.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของ o-MMT และ วัสดุคอมโพสิตที่เติมเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 5.2 ค่ามุม 2-theta และ d-spacing ของวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT

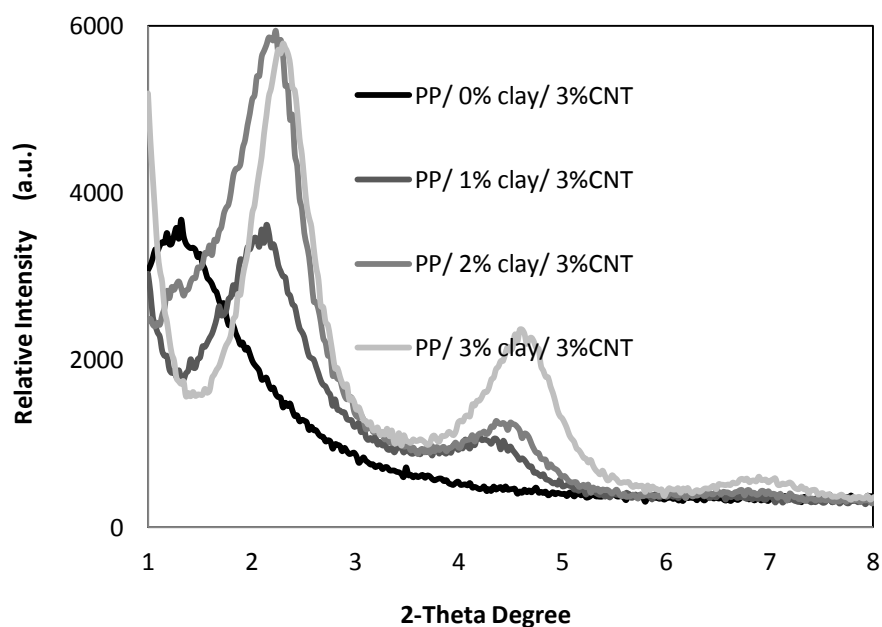
ตัวอย่าง	2-theta (degree)	d-spacing (nm)
PP	-	-
PP/ 1%clay/ 0%CNT	1.7329	5.0938
PP/ 2%clay/ 0%CNT	1.9618	4.4995
PP/ 3%clay/ 0%CNT	2.2352	3.9492
PP/ 0%clay / 1%CNT	-	-
PP/ 1%clay / 1%CNT	1.7106	5.1602
PP/ 2%clay / 1%CNT	2.2592	3.9074
PP/ 3%clay / 1%CNT	2.3485	3.7588
PP/ 0%clay / 2%CNT	-	-
PP/ 1%clay / 2%CNT	1.9841	4.4489
PP/ 2%clay / 2%CNT	2.1378	4.1291
PP/ 3%clay / 2%CNT	2.3001	3.8379
PP/ 0%clay/ 3%CNT	-	-
PP/ 1%clay /3%CNT	2.1376	4.1295
PP/ 2%clay /3%CNT	2.1927	4.0258
PP/ 3%clay /3%CNT	2.2995	3.8388



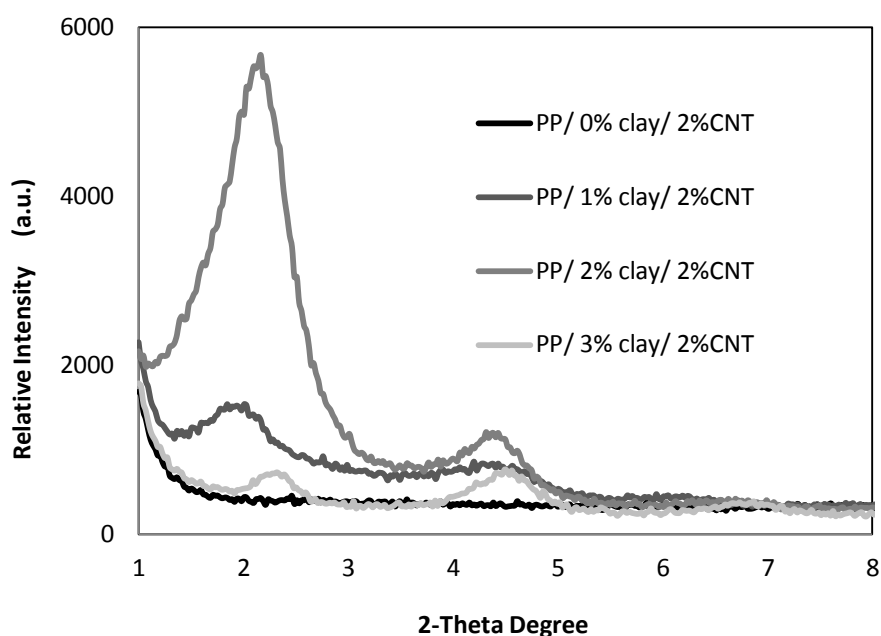
ภาพที่ 5.5 ขั้นตอนการเกิดการแตกตัวของชั้นเคลย์ระหว่างการผสมวัสดุคอมโพสิตแบบหลอมเหลว



ภาพที่ 5.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 1% โดยน้ำหนัก และเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ

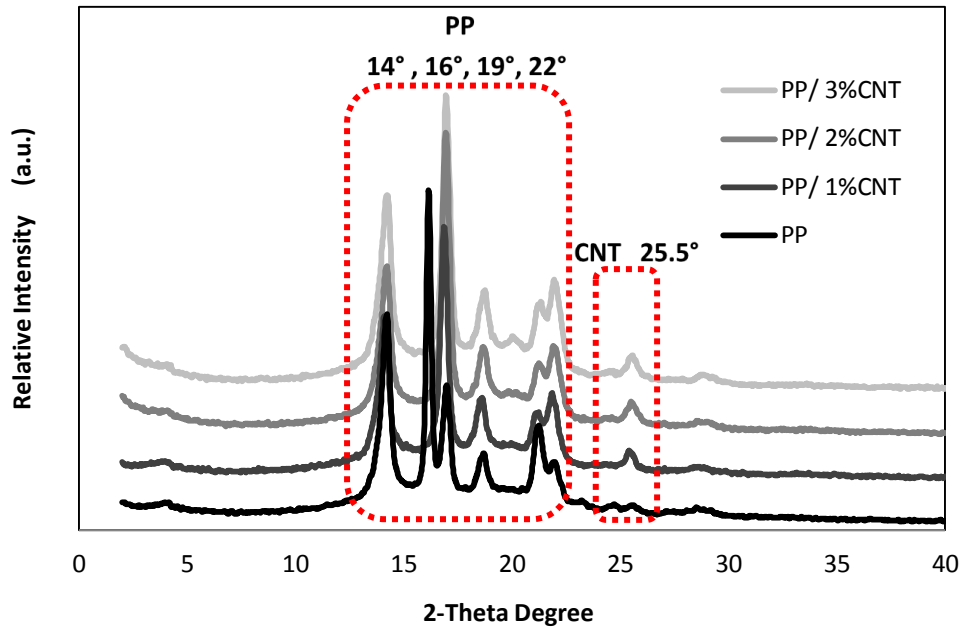


ภาพที่ 5.7 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2% โดยน้ำหนัก และเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ

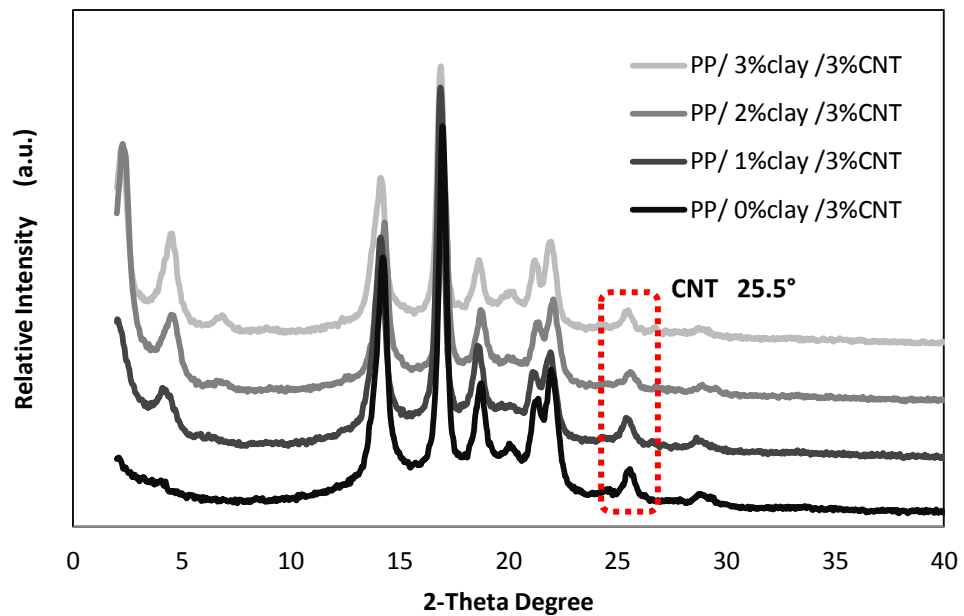


ภาพที่ 5.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ 3% โดยน้ำหนัก และเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมและไม่ได้เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากภาพที่ 5.9 จะเห็นพีคที่มุม 2-theta ประมาณ 14, 16, 19 และ 22 องศา เป็นพีคของพอลิโพรพิลีน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Seo และคณะพบว่าพอลิโพรพิลีน จะแสดงพีคที่ 14.0, 16.2, 19.0 และ 21.2 [51] และจากภาพยังพบพีคที่มุมประมาณ 25 องศา เป็นพีคของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [52, 53, 54] จะเห็นว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์จะไม่ปรากฏพีคนี้ และ จากภาพที่ 5.10 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ที่ผสมกับเคลย์ในปริมาณ 0%, 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนัก จะพบพีคที่มุมประมาณ 25 องศา ซึ่งเป็นพีคของคาร์บอนนาโนทิวบ์เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5.9 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติม CNT ในปริมาณต่าง ๆ



ภาพที่ 5.10 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของวัสดุคอมโพสิตที่เติม CNT ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ผสมกับเคลย์ในปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 5.3 ค่ามุม 2-theta และ d-spacing ของคาร์บอนนาโนทิวป์ในวัสดุคอมโพสิต

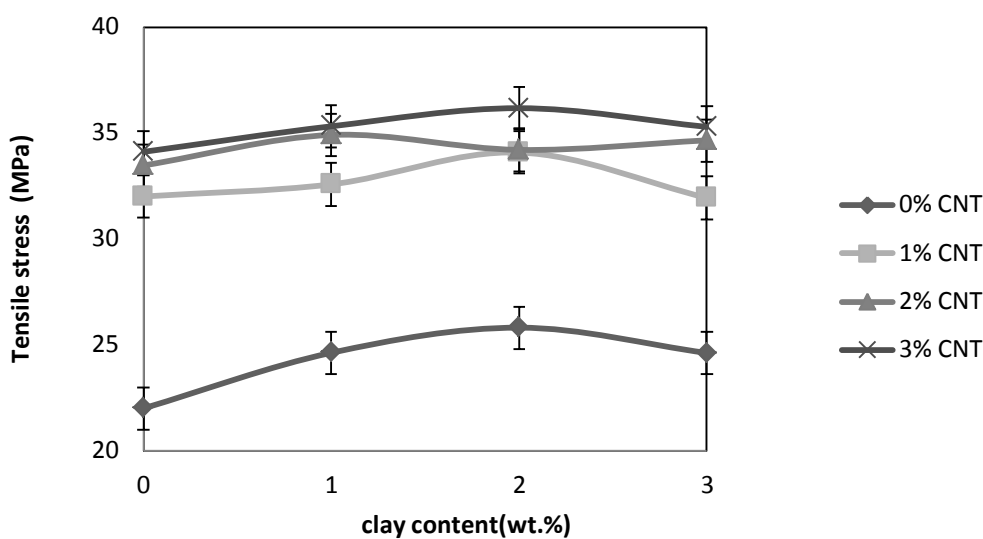
ตัวอย่าง	2-theta (degree)	d-spacing (nm)
PP	-	-
PP/ 0%clay / 1%CNT	25.4302	0.3499
PP/ 0%clay / 2%CNT	25.4971	0.3490
PP/ 0%clay / 3%CNT	25.5832	0.3479
PP/ 1%clay /3%CNT	25.3929	0.3504
PP/ 2%clay /3%CNT	25.5870	0.3478
PP/ 3%clay /3%CNT	25.4919	0.3491

5.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

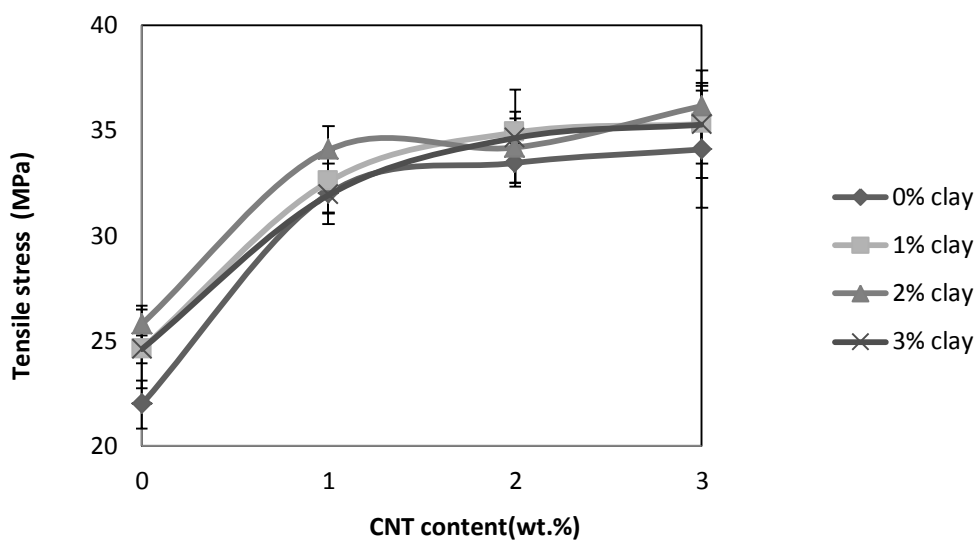
5.2.1 ค่าการทนต่อแรงดึง

ผลการทดสอบค่าการทนต่อแรงดึงแสดงดังภาพที่ 5.11 และภาพที่ 5.12 พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปได้มีค่าเท่ากับ 22 MPa (datasheet ของ EL-PRO P600F Homopolypropylene ค่า Tensile Stress มีค่าเท่ากับ 19.6-25.5 MPa) เมื่อมีผสมเคลย์ลงในวัสดุคอมโพสิตมากขึ้นส่งผลให้การทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น มีค่าสูงที่สุดที่ผสมเคลย์ลงไปปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเท่ากับ 25.81 MPa มีค่าสูงขึ้นเป็น 17% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และลดลงที่ผสมเคลย์ลงไปปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก เพราะว่าเมื่อมีการผสมสารตัวเติมมากเกินไปจะส่งผลให้การกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าการทนแรงดึงต่ำลง และการผสมคาร์บอนนาโนทิวป์ลงในวัสดุคอมโพสิตส่งผลให้การทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นและสูงที่สุดที่ผสมคาร์บอนนาโนทิวป์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเท่ากับ 34.11 MPa มีค่าสูงขึ้นเป็น 55% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน

เมื่อเติมสารตัวเติมทั้งสองลงในวัสดุคอมโพสิต ปริมาณเคลย์และปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึงยังมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยค่าการทนต่อแรงดึงมีค่าสูงที่สุดที่เคลย์ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.17 MPa หรือค่าสูงขึ้นเป็น 64% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอิทธิพลต่อค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตมากกว่าเคลย์

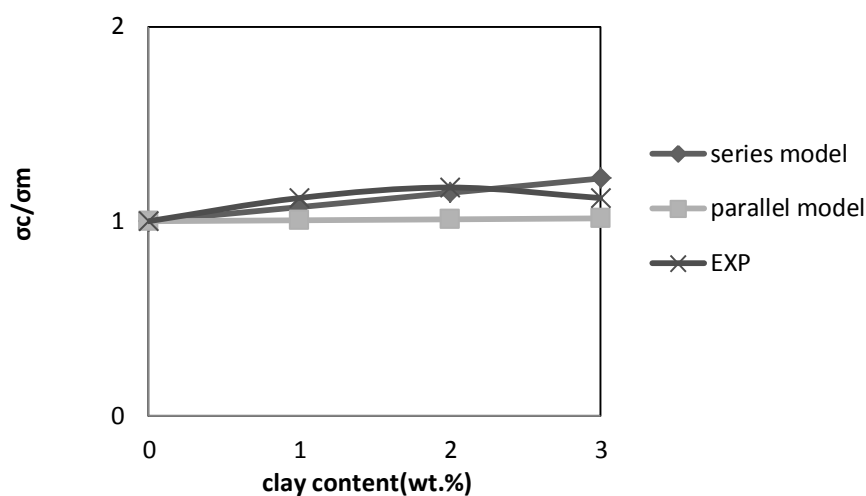


ภาพที่ 5.11 ค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ

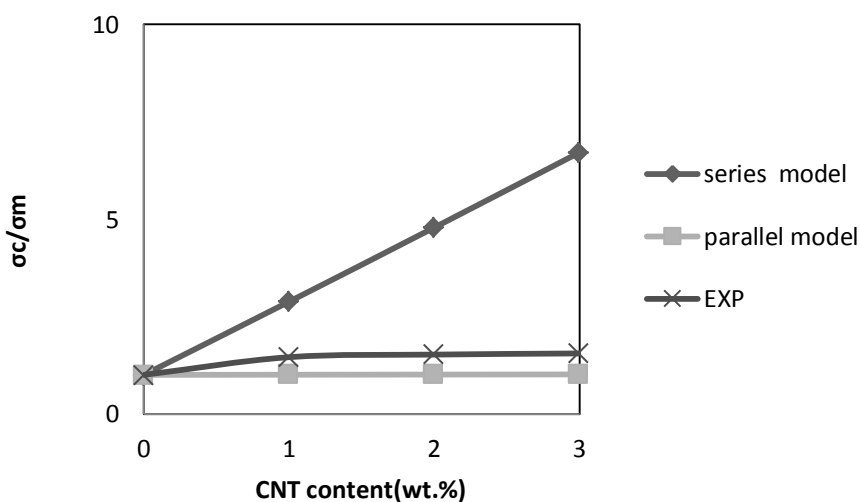


ภาพที่ 5.12 ค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ

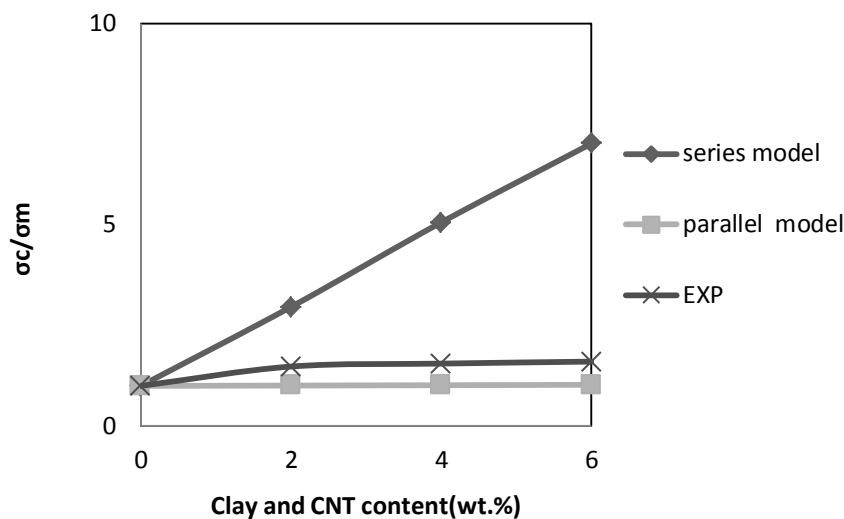
เปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลองกับ series model และ parallel model พบว่าเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเป็นแบบ series model ดังภาพที่ 5.13 ชั้นซิลิเกตของเคลย์มีแนวโน้มของการเรียงตัวตามแนวแรงดึง ภาพที่ 5.14 เมื่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเป็นแบบ parallel model และภาพที่ 5.15 ปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ผสมกันในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเป็นแบบ parallel model



ภาพที่ 5.13 การเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลองกับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลองกับ series model และ parallel model ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ

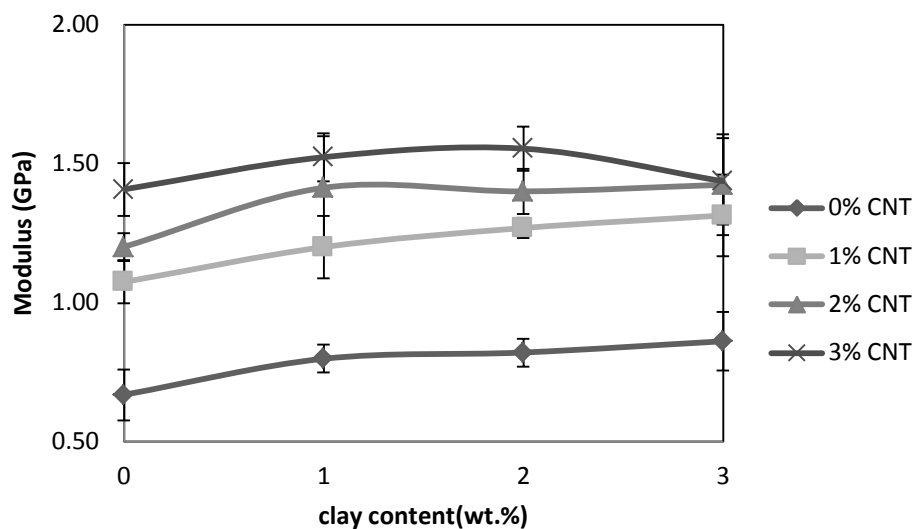


ภาพที่ 5.15 การเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ

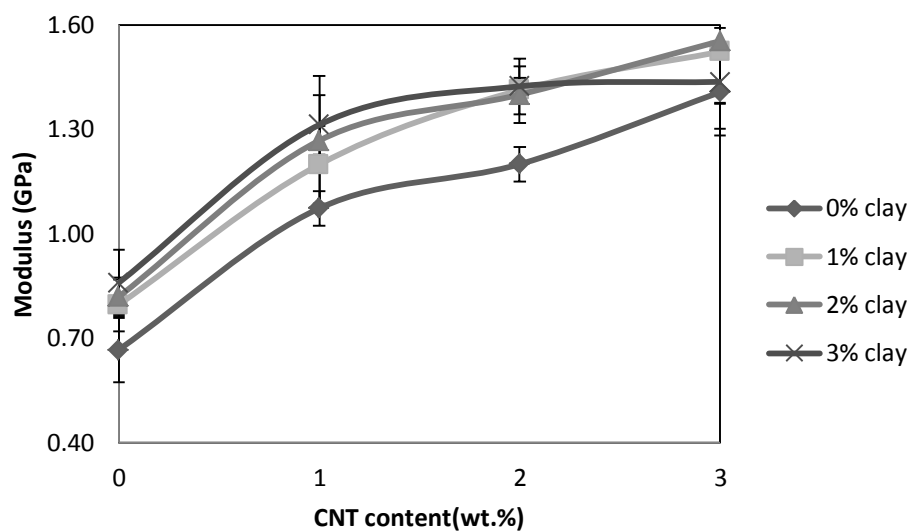
5.2.2 ค่าโมดูลัส

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสแสดงดังภาพที่ 5.16 และภาพที่ 5.17 พบว่าค่าโมดูลัสของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปได้มีค่าเท่ากับ 0.66 GPa (datasheet ของ EL-PRO P600F Homopolypropylene ค่าโมดูลัสมีค่าเท่ากับ 539-686 MPa) เมื่อมีผสมเคลย์ลงในวัสดุคอมโพสิตมากขึ้นส่งผลให้ค่าโมดูลัสมีค่าสูงขึ้น มีค่าสูงที่สุดที่ผสมเคลย์ลงไปในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเท่ากับ 0.86 GPa มีค่าสูงขึ้นเป็น 28% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และการผสมคาร์บอนนาทิวบ์ลงในวัสดุคอมโพสิตส่งผลให้การทนต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นและสูงที่สุดที่ผสมคาร์บอนนาทิวบ์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเท่ากับ 1.41 GPa มีค่าสูงขึ้นเป็น 110% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน

เมื่อเติมสารตัวเติมทั้งสองลงในวัสดุคอมโพสิต ปริมาณเคลย์และปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึงยังมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยค่าการทนต่อแรงดึงมีค่าสูงที่สุดที่เคลย์ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาทิวบ์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.55 GPa หรือค่าสูงขึ้นเป็น 134% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน จะเห็นว่าการเติมคาร์บอนนาทิวบ์มีอิทธิพลต่อค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตมากกว่าเคลย์

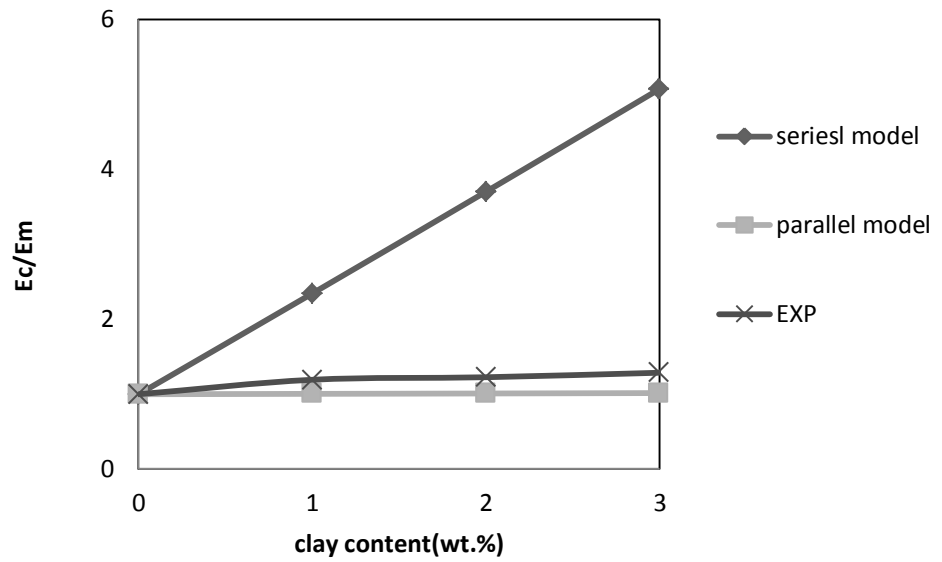


ภาพที่ 5.16 ค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ

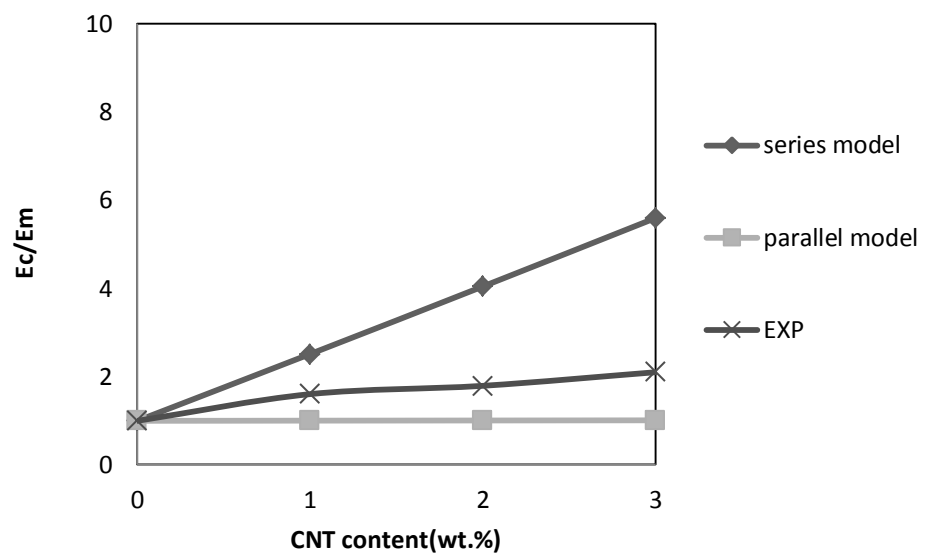


ภาพที่ 5.17 ค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิตของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ

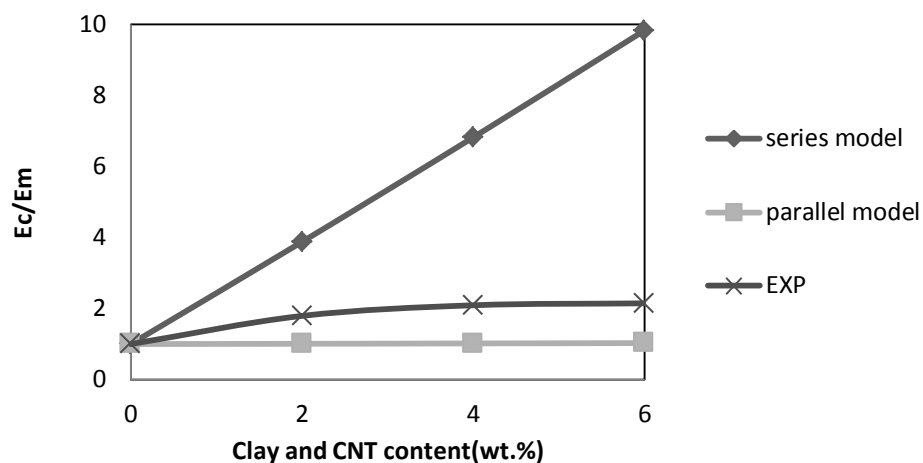
เปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลองกับ series model และ parallel model ดังภาพที่ 5.18 พบว่าเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเป็นแบบ parallel model ภาพที่ 5.19 เมื่อปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์เพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเป็นแบบ parallel model และภาพที่ 5.20 ปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาทิวบ์ที่ผสมกันในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาทิวบ์เพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเป็นแบบ parallel model เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.19 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลอง กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสจากการทดลอง

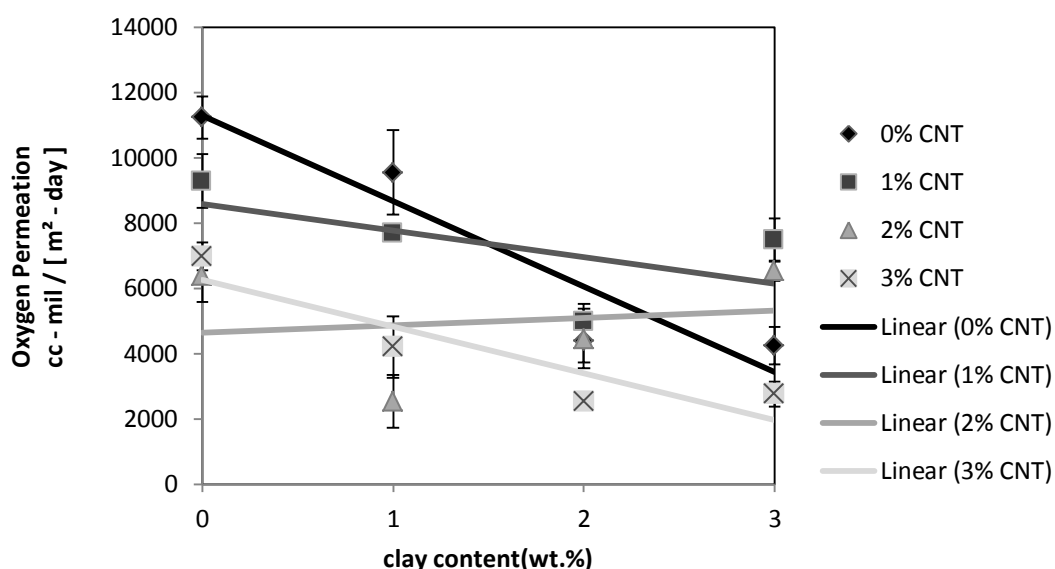
กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

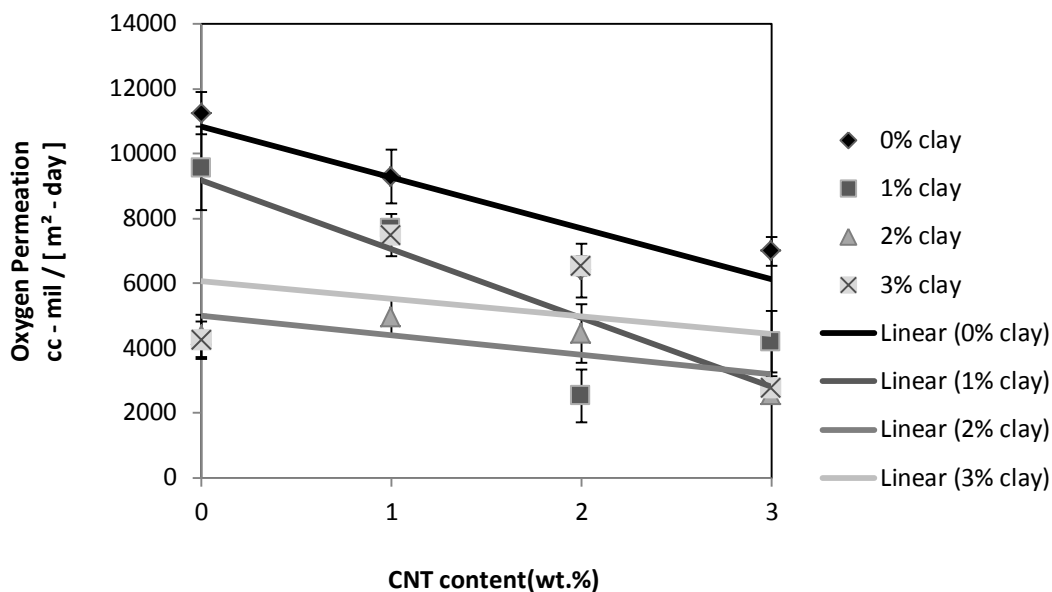
ตัวอย่าง	Tensile Stress(MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP	22.00 ± 1.14	0.66 ± 0.09
PP/ 1%clay/ 0%CNT	24.62 ± 1.42	0.80 ± 0.05
PP/ 2%clay/ 0%CNT	25.81 ± 0.94	0.82 ± 0.05
PP/ 3%clay/ 0%CNT	24.61 ± 2.78	0.86 ± 0.11
PP/ 0%clay / 1%CNT	32.00 ± 1.88	1.07 ± 0.08
PP/ 1%clay / 1%CNT	32.57 ± 1.52	1.20 ± 0.11
PP/ 2%clay / 1%CNT	34.08 ± 0.69	1.27 ± 0.04
PP/ 3%clay / 1%CNT	31.93 ± 2.55	1.31 ± 0.15
PP/ 0%clay / 2%CNT	33.47 ± 0.88	1.20 ± 0.05
PP/ 1%clay / 2%CNT	34.91 ± 1.14	1.41 ± 0.18
PP/ 2%clay / 2%CNT	34.20 ± 1.68	1.4 ± 0.08
PP/ 3%clay / 2%CNT	34.65 ± 1.10	1.42 ± 0.18
PP/ 0%clay/ 3%CNT	34.11 ± 0.65	1.41 ± 0.10
PP/ 1%clay /3%CNT	35.31 ± 0.85	1.52 ± 0.09
PP/ 2%clay /3%CNT	36.17 ± 2.32	1.55 ± 0.08
PP/ 3%clay /3%CNT	35.29 ± 1.85	1.44 ± 0.16

5.3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP)

ผลการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจากภาพที่ 5.21 และภาพที่ 5.22 จะเห็นว่าพอลิโพรพิลีนมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 11237.80 cc mil/m² day เมื่อเติมเคลย์ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะต่ำลง โดยมีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณเคลย์เป็น 3% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 4246.34 cc mil/m² day หรือต่ำลงเป็น 62 % ของพอลิโพรพิลีน และเมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงไปในวัสดุคอมโพสิตจะเห็นว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มต่ำลงและต่ำที่สุดที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2% โดยมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน 6397.65 cc mil/m² day หรือต่ำลงเป็น 43 % ของพอลิโพรพิลีนการเติมสารตัวเติมลงไปวัสดุคอมโพสิตทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดต่ำลง เพราะสารตัวเติมจะเป็นตัวขัดขวางทำให้เส้นทางการซึมผ่านของก๊าซคดเคี้ยวก๊าซจึงผ่านได้ยากขึ้น และการเติมสารตัวเติมทั้งเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงไปส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มต่ำลงกว่าการเติมสารตัวเติมเพียงตัวเดียว โดยลดลงต่ำสุดที่ปริมาณเคลย์ 1% โดยน้ำหนัก และปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าต่ำลงเป็น 77% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน

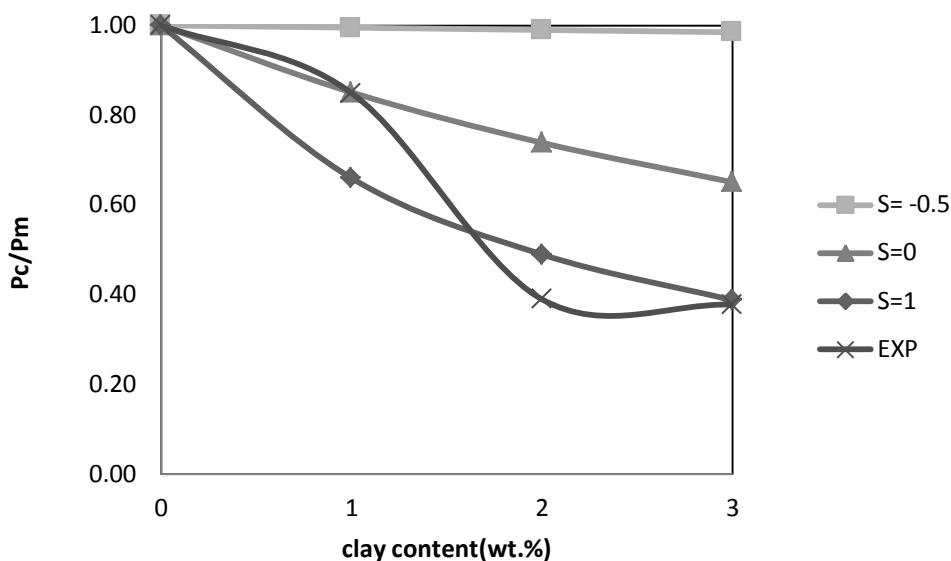


ภาพที่ 5.21 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP)
ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.22 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ

จากภาพที่ 5.23 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ จากการทดลองกับ Modified Nielsen Model โดยกำหนดให้เคลย์มีความยาวของชั้นซิติเกตเป็น 200 nm และมีความกว้างของชั้นซิติเกตเป็น 1 nm พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับ Modified Nielsen Model ที่ S=0 และ S=1 แสดงว่าจากการทดลองการเรียงตัวของชั้นซิติเกตมีแนวโน้มว่าเรียงทำมุมอยู่ในช่วงระหว่าง 54.7°- 90° กับทิศทางเคลื่อนที่ของก๊าซ



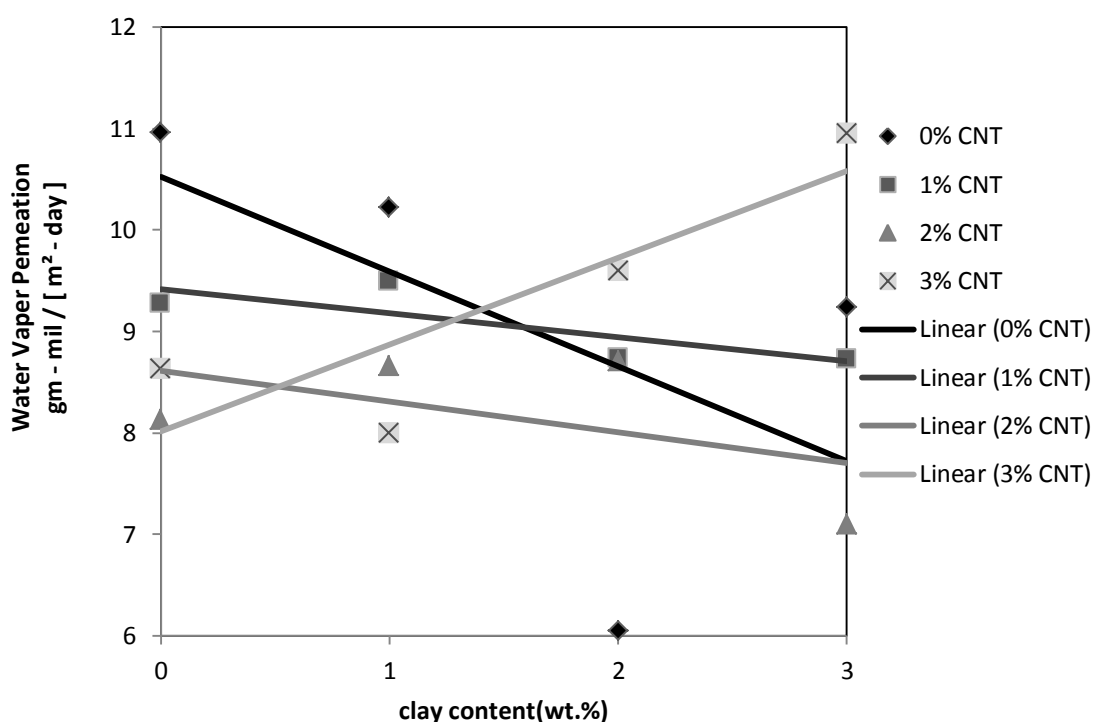
ภาพที่ 5.23 การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก้ำซอกซิเจนในวัสดุคอมโพสิตจากการทดลองกับ Modified Nielsen Model ที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ

5.4 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP)

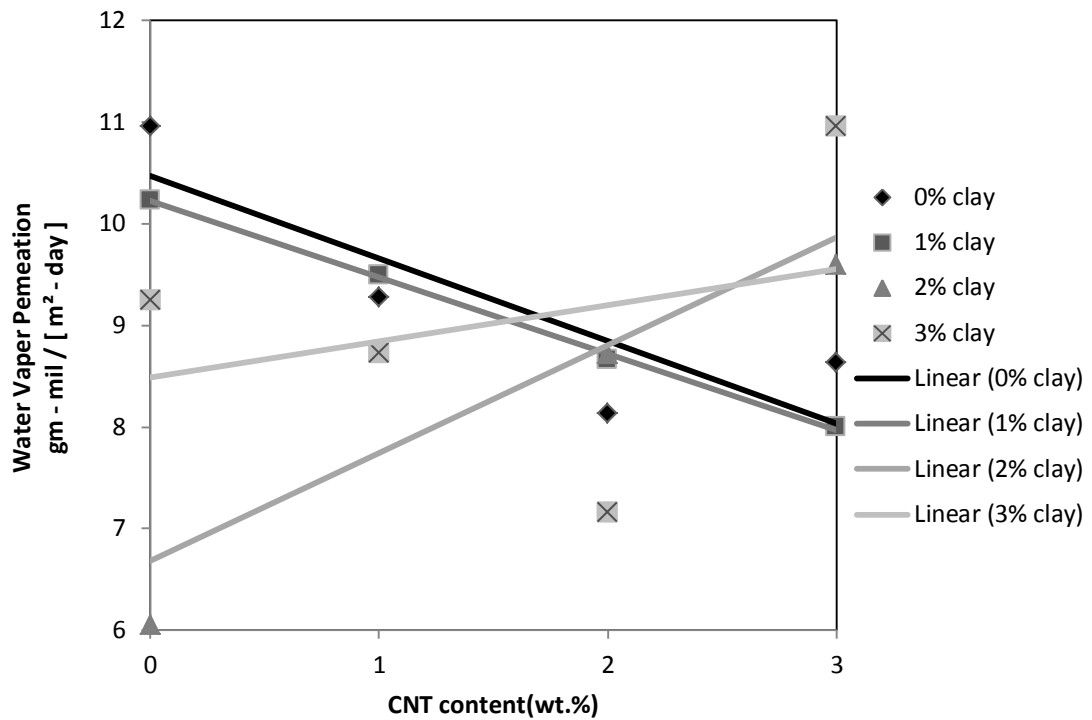
ผลการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำจากภาพที่ 5.24 และ ภาพที่ 5.25 จะเห็นว่าพอลิโพรพิลีนมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำเท่ากับ $10.96 \text{ gm mil/m}^2 \text{ day}$ (ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำจาก Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook [59] เท่ากับ $11.79 \text{ gm mil/m}^2 \text{ day}$ เมื่อเติมเคลย์ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำจะต่ำลง เพราะเคลย์มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี [55,56] โดยมีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณเคลย์เป็น 2% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ $6.06 \text{ gm mil/m}^2 \text{ day}$ หรือต่ำลงเป็น 44% ของพอลิโพรพิลีน และเมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงไปวัสดุคอมโพสิตจะเห็นว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มต่ำลงกว่าพอลิโพรพิลีนและค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2% โดยมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ $8.14 \text{ gm mil/m}^2 \text{ day}$ หรือต่ำลงเป็น 26% ของพอลิโพรพิลีน การเติมสารตัวเติมลงไปวัสดุคอมโพสิตทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดต่ำลง เพราะสารตัวเติมจะเป็นตัวขัดขวางทำให้เส้นทางการซึมผ่านของไอน้ำคดเคี้ยว ไอน้ำจึงผ่านได้ยากขึ้น และการเติมสารตัวเติมทั้งเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงไปส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มต่ำลงกว่าการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์เติมเพียง

ตัวเดียว โดยลดลงต่ำสุดที่ปริมาณเคลย์ 3% โดยน้ำหนักและปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าต่ำลงเป็น 35% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน จะเห็นว่าการเติมเคลย์เพียงตัวเดียวส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มต่ำลงมากที่สุด การเติมเคลย์จึงมีอิทธิพลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์

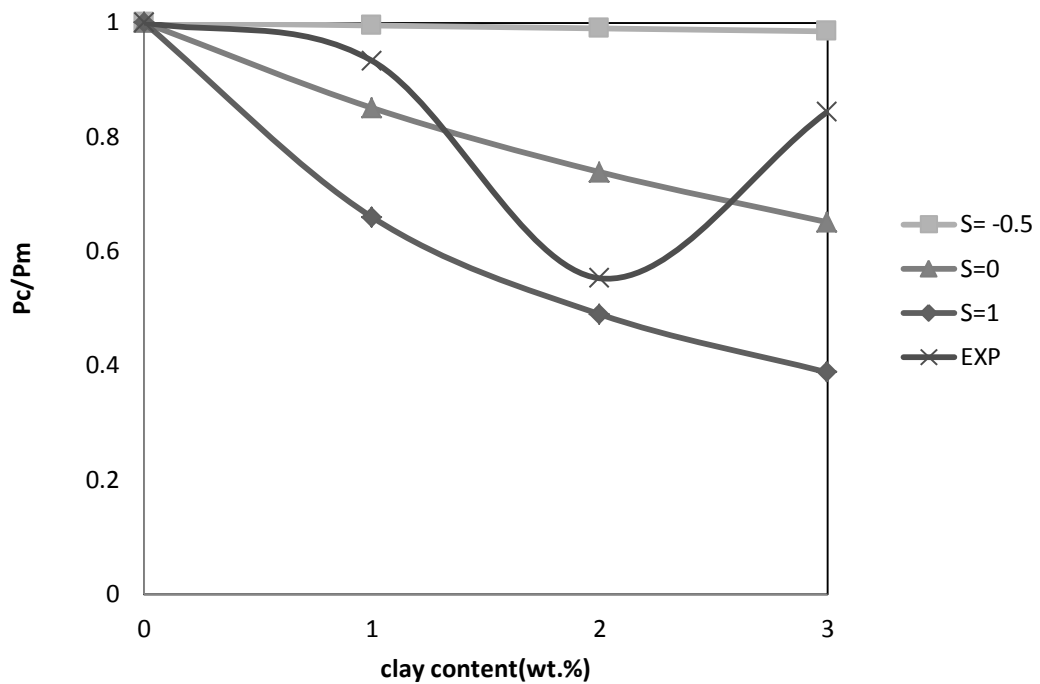
จากภาพที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ จากการทดลองกับ Modified Nielsen Model โดยกำหนดให้เคลย์มีความยาวของชั้นซิลิเกตเป็น 200 nm และมีความกว้างของชั้นซิลิเกตเป็น 1 nm พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับ Modified Nielsen Model ที่ $S=0$ แสดงว่าจากการทดลองการเรียงตัวของชั้นซิลิเกตมีแนวโน้มว่าเรียงทำมุมอยู่ในช่วงระหว่าง 54.7° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของไอน้ำ



ภาพที่ 5.24 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.25 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ในวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.26 การเปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไอน้ำในวัสดุคอมโพสิตจากการทดลองกับ Modified Nielsen Model ที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ

5.5 ค่าการนำความร้อน

Thermal diffusivity หรือ ค่าการแพร่ความร้อน เป็นสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ได้จาก อัตราส่วนของค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุต่อผลคูณของค่าความหนาแน่น (density) กับค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของวัสดุนั้น

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5.3)$$

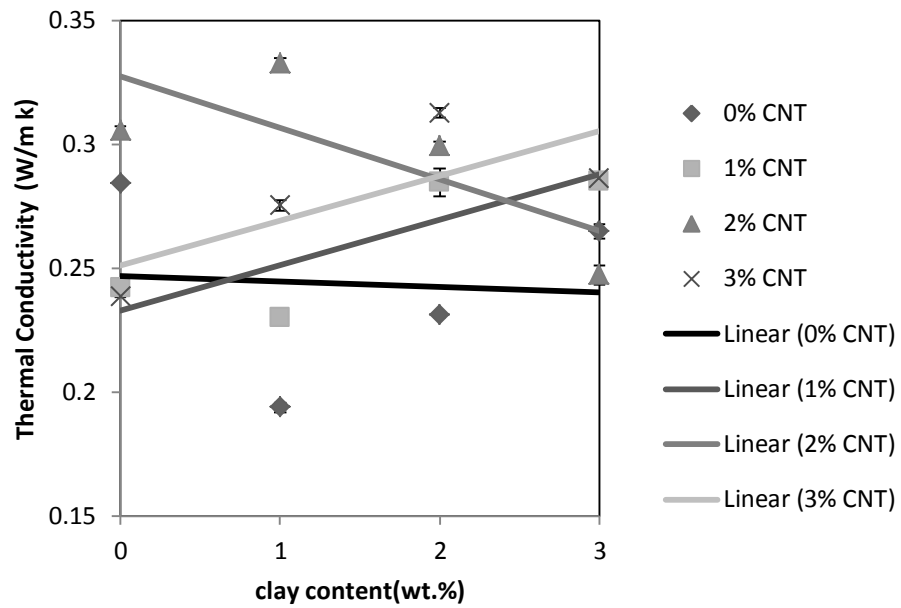
โดย α ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)

k ค่าการนำความร้อน(thermal conductivity)

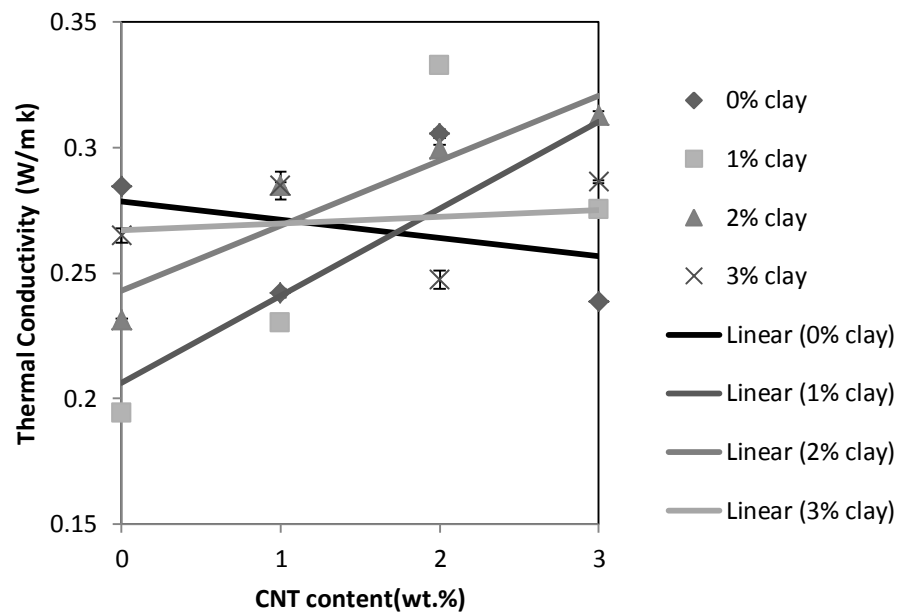
ρ ค่าความหนาแน่น (density)

C_p ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)

จากการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนดังภาพที่ 5.27 และ ภาพที่ 5.28 พบว่าพอลิโพรพิลีนมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.2843 W/m K เมื่อเพิ่มปริมาณเคลือบค่าการนำความร้อนมีค่าน้อยกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่เคลือบสารใด ๆ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Seo และคณะเมื่อเคลือบลงไปบนพอลิเมอร์ในช่วงความเข้มข้นประมาณ 0% ถึง 5% โดยน้ำหนัก ค่าการนำความร้อนลดลง [57] เมื่อเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในวัสดุคอมโพสิต เมื่อปริมาณเคลือบเพิ่มขึ้นโดยปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์คงที่จะเห็นว่าค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น-ลดลงไม่เป็นระเบียบ และเมื่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นโดยปริมาณเคลือบคงที่จะเห็นว่าค่าการนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการทดลองค่าการนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวบ์/พอลิโพรพิลีนวัสดุคอมโพสิตของ Julia A และคณะพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.206 W/m K ถึง 0.467 W/m K ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0% ถึง 15 % โดยน้ำหนัก [58] และมากที่สุดที่วัสดุคอมโพสิตที่มีเคลือบปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2% โดยน้ำหนัก คือมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.3328 W/m K ซึ่งสูงเป็น 17% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน



ภาพที่ 5.27 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ

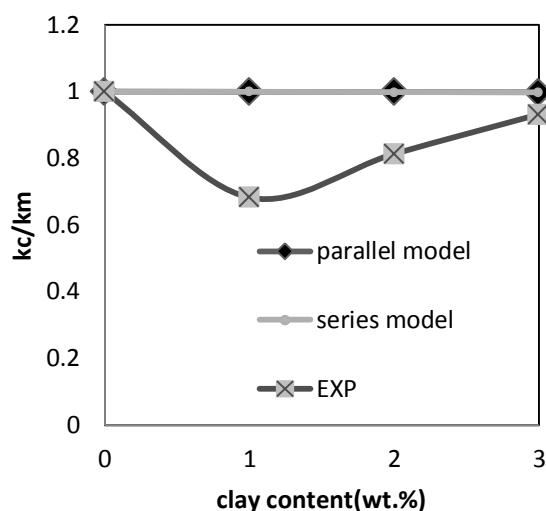


ภาพที่ 5.28 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณคาร์บอนนาทิวบ์ต่าง ๆ

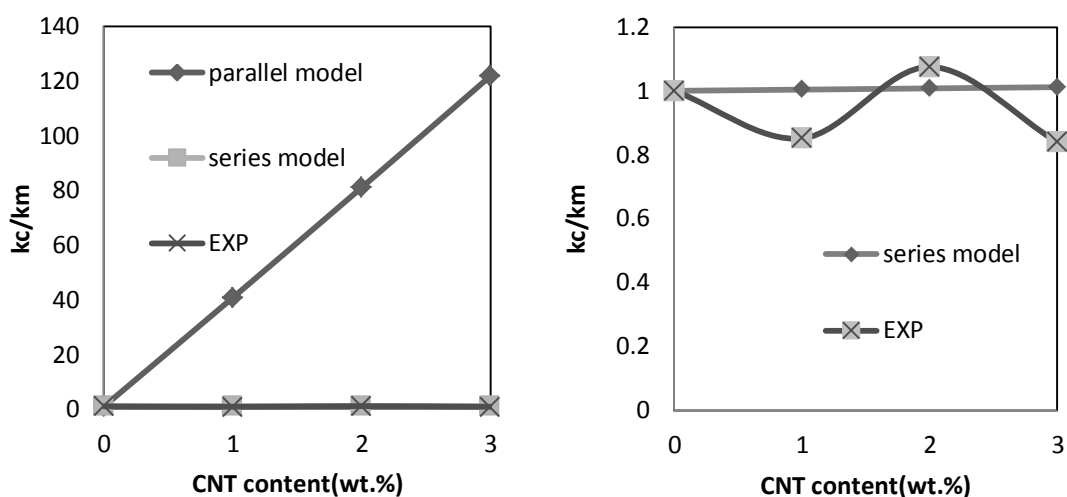
ตารางที่ 5.5 ค่าเชิงความร้อนของวัสดุคอมโพสิตโดยวัดด้วยเครื่อง (TCA)

ตัวอย่าง	Thermal Conductivity (W/m K)	Thermal Diffusivity (mm ² /s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
PP	0.2843	0.1653	1.721
PP/ 1%clay/ 0%CNT	0.1940	0.2379	0.8158
PP/ 2%clay/ 0%CNT	0.2311	0.1917	1.2053
PP/ 3%clay/ 0%CNT	0.2649	0.1656	1.6017
PP/ 0%clay / 1%CNT	0.2420	0.2015	1.2010
PP/ 1%clay / 1%CNT	0.2301	0.2270	1.0137
PP/ 2%clay / 1%CNT	0.2848	0.1950	1.4653
PP/ 3%clay / 1%CNT	0.2850	0.2087	1.3667
PP/ 0%clay / 2%CNT	0.3056	0.2161	1.4143
PP/ 1%clay / 2%CNT	0.3328	0.2065	1.6123
PP/ 2%clay / 2%CNT	0.2993	0.2200	1.3613
PP/ 3%clay / 2%CNT	0.2473	0.2708	0.9180
PP/ 0%clay/ 3%CNT	0.2386	0.3013	0.7921
PP/ 1%clay /3%CNT	0.2754	0.2842	0.9702
PP/ 2%clay /3%CNT	0.3126	0.2478	1.2623
PP/ 3%clay /3%CNT	0.2864	0.2608	1.0983

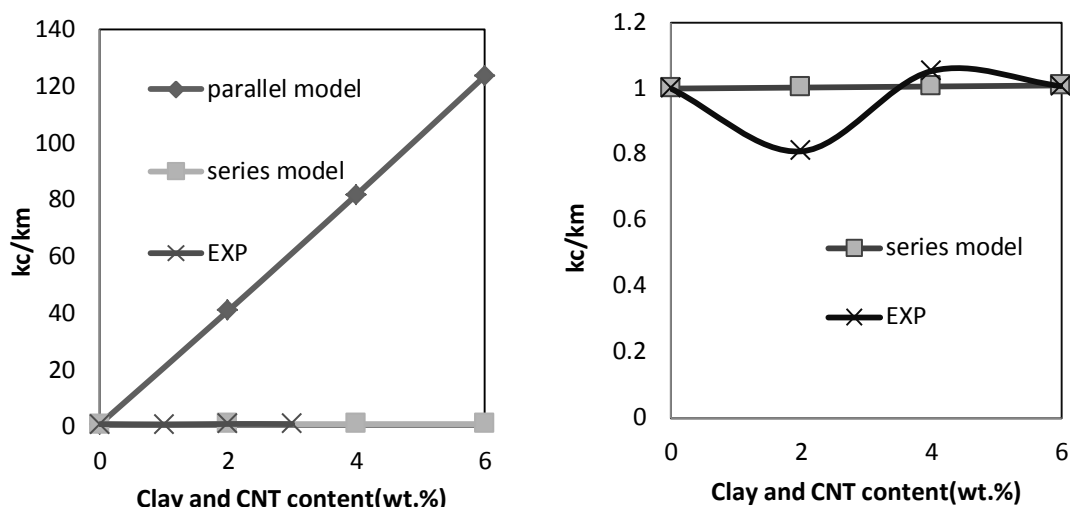
เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลองกับ series model และ parallel model ดังภาพที่ 5.29 พบว่าเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มต่ำกว่า series model และ parallel model ภาพที่ 5.30 เมื่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเป็นแบบ series model และภาพที่ 5.31 ปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ผสมกันในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเป็นแบบ series model เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5.29 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลองกับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์ต่าง ๆ



ภาพที่ 5.30 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลองกับ series model และ parallel model ที่ปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ



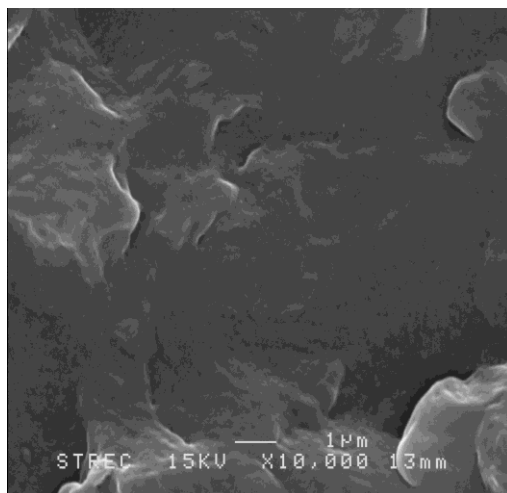
ภาพที่ 5.31 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจากการทดลอง

กับ series model และ parallel model ที่ปริมาณเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่าง ๆ

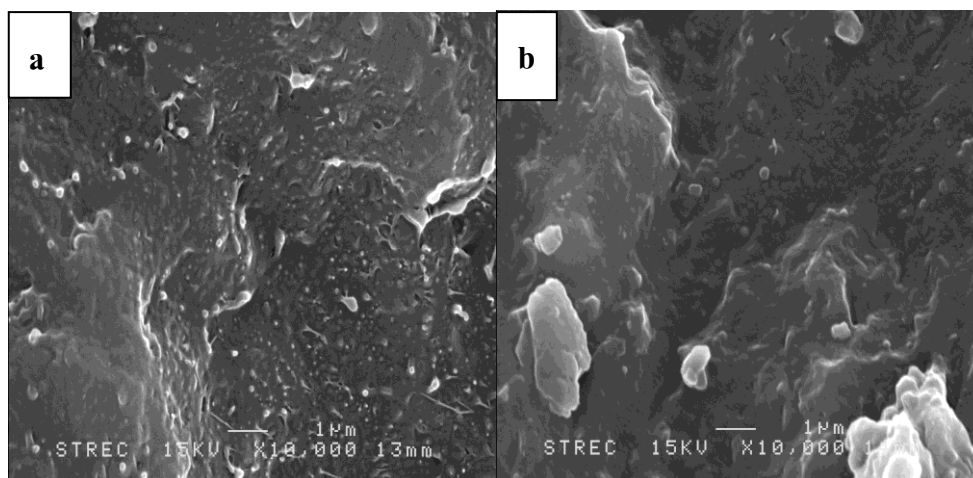
5.6 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะระดับจุลภาคของโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/เคลย์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งงานที่ถูกหักอย่างฉับพลันหลังจากแช่ด้วยไนโตรเจนเหลวจะสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของสารตัวเติมได้ อีกทั้งพื้นผิวของรอยแตกหักที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายลักษณะความเปราะและความเหนียวของวัสดุคอมโพสิต ที่ได้จากการเติมเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีน ซึ่งผิวยรอยแตกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมแสดงในภาพที่ 5.32

จากภาพที่ 5.32 ซึ่งแสดงผิวยรอยแตกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม พบว่าพอลิโพรพิลีนมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวเนื่องจากพบการยึดตัวของผิวหน้ารอยแตกของพอลิโพรพิลีน โดยที่ผิวยรอยแตกของพอลิโพรพิลีนซึ่งเติมเคลย์ 1% โดยน้ำหนัก พบว่าจะเห็นเคลย์ขนาดเล็มากกระจายตัวบนผิวหน้ารอยแตกและแทรกตัวอยู่ทั่วทั้งพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุเนื้อพื้น ซึ่งทำให้พอลิโพรพิลีนมีความแกร่งและทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามมีเคลย์บางส่วนที่ไม่กระจายตัวและรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) จะเห็นได้ในเคลย์ 3% โดยน้ำหนัก ทำให้พื้นที่ผิวของเคลย์และการยึดติดกันของเคลย์กับพอลิโพรพิลีนลดลง ปรากฏเป็นช่องว่างขนาดเล็กทำให้เกิดเป็นจุดที่มีความเค้นสูงและเป็นจุดเริ่มของการแตกหักในชิ้นงาน



ภาพที่ 5.32 ผิวยรอยแตกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม

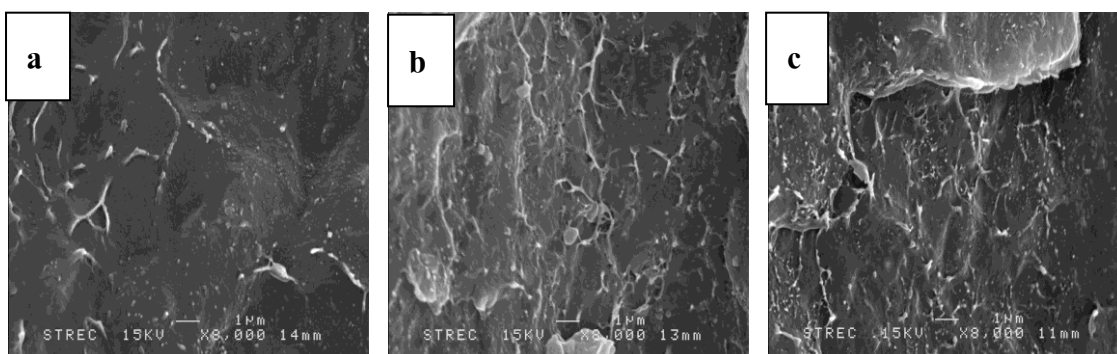


ภาพที่ 5.33 ผิวยของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/เคลย์

เมื่อ a) เคลย์ 1% โดยน้ำหนัก b) เคลย์ 3% โดยน้ำหนัก

ผิวยรอยแตกของพอลิโพรพิลีนซึ่งเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเห็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาดเล็กมากกระจายตัวบนผิวยรอยแตกและแทรกตัวอยู่ทั่วทั้งพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุเมทริกซ์ ซึ่งทำให้พอลิโพรพิลีนมีความแกร่งและทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามมีคาร์บอนนาโนทิวบ์บางส่วนที่ไม่กระจายตัวและรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) เนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ที่

กระทำระหว่างโมเลกุลของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งปริมาณกลุ่มก้อนของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เติมในพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์และการยึดติดกันของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์กับพอลิโพรพิลีนลดลง เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5.34 ผิวของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/คาร์บอนนาโนทิวบ์

เมื่อ a) CNT 1% โดยน้ำหนัก b) CNT 2% โดยน้ำหนัก c) CNT 3% โดยน้ำหนัก

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านก๊าซและสมบัติด้านการนำความร้อนของพอลิโพรพิลีน โดยการผสมเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในพอลิโพรพิลีนเพื่อพัฒนาสมบัติทั้งสองด้านที่ดีขึ้น โดยได้ศึกษาหาปริมาณพอลิโพรพิลีนมาเลือกแอนไฮไดรด์และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดที่เหมาะสมในการผสมวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT และศึกษาอิทธิพลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ความสามารถในการซึมผ่าน และค่าการนำความร้อน

เมื่อนำพอลิโพรพิลีนมาผสมด้วย PPMA เป็นปริมาณ 0 ถึง 3 เท่าของปริมาณสารตัวเติม และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ 1 ถึง 4 ครั้งเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าปริมาณ PPMA ที่เหมาะสมต่อการเตรียมวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT คือ PPMA เป็น 2 เท่าของปริมาณสารตัวเติม และจำนวนครั้งของการตัดเม็ดเป็น 3 ครั้ง การเตรียมวัสดุคอมโพสิต PP/clay/CNT เตรียมโดยเติมเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นปริมาณ 1% ถึง 3% โดยน้ำหนัก และจากการหาระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์ลงไประยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์จะน้อยลง และวัสดุคอมโพสิตที่ได้ผสมกันแบบ intercalated nanocomposite

สมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้คือค่าการทนต่อแรงดึงซึ่งพบว่าเมื่อเติมเคลย์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็น 17% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน เมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็น 55% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และเมื่อเติมเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็น 64% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน การทดสอบหาค่าโมดูลัสของแรงดึงพบว่าเมื่อเติมเคลย์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าโมดูลัสของแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็น 28% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน เมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าโมดูลัสของแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็น 110% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และเมื่อเติมเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่าโมดูลัสของแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเพิ่มขึ้นเป็น 134% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน สมบัติเชิงกลมีอิทธิพลต่อคาร์บอนนาโนทิวบ์มากกว่าเคลย์ และมีแนวโน้มเป็นแบบ parallel model

ค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนเมื่อเติมเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในพอลิโพรพิลีนทำให้ค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง และมีแนวโน้มลดต่ำลงไปอีกเมื่อเติมสารตัวเติมทั้งสองตัวในวัสดุคอมโพสิต โดยลดลงต่ำสุดที่ปริมาณเคลือบ 1% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น 2% โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าเท่ากับ 2539.34 gm mil/m² day ซึ่งลดลงเป็น 77% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และจากการเปรียบเทียบกับ Modified Nielsen Model มีแนวโน้มอยู่ในระหว่างช่วง ที่ S=0 และ S=1

ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมเคลือบและคาร์บอนนาโนทิวบ์เช่นเดียวกัน เพราะอนุภาคสารตัวเติมจะเข้าไปขัดขวางเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำในวัสดุคอมโพสิต แต่การเติมเคลือบเพียงตัวเดียวส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มต่ำลงมากที่สุด การเติมเคลือบจึงมีอิทธิพลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณเคลือบเป็น 2% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 6.06 gm mil/m² day หรือต่ำลงเป็น 45% ของพอลิโพรพิลีน และจากการเปรียบเทียบกับ Modified Nielsen Model มีแนวโน้มอยู่ในช่วง ที่ S=0

การทดสอบค่าการนำความร้อนพบว่า การทดสอบค่าการนำความร้อน ไม่มีอิทธิพลต่อเคลือบ แต่มีอิทธิพลต่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงไปค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่วัสดุคอมโพสิตที่มีเคลือบปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก และคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2% โดยน้ำหนัก คือมีค่าสูงขึ้นไปเป็น 0.3328 W/m K ซึ่งสูงเป็น 17% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเป็นแบบ series model

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การเตรียมชิ้นงานฟิล์มควรขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความเรียบสม่ำเสมอ

6.2.2 อาจใช้สารตัวเติมตัวอื่นแทนเพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ เช่น titanium oxynitride และ silicon oxide และอาจใช้สารตัวเติมตัวอื่นแทนเพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนได้ เช่น carbon nanofiber, graphite, carbon black, alumina powder และ nano CaCO₃ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] สุภัตตรา เจริญเกษมวิทย์ และ ธวัช นุสนธรา. มาตรฐานการบรรจุภัณฑ์อาหาร. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 167 (มีนาคม 2548) : 23-25.
- [2] ตติศักดิ์ วัจวารัญญ. Retort Pouch : บรรจุภัณฑ์ทางเลือกของผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป. FOOD Focus Thailand 47 (กุมภาพันธ์ 2553) : 38-39.
- [3] วราทิพย์ สมบุญญฤทธิ. บรรจุภัณฑ์อ่อนตัวสำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ. ใน Retort Pouch for Low Acid Canned Food, หน้า 29-30. กรุงเทพฯ: ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.
- [4] Abdul-Ghani Al-Baali, A.G., and Mohammed, M.F. Sterilization of Food in Retort Pouches. New York: Spring Science, 2006.
- [5] Soojin, J., Linda, J.C., and Alvin, H. Using the Flexible Retort Pouch to Add Value to Agricultural Products. Food Safety and Technology 18 (June 2006) : 2.
- [6] Canadian Food Inspection Agency. Flexible Retort Pouch Defects Manual Identification and Classification [Online]. 2011. Available form: <http://www.inspection.gc.ca/english/animafispoi/manman/pousac/toctdme.shtml> [2011, March 25]
- [7] Vickie, A.V., and Elizabeth. W.C. Essentials of Food Science, pp.480. New York: Spring Science, 2008.
- [8] Polypropylene. [Online]. 2011. Available form: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene> [2011, November 15]
- [9] Clive, M., and Teresa, C. Polypropylene: the definitive user's guide and databook, pp.4. New York: William Andrew, 1998.
- [10] Typical properties of polypropylene. [Online]. 2011. Available form: <http://www.sdplastics.com/polypro.html> [2012, March 5]
- [11] Grim, R.E. Clay mineralogy 2nd ed. New York. : McGraw-Hill, 1968.
- [12] Hovilailux, P., Analysis of permeability of low density polyethylene/clay nanocomposite films. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.

- [13] Ray, S. Sinha, and Masami, O. Polymer/layered silicated nanocomposites: a review from preparation to processing. Polymer Engineering and science 38 (2003) : 1351-1358.
- [14] Alexandre, M., and Dubois, P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. Materials Science and Engineering 8 (2002) : 1-63.
- [15] Hang, Y., and Santiago-Aviles, J.J. Large negative magnetoresistance and two-dimensional weak localization in carbon nanofiber fabricated using electrospinning. Applied Physics 94 (2003) : 1721-1727.
- [16] บุญทวี เลิศปัญญาพรชัย. คาร์บอนนาโนทิวบ์. วารสารก้าวหน้าทางโลกวิทยาศาสตร์ 11, (2554) : 34-42.
- [17] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. นาโนเทคโนโลยีคลื่นลูกใหม่แห่งศตวรรษที่ 21. กรุงเทพมหานคร: ฐาน มีเดีย เน็ตเวิร์ค, 2549.
- [18] Aqel, A., Abou El-Nour Kholoud, M.M., Ammar Reda, A.A., and Al-Warthan, A. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterization. Arabian Journal of Chemistry, 5 (January 2012) : 1–23.
- [19] Carbon Nanotube Composites [Online]. 2012. Available form: <http://coecs.ou.edu/Brian.P.Grady/nanotube.html> [2012, March 21]
- [20] Research/ Molecular Technology [Online]. 2012. Available form: <https://www.jyu.fi/fysiikka/en/research/material/nanophys/moltech/research> [2012, March 21]
- [21] Carbon Nanotube [Online]. 2012. Available form : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-8.html> [2012, March 21]
- [22] Fengge, G. Clay/polymer composite : the story. Materials today 22, 1 (November 2004): 50-55.
- [23] Kojama, Y., et al. The study of Nylon6-clay nanocomposites. Polymer science 31,7 (1993) : 1755-1761.
- [24] Jordon, J.W. Organophilic Bentonites. Physical Colloid Chemistry (1949) : 294-306.
- [25] Giovanna Maria, R. Polymer layered silicate nanocomposite film bt melt compounding: preparation, structure and properties Doctoral dissertation, Department of Chemical and Food Engineering, Faculty of Chemical Engineering, University of Salerno, 2004.
- [26] Pauly, S. Permeability and Diffusion Data. Cited in Brandrup, J., Immergut, E.H. Polymer Handbook, pp. 435-449. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [27] Loncin, M. Mass transfer and permeability, Cited in Mathlouthi M., Ed. Food Packaging and Preservation (theory and practice), pp. 1-24. Elsevier Applied Science, 1985.

- [28] Manias, E. Polymer Nanocomposite Technology, Fundamentals of Barrier, pp.1-6. Materials Science & Engineering department, Penn State University, 2007.
- [29] Nielsen, L.E. Models for the permeability of filled polymer systems. Macromolecular Science Chemistry A1 (1967) : 929–942.
- [30] Chunsheng, L., and Yiu-Wing, M. Permeability modelling of polymer-layered silicate nanocomposites. Composites Science and Technology 67, 14 (2007) : 2895-2902.
- [31] Bharadwaj, R.K. Modeling the Barrier Properties of Polymer-layered Silicate Nanocomposites. Macromolecules 34,26 (2001) : 9189–9192 .
- [32] Heat Conduction [Online] .2011. Available form: //en.wikipedia.org/wiki/Heat_conduction [2011,November 26]
- [33] T’Joen, C, and Park, Y., Wang, Q., Sommers, A., Han, X., and Jacobi, A. A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications. Int J Refrig 32 (2009) : 763-779.
- [34] Hu, M., Yu, D., and Wei, J. Thermal conductivity determination of small polymer samples by differential scanning calorimetry. Polymer Testing 26 (2007) : 333-337.
- [35] Speight, J.G. Lange’s Handbook of Chemistry (Sixteenth Edition), Section 2: Organic Chemistry, 2.20 POLYMERS, pp. 2794-2797. New York : McGraw-Hill, 2005.
- [36] Pierson, H.O. Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications. New Jersey : Noyes, 1993.
- [37] Wypych, G. Handbook of Fillers: Physical Properties of Fillers and Filled Materials. Toronto : ChemTec Publishing, 2000.
- [38] Fischer, J.E. Carbon nanotubes: structure and properties. Cited in Yury, G. Carbon Nanomaterials, pp. 51-58. NewYork : Taylor and Francis Group, 2006.
- [39] Kelly, B.T. Physics of Graphite. Barking, UK : Applied Science, 1981.
- [40] Zhidong, H., and Alberto, F. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. Polymer Science 36 (2011) : 914–944.
- [41] Chinellato, A.C., Vidotti, S.E., Hu, G.H., and Pessan, L.A. Compatibilizing effect of acrylic acid modified polypropylene on the morphology and permeability properties of polypropylene/ organoclay nanocomposites. Composites Science and Technology 70 (2010) : 458–465.

- [42] Raka, L., Bogoeva-Gaceva, G., and Loos, J. Characterization of polypropylene/layered silicate nanocomposites prepared by single-step method. *J Therm Anal Calorim* 100 (2010) : 629–639.
- [43] Kashiwaga, T., Grulke, E., and Hilding, J. Thermal and flammability properties of polypropylene/carbon nanotube nanocomposite. *Polymer* 45 (2004) : 4227–4239.
- [44] Prashantha, K., Soulestin, J., Lacrampe, M. F., and Claes, M. Multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites based on masterbatch route: Improvement of dispersion and mechanical properties through PP-g-MA addition. *eXPRESS Polymer Letters* 2, 10 (2008) : 735–745.
- [45] ณัฐวุฒิ ทองโสม. การเตรียมและสมบัติของพอลิซัลโฟนาโนคอมโพสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2549.
- [46] Basic diffraction: waves, interference and reciprocal space. [Online]. 2012. Available form: http://www.structmed.cimr.cam.ac.uk/Course/Basic_diffraction/Diffraction.html [2013, March 11]
- [47] Chinellato, A.C., Vidotti, S.E., Hu, G.H., and Pessan, L.A. An acrylic acid modified polypropylene as a compatibilizing agent for the intercalation/exfoliation of an organically modified montmorillonite in polypropylene. *J Polym Sci Part B. Polym Phys* 46 (2008) : 1811–1819.
- [48] Shi, D., Hu, G.H., and Li, R.K.Y. Concept of nano-reactor for the control of the selectivity of the free radical grafting of maleic anhydride onto polypropylene in the melt. *Chem Eng Sci* 61 (2006) : 3780–3784.
- [49] Girish, G. Synthesis structure processing property relationships in the polymer nanocomposites. Master's Thesis, Chemical Engineering Division National Chemical Laboratory, University of Pune, 2003.
- [50] มัทรีญา พรหมจันทร์ และ ศิริ ศรีเรืองหล้า. นาโนเคลย์คอมโพสิต โดยการสร้างฟิล์มพอลิเมอร์ภายในชั้นการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวภาควิชาวิศวกรรมเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.

- [51] Min-Kang, S., Jae-Rock, L., and Soo-Jin, P. Crystallization kinetics and interfacial behaviour of polypropylene composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. Materials Science and Engineering A 404 (2005) : 79–84.
- [52] Pirlot, C., Willems, I., and Fonseca, A. Preparation and Characterization of Carbon Nanotubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes polyacrylonitrile composites. Advance Engineering Materials, 4, 3, C183 (2002) : 1-11.
- [53] Bhattacharjee, C.R., Nath, A., and Purkayastha1, D.D. Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes Using a Natural Precursor: Turpentine Oil. Sci. J. UBU 2, 1 (January-June, 2011) : 36-42.
- [54] Li, W., Liang, C., Zhou, W., Qiu, J., and Zhou, Z. Preparation and Characterization of Multiwalled Carbon Nanotube-Supported Platinum for Cathode Catalysts of Direct Methanol Fuel Cells. J. Phys. Chem. B 107 (2003) : 6292-6299.
- [55] Sossio, C., Clara, S., Donatella, D., and Marilena, P. Effect of hydrocarbon resin on the morphology and mechanical properties of isotactic polypropylene-clay composites [Online]. 2010. Available form: Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) [2012, March 26]
- [56] Li, X., Xia-Yan, L., Zhong-Jie, H., Ji-Hao, C., and Chang-Qing, F. Preparation and Performance of High-Barrier Low Density Polyethylene Organic Montmorillonite. Polymer-Plastics Technology and Engineering 51 (2012) : 1251–1257.
- [57] Sushant, A., and Rakesh, K. Gupta. Nanocomposites Handbook Thermal Conductivity of Polymer Nanocomposites, pp.485-508. Taylor & Francis, 2010.
- [58] Julia, A.K., Beth, A.J., Michael. D.V., and Charles J.C. Effects of Carbon Fillers in Thermally Conductive Polypropylene Based Resins. Polymer Composites 31, 3 (March 2010) : 497–506.
- [59] Clive, M., and Theresa, C. Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook. Norwich, NY : William Andrew, 2008.
- [60] Gibson, R. F. Principle of composite material mechanic. Department of Mechanical Engineering. Michigan, Wayne State University. CRC Press Taylor & Francis, 2012.
- [61] Fred, W, and Billmeyer, J. Textbook of Polymer Science. John Wiley&sons, 1976.

- [62] Dowdy, R. H., and Larson, W. E. Tensile Strength of Montmorillonite as a Function of Saturating Cation and Water Content. Soil Science Society of America 35, 6, (1971) : 1010-1014.
- [63] Yu, M.F., Lourie, O., Dyer, M.J., Moloni, K., Kelly, T.F., and Ruoff, R.S. Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. Science 287 (2000) : 637-640.
- [64] Biqiong, C., and Julian Evans ,R.G. Elastic moduli of clay platelets. Scripta Materialia 54, 9 (May 2006) : 1581-1585.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก. ผลการทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/
คาร์บอนนาโนทิวบ์

ตัวอย่าง	Specimen	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP	1	23.52	0.80
	2	22.65	0.71
	3	21.68	0.62
	4	20.50	0.57
	5	21.62	0.61
	Average	22.00	0.66
	S.D.	1.14	0.09
PP/ 1%clay/ 0%CNT	1	24.36	0.72
	2	23.33	0.78
	3	23.23	0.80
	4	26.18	0.83
	5	26.00	0.85
	Average	24.62	0.80
	S.D.	1.42	0.05
PP/ 2%clay/ 0%CNT	1	26.14	0.76
	2	24.84	0.80
	3	24.77	0.80
	4	26.66	0.86
	5	26.62	0.88
	Average	25.81	0.82
	S.D.	0.94	0.05

ตารางที่ ก. ผลการทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/
คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP/ 3%clay/ 0%CNT	1	26.54	0.94
	2	23.49	0.79
	3	20.78	0.71
	4	24.28	0.90
	5	27.97	0.96
	Average	24.61	0.86
	S.D.	2.78	0.11
PP/ 0%clay/ 1%CNT	1	29.81	0.98
	2	30.18	1.03
	3	32.89	1.07
	4	33.95	1.11
	5	33.17	1.18
	Average	32.00	1.07
	S.D.	1.88	0.08
PP/ 1%clay /1%CNT	1	34.70	1.31
	2	32.90	1.21
	3	31.67	1.07
	4	30.66	1.10
	5	32.93	1.31
	Average	32.57	1.20
	S.D.	1.52	0.11

ตารางที่ ก. ผลการทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP/ 2%clay /1%CNT	1	33.95	1.23
	2	35.03	1.29
	3	33.19	1.22
	4	34.39	1.30
	5	33.82	1.29
	Average	34.08	1.27
	S.D.	0.69	0.04
PP/ 3%clay /1%CNT	1	27.65	1.18
	2	31.81	1.19
	3	32.57	1.25
	4	34.08	1.49
	5	33.56	1.45
	Average	31.93	1.31
	S.D.	2.55	0.15
PP/ 0%clay /2%CNT	1	32.22	1.23
	2	33.07	1.19
	3	34.52	1.18
	4	33.54	1.14
	5	33.97	1.27
	Average	33.47	1.20
	S.D.	0.88	0.05

ตารางที่ ก. ผลการทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP/ 1%clay /2%CNT	1	34.28	1.23
	2	36.10	1.38
	3	33.25	1.26
	4	35.26	1.51
	5	35.64	1.68
	Average	34.91	1.41
	S.D.	1.14	0.18
PP/ 2%clay /2%CNT	1	33.03	1.39
	2	36.62	1.39
	3	35.22	1.54
	4	32.56	1.35
	5	33.58	1.33
	Average	34.20	1.40
	S.D.	1.68	0.08
PP/ 3%clay /2%CNT	1	34.18	1.59
	2	33.95	1.26
	3	35.93	1.59
	4	33.50	1.21
	5	35.71	1.46
	Average	34.65	1.42
	S.D.	1.10	0.18

ตารางที่ ก. ผลการทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/
คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP/0%clay/3%CNT	1	34.25	1.54
	2	33.51	1.44
	3	34.65	1.34
	4	33.35	1.29
	5	34.77	1.43
	Average	34.11	1.41
	S.D.	0.65	0.10
PP/1%clay/3%CNT	1	34.67	1.46
	2	35.76	1.42
	3	35.09	1.53
	4	36.55	1.56
	5	34.50	1.64
	Average	35.31	1.52
	S.D.	0.85	0.09
PP/2%clay/3%CNT	1	38.46	1.63
	2	34.31	1.46
	3	35.13	1.52
	4	34.07	1.65
	5	38.88	1.52
	Average	36.17	1.55
	S.D.	2.32	0.08

ตารางที่ ก. ผลการทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/
คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Tensile Stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
PP/ 3%clay /3%CNT	1	33.98	1.46
	2	33.77	1.28
	3	37.86	1.56
	4	36.64	1.61
	5	34.18	1.27
	Average	35.29	1.44
	S.D.	1.85	0.16

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

ตารางที่ ข. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

ตัวอย่าง	Specimen	Oxygen Permeability (cc mil/m ² day)
PP	1	10484.3
	2	11580.65
	3	11648.47
	Average	11237.8
	S.D.	653.44
PP/ 1%clay/ 0%CNT	1	10782.80
	2	9666.46
	3	8191.35
	Average	9546.87
	S.D.	1299.86
PP/ 2%clay/ 0%CNT	1	4507.36
	2	4959.40
	3	3673.34
	Average	4380.03
	S.D.	652.41
PP/ 3%clay/ 0%CNT	1	4430.49
	2	3604.20
	3	4704.33
	Average	4246.34
	S.D.	572.72

ตารางที่ ข. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Oxygen Permeability (cc mil/m ² day)
PP/ 0%clay / 1%CNT	1	8993.61
	2	10221.29
	3	8632.86
	Average	9282.58
	S.D.	832.71
PP/ 1%clay / 1%CNT	1	7830.32
	2	7502.55
	3	7738.27
	Average	7690.38
	S.D.	169.05
PP/ 2%clay / 1%CNT	1	5539.66
	2	4896.19
	3	4461.48
	Average	4965.78
	S.D.	542.45
PP/ 3%clay / 1%CNT	1	7051.52
	2	8225.07
	3	7180.57
	Average	7485.72
	S.D.	643.54
PP/ 0%clay / 2%CNT	1	7277.87
	2	5631.12
	3	6283.98
	Average	6397.65
	S.D.	829.24

ตารางที่ ข. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Oxygen Permeability (cc mil/m ² day)
PP/ 1%clay / 2%CNT	1	1940.01
	2	2211.65
	3	3466.62
	Average	2539.43
	S.D.	814.38
PP/ 2%clay / 2%CNT	1	3394.97
	2	4982.08
	3	4969.06
	Average	4448.70
	S.D.	912.58
PP/ 3%clay / 2%CNT	1	6215.30
	2	6809.06
	3	6555.99
	Average	6526.79
	S.D.	297.96
PP/ 0%clay/ 3%CNT	1	6559.92
	2	7429.73
	3	6961.15
	Average	6983.60
	S.D.	435.34
PP/ 1%clay /3%CNT	1	3723.54
	2	3591.94
	3	5280.94
	Average	4198.80
	S.D.	939.46

ตารางที่ ข. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Oxygen Permeability (cc mil/m ² day)
PP/ 2%clay /3%CNT	1	2309.07
	2	2642.84
	3	2691.69
	Average	2547.87
	S.D.	208.24
PP/ 3%clay /3%CNT	1	2309.07
	2	2981.52
	3	2982.52
	Average	2757.70
	S.D.	388.53

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

ตารางที่ ค. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์

ตัวอย่าง	Specimen	Water Vaper Permeability (gm mil/m ² day)
PP	1	9.34
	2	11.85
	3	9.30
	4	13.35
	Average	10.96
	S.D.	1.99
PP/ 1%clay/ 0%CNT	1	8.26
	2	10.49
	3	10.49
	4	11.68
	Average	10.23
	S.D.	1.43
PP/ 2%clay/ 0%CNT	1	5.64
	2	7.16
	3	4.90
	4	6.52
	Average	6.06
	S.D.	0.99

ตารางที่ ค. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Water Vapor Permeability (gm mil/m ² day)
PP/ 3%clay / 0%CNT	1	7.42
	2	9.67
	3	8.35
	4	11.54
	Average	9.25
	S.D.	1.79
PP/ 0%clay / 1%CNT	1	8.15
	2	10.62
	3	7.89
	4	10.46
	Average	9.28
	S.D.	1.46
PP/ 1%clay / 1%CNT	1	8.38
	2	10.39
	3	8.02
	4	11.18
	Average	9.49
	S.D.	1.53
PP/ 2%clay / 1%CNT	1	8.05
	2	10.65
	3	7.05
	4	9.22
	Average	8.74
	S.D.	1.55

ตารางที่ ค. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Water Vapor Permeability (gm mil/m ² day)
PP/ 3%clay / 1%CNT	1	7.68
	2	10.02
	3	7.47
	4	9.76
	Average	8.73
	S.D.	1.34
PP/ 0%clay / 2%CNT	1	7.28
	2	8.74
	3	6.80
	4	9.73
	Average	8.14
	S.D.	1.34
PP/ 1%clay / 2%CNT	1	7.43
	2	9.38
	3	7.69
	4	10.16
	Average	8.67
	S.D.	1.32
PP/ 2%clay / 2%CNT	1	7.18
	2	9.58
	3	7.86
	4	10.24
	Average	8.72
	S.D.	1.43

ตารางที่ ค. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Water Vapor Permeability (gm mil/m ² day)
PP/ 3%clay / 2%CNT	1	7.78
	2	8.31
	3	6.12
	4	6.44
	Average	7.16
	S.D.	1.79
PP/ 0%clay / 3%CNT	1	7.61
	2	9.86
	3	7.18
	4	9.88
	Average	8.63
	S.D.	1.44
PP/ 1%clay / 3%CNT	1	7.42
	2	9.02
	3	6.74
	4	8.83
	Average	8.00
	S.D.	1.10
PP/ 2%clay / 3%CNT	1	8.16
	2	10.12
	3	8.59
	4	11.53
	Average	9.60
	S.D.	1.54

ตารางที่ ค. ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	Specimen	Water Vapor Permeability (gm mil/m ² day)
PP/ 3%clay / 3%CNT	1	10.50
	2	12.51
	3	8.84
	4	11.97
	Average	10.96
	S.D.	1.65

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง TCA

ตารางที่ ง. ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเครื่อง TCA

PP	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.285	0.1598	1.784
	2	0.2836	0.1675	1.693
	3	0.2842	0.1685	1.686
	Average	0.2843	0.1653	1.721
	S.D.	0.0007	0.0048	0.0547
PP/ 1%clay/ 0%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.1930	0.2452	0.7873
	2	0.1962	0.2311	0.8488
	3	0.1927	0.2375	0.8114
	Average	0.1940	0.2379	0.8158
	S.D.	0.0019	0.0071	0.0310

ตารางที่ ง. ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TCA (ต่อ)

PP/ 2%clay/ 0%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2321	0.1919	1.2090
	2	0.2304	0.1933	1.1920
	3	0.2307	0.1900	1.2150
	Average	0.2311	0.1917	1.2053
	S.D.	0.0009	0.0017	0.0119
PP/ 3%clay/ 0%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2681	0.1596	1.6800
	2	0.2637	0.1657	1.5920
	3	0.2630	0.1715	1.5330
	Average	0.2649	0.1656	1.6017
	S.D.	0.0028	0.0060	0.0740
PP/ 0%clay / 1%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2438	0.2016	1.2090
	2	0.2408	0.2013	1.1960
	3	0.2413	0.2015	1.1980
	Average	0.2420	0.2015	1.2010
	S.D.	0.0016	0.0002	0.0070

ตารางที่ ง. ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TCA (ต่อ)

PP/ 1%clay/ 1%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2300	0.2268	1.0140
	2	0.2302	0.2277	1.0110
	3	0.2301	0.2265	1.0160
	Average	0.2301	0.2270	1.0137
	S.D.	0.0001	0.0006	0.0025
PP/ 2%clay/ 1%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2881	0.1929	1.4930
	2	0.2879	0.1833	1.5710
	3	0.2783	0.2088	1.3320
	Average	0.2848	0.1950	1.4653
	S.D.	0.0056	0.0129	0.1219
PP/ 3%clay / 1%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2839	0.2155	1.3170
	2	0.2854	0.2084	1.3700
	3	0.2857	0.2022	1.4130
	Average	0.2850	0.2087	1.3667
	S.D.	0.0010	0.0067	0.0481

ตารางที่ ง. ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TCA (ต่อ)

PP/ 0%clay/ 2%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.3044	0.2146	1.4180
	2	0.3049	0.2204	1.3830
	3	0.3076	0.2134	1.4420
	Average	0.3056	0.2161	1.4143
	S.D.	0.0017	0.0037	0.0297
PP/ 1%clay/ 2%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.3309	0.2057	1.6080
	2	0.3351	0.2005	1.6710
	3	0.3323	0.2133	1.5580
	Average	0.3328	0.2065	1.6123
	S.D.	0.0021	0.0064	0.0566
PP/ 2%clay / 2%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.3010	0.2265	1.3290
	2	0.2976	0.2198	1.3540
	3	0.2993	0.2137	1.4010
	Average	0.2993	0.2200	1.3613
	S.D.	0.0017	0.0064	0.0366

ตารางที่ ง. ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TCA (ต่อ)

PP/ 3%clay/ 2%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2430	0.2967	0.8190
	2	0.2488	0.2607	0.9546
	3	0.2500	0.2550	0.9803
	Average	0.2473	0.2708	0.9180
	S.D.	0.0037	0.0226	0.0867
PP/ 0%clay/ 3%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2388	0.3022	0.7902
	2	0.2382	0.3030	0.7861
	3	0.2389	0.2987	0.7999
	Average	0.2386	0.3013	0.7921
	S.D.	0.0004	0.0023	0.0071
PP/ 1%clay / 3%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2730	0.2965	0.9210
	2	0.2768	0.2814	0.9835
	3	0.2763	0.2746	1.0060
	Average	0.2754	0.2842	0.9702
	S.D.	0.0021	0.0112	0.0440

ตารางที่ ง. ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TCA (ต่อ)

PP/ 2%clay/ 3%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.3148	0.2449	1.2860
	2	0.3120	0.2497	1.2500
	3	0.3111	0.2487	1.2510
	Average	0.3126	0.2478	1.2623
	S.D.	0.0019	0.0025	0.0205
PP/ 3%clay/ 3%CNT	Specimen	Thermal Conductivity (W / m K)	Thermal Diffusivity (mm/s)	Specific Heat (MJ/m ³ K)
	1	0.2872	0.2578	1.1140
	2	0.2859	0.2635	1.0850
	3	0.2861	0.2611	1.0960
	Average	0.2864	0.2608	1.0983
	S.D.	0.0007	0.0029	0.0146

ภาคผนวก จ

การหาค่า Volume fraction ของสารตัวเติม

จากสมการหาค่า Volume fraction ของสารตัวเติมหาได้ดังสมการ

$$\phi_f = \frac{\frac{\omega_f}{\rho_f}}{\frac{\omega_f}{\rho_f} + \frac{\omega_m}{\rho_m}}$$

โดย ϕ_f volume fraction of filler, $\phi_f = 1 - \phi_m$
 ω_f mass fraction of filler, $\omega_f = 1 - \omega_m$
 ω_m mass fraction of polymer
 ρ_f density of filler
 ρ_m density of polymer

ดังนั้น Volume fraction ของเคลย์และคาร์บอนนาโนทิวบ์จึงหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi_{clay} = \frac{\frac{\omega_{clay}}{\rho_{clay}}}{\frac{\omega_{clay}}{\rho_{clay}} + \frac{\omega_{CNT}}{\rho_{CNT}} + \frac{\omega_m}{\rho_m}}$$
$$\phi_{CNT} = \frac{\frac{\omega_{CNT}}{\rho_{CNT}}}{\frac{\omega_{clay}}{\rho_{clay}} + \frac{\omega_{CNT}}{\rho_{CNT}} + \frac{\omega_m}{\rho_m}}$$

โดย ϕ_{clay} volume fraction of clay
 ϕ_{CNT} volume fraction of carbonnanotube
 ω_{clay} mass fraction of clay
 ω_{CNT} mass fraction of carbonnanotube
 ρ_{clay} density of clay
 ρ_{CNT} density of carbonnanotube

เมื่อ density ของพอลิโพรพิลีนมีค่าเท่ากับ 0.91 g/cm^3 (จาก datasheet)

density ของเคลย์มีค่าเท่ากับ 0.91 g/cm^3 (จาก datasheet)

density ของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าเท่ากับ 2.43 g/cm^3

$$\omega_m = \omega_{PP} + \omega_{PPMA} \text{ โดยกำหนดให้ } \rho_{PPMA} = \rho_{PP}$$

ตารางที่ จ. ค่า Volume fraction ของสารตัวเติม

ω_m	ω_{clay}	ω_{CNT}	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	ϕ_f
1	0	0	0	0	0
0.99	0.01	0	0.01	0	0.01
0.98	0.02	0	0.02	0	0.02
0.97	0.03	0	0.03	0	0.03
0.99	0	0.01	0	0.01	0.01
0.98	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
0.97	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03
0.96	0.03	0.01	0.03	0.01	0.04
0.98	0	0.02	0	0.02	0.02
0.97	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03
0.96	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04
0.95	0.03	0.02	0.03	0.02	0.05
0.97	0	0.03	0	0.03	0.03
0.96	0.01	0.03	0.01	0.03	0.04
0.95	0.02	0.03	0.02	0.03	0.05
0.94	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06

ภาคผนวก ฉ

Tensile Stress และ Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิต จากการทำนายด้วย series model และ parallel model

เมื่อ Tensile Stress ของเคลย์มีค่าเท่ากับ 336 MPa [62]

Tensile Stress ของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าเท่ากับ 11000 MPa [63]

ตารางที่ ฉ.1 Tensile Stress ของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย series model

ϕ_m	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	σ_c (MPa)	σ_m (MPa)	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m}$
1.0000	0.0000	0.0000	22.0000	22.0000	1.0000
0.9949	0.0051	0.0000	23.5916	22.0000	1.0723
0.9898	0.0102	0.0000	25.2029	22.0000	1.1456
0.9846	0.0154	0.0000	26.8303	22.0000	1.2196
0.9962	0.0000	0.0038	63.3661	22.0000	2.8803
0.9911	0.0051	0.0038	65.1784	22.0000	2.9627
0.9859	0.0103	0.0038	67.0089	22.0000	3.0459
0.9807	0.0155	0.0038	68.8579	22.0000	3.1299
0.9924	0.0000	0.0076	105.2600	22.0000	4.7845
0.9872	0.0051	0.0076	107.2947	22.0000	4.8770
0.9820	0.0103	0.0077	109.3499	22.0000	4.9705
0.9767	0.0156	0.0077	111.4261	22.0000	5.0648
0.9886	0.0000	0.0114	147.6880	22.0000	6.7131
0.9833	0.0052	0.0115	149.9506	22.0000	6.8159
0.9780	0.0104	0.0116	152.2362	22.0000	6.9198
0.9727	0.0157	0.0116	154.5452	22.0000	7.0248

ตารางที่ น.2 Tensile Stress ของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย parallel model

ϕ_m	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	σ_c (MPa)	σ_m (MPa)	$\frac{\sigma_c}{\sigma_m}$
1.0000	0.0000	0.0000	22.0000	22.0000	1.0000
0.9949	0.0051	0.0000	22.1012	22.0000	1.0046
0.9898	0.0102	0.0000	22.2082	22.0000	1.0095
0.9846	0.0154	0.0000	22.3173	22.0000	1.0144
0.9962	0.0000	0.0038	22.0793	22.0000	1.0036
0.9911	0.0051	0.0038	22.1861	22.0000	1.0085
0.9859	0.0103	0.0038	22.2951	22.0000	1.0134
0.9807	0.0155	0.0038	22.4062	22.0000	1.0185
0.9924	0.0000	0.0076	22.1640	22.0000	1.0075
0.9872	0.0051	0.0076	22.2728	22.0000	1.0124
0.9820	0.0103	0.0077	22.3837	22.0000	1.0174
0.9767	0.0156	0.0077	22.4970	22.0000	1.0226
0.9886	0.0000	0.0114	22.2505	22.0000	1.0114
0.9833	0.0052	0.0115	22.3613	22.0000	1.0164
0.9780	0.0104	0.0116	22.4743	22.0000	1.0216
0.9727	0.0157	0.0116	22.5896	22.0000	1.0268

เมื่อ Young's Modulus ของเคลย์มีค่าเท่ากับ 178 GPa [64]

Young's Modulus ของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าเท่ากับ 270 GPa [63]

ตารางที่ ๓.3 Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย series model

ϕ_m	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	E_c (MPa)	E_m (MPa)	$\frac{E_c}{E_m}$
1.0000	0.0000	0.0000	0.6700	0.6700	1.0000
0.9949	0.0051	0.0000	1.5688	0.6700	2.3416
0.9898	0.0102	0.0000	2.4788	0.6700	3.6997
0.9846	0.0154	0.0000	3.3979	0.6700	5.0715
0.9962	0.0000	0.0038	1.6828	0.6700	2.5117
0.9911	0.0051	0.0038	2.5946	0.6700	3.8725
0.9859	0.0103	0.0038	3.5155	0.6700	5.2470
0.9807	0.0155	0.0038	4.4457	0.6700	6.6354
0.9924	0.0000	0.0076	2.7107	0.6700	4.0458
0.9872	0.0051	0.0076	3.6334	0.6700	5.4229
0.9820	0.0103	0.0077	4.5654	0.6700	6.8141
0.9767	0.0156	0.0077	5.5070	0.6700	8.2193
0.9886	0.0000	0.0114	3.7516	0.6700	5.5994
0.9833	0.0052	0.0115	4.6855	0.6700	6.9933
0.9780	0.0104	0.0116	5.6289	0.6700	8.4013
0.9727	0.0157	0.0116	6.5820	0.6700	9.8238

ตารางที่ ๓.4 Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย parallel model

ϕ_m	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	E_c (MPa)	E_m (MPa)	$\frac{E_c}{E_m}$
1.0000	0.0000	0.0000	0.6700	0.6700	1.0000
0.9949	0.0051	0.0000	0.6713	0.6700	1.0019
0.9898	0.0102	0.0000	0.6747	0.6700	1.0071
0.9846	0.0154	0.0000	0.6783	0.6700	1.0124
0.9962	0.0000	0.0038	0.6704	0.6700	1.0006
0.9911	0.0051	0.0038	0.6739	0.6700	1.0058
0.9859	0.0103	0.0038	0.6774	0.6700	1.0110
0.9807	0.0155	0.0038	0.6810	0.6700	1.0164
0.9924	0.0000	0.0076	0.6730	0.6700	1.0044
0.9872	0.0051	0.0076	0.6765	0.6700	1.0097
0.9820	0.0103	0.0077	0.6801	0.6700	1.0151
0.9767	0.0156	0.0077	0.6838	0.6700	1.0205
0.9886	0.0000	0.0114	0.6756	0.6700	1.0084
0.9833	0.0052	0.0115	0.6792	0.6700	1.0137
0.9780	0.0104	0.0116	0.6828	0.6700	1.0192
0.9727	0.0157	0.0116	0.6866	0.6700	1.0247

ภาคผนวก ข
ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำของวัสดุคอมโพสิต
จากการทำนายด้วย Modified Nielsen Model

ตารางที่ ข.1 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย Modified Nielsen Model

ϕ_m	ϕ_f	P_m	$\frac{P_c}{P_m}, (S=1)$	$\frac{P_c}{P_m}, (S=-0.5)$	$\frac{P_c}{P_m}, (S=0)$
1.0000	0.0000	11237.80	11237.81	11237.80	11237.80
0.9949	0.0051	11237.80	7413.93	11180.70	9561.42
0.9898	0.0102	11237.80	5503.16	11123.04	8298.28
0.9846	0.0154	11237.80	4357.07	11064.79	7312.34
0.9962	0.0038	11237.80	11195.45	11195.45	11195.45
0.9913	0.0087	11237.80	11139.98	11139.98	11139.98
0.9862	0.0138	11237.80	11082.62	11082.62	11082.62
0.9810	0.0190	11237.80	11024.26	11024.26	11024.26
0.9924	0.0076	11237.80	11152.57	11152.57	11152.57
0.9875	0.0125	11237.80	11097.11	11097.11	11097.11
0.9824	0.0176	11237.80	11039.88	11039.88	11039.88
0.9772	0.0228	11237.80	10981.49	10981.49	10981.49
0.9886	0.0114	11237.80	11109.13	11109.13	11109.13
0.9836	0.0164	11237.80	11053.37	11053.37	11053.37
0.9785	0.0215	11237.80	10996.00	10996.00	10996.00
0.9733	0.0267	11237.80	10937.42	10937.42	10937.42

ตารางที่ ข.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย Modified Nielsen Model

ϕ_m	ϕ_f	P_m	$\frac{P_c}{P_m}, (S=1)$	$\frac{P_c}{P_m}, (S=-0.5)$	$\frac{P_c}{P_m}, (S=0)$
1.0000	0.0000	10.96	10.96	10.96	10.96
0.9949	0.0051	10.96	7.23	10.90	9.33
0.9898	0.0102	10.96	5.37	10.85	8.09
0.9846	0.0154	10.96	4.25	10.79	7.13
0.9962	0.0038	10.96	10.92	10.92	10.92
0.9913	0.0087	10.96	10.86	10.86	10.86
0.9862	0.0138	10.96	10.81	10.81	10.81
0.9810	0.0190	10.96	10.75	10.75	10.75
0.9924	0.0076	10.96	10.88	10.88	10.88
0.9875	0.0125	10.96	10.82	10.82	10.82
0.9824	0.0176	10.96	10.77	10.77	10.77
0.9772	0.0228	10.96	10.71	10.71	10.71
0.9886	0.0114	10.96	10.83	10.83	10.83
0.9836	0.0164	10.96	10.78	10.78	10.78
0.9785	0.0215	10.96	10.72	10.72	10.72
0.9733	0.0267	10.96	10.67	10.67	10.67

ภาคผนวก ข
ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิต
จากการทำนายด้วย series model และ parallel model

เมื่อ ค่าการนำความร้อนของเคลย์มีค่าเท่ากับ 0.25 W/m K
 ค่าการนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าเท่ากับ 3000 W/m K

ตารางที่ ข.1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย series model

ϕ_m	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	k_c (W/m K)	k_m (W/m K)	$\frac{k_c}{k_m}$
1.0000	0.0000	0.0000	0.2843	0.2843	1.0000
0.9949	0.0051	0.0000	0.2841	0.2843	0.9993
0.9898	0.0102	0.0000	0.2839	0.2843	0.9986
0.9846	0.0154	0.0000	0.2837	0.2843	0.9979
0.9962	0.0000	0.0038	0.2854	0.2843	1.0038
0.9911	0.0051	0.0038	0.2852	0.2843	1.0031
0.9859	0.0103	0.0038	0.2850	0.2843	1.0024
0.9807	0.0155	0.0038	0.2848	0.2843	1.0017
0.9924	0.0000	0.0076	0.2865	0.2843	1.0076
0.9872	0.0051	0.0076	0.2863	0.2843	1.0070
0.9820	0.0103	0.0077	0.2861	0.2843	1.0063
0.9767	0.0156	0.0077	0.2859	0.2843	1.0056
0.9886	0.0000	0.0114	0.2876	0.2843	1.0116
0.9833	0.0052	0.0115	0.2874	0.2843	1.0109
0.9780	0.0104	0.0116	0.2872	0.2843	1.0102
0.9727	0.0157	0.0116	0.2870	0.2843	1.0096

ตารางที่ ข.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตจากการทำนายด้วย parallel model

ϕ_m	ϕ_{clay}	ϕ_{CNT}	k_c (W/m K)	k_m (W/m K)	$\frac{k_c}{k_m}$
1.0000	0.0000	0.0000	0.2843	0.2843	1.0000
0.9949	0.0051	0.0000	0.2841	0.2843	0.9994
0.9898	0.0102	0.0000	0.2839	0.2843	0.9988
0.9846	0.0154	0.0000	0.2838	0.2843	0.9981
0.9962	0.0000	0.0038	11.5885	0.2843	40.7616
0.9911	0.0051	0.0038	11.6449	0.2843	40.9598
0.9859	0.0103	0.0038	11.7018	0.2843	41.1600
0.9807	0.0155	0.0038	11.7593	0.2843	41.3622
0.9924	0.0000	0.0076	23.0359	0.2843	81.0269
0.9872	0.0051	0.0076	23.1503	0.2843	81.4290
0.9820	0.0103	0.0077	23.2657	0.2843	81.8351
0.9767	0.0156	0.0077	23.3824	0.2843	82.2454
0.9886	0.0000	0.0114	34.6293	0.2843	121.8055
0.9833	0.0052	0.0115	34.8031	0.2843	122.4167
0.9780	0.0104	0.0116	34.9786	0.2843	123.0341
0.9727	0.0157	0.0116	35.1559	0.2843	123.6579

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอิสราภรณ์ ศิริวิริยะกุล เกิดวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2531 มีภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัด นครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครสวรรค์ จากนั้นได้เข้าศึกษาใน ระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต โดยสำเร็จการ ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม เคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553